

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas

15 y 16 de octubre de 2026

Memorias Mesa 1: Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Publicado en Octubre 2026
Palmeros Rojas, Oscar; Salazar Moreno, Raquel; Hernández Salazar, Ingrid; Duana Ramos María Matilde; Gómez Muñoz Edgar; Hernández Torres, Octavio Isaac. Memoria de la Mesa1: Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible. 15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas 15 y 16 de octubre de 2026, Chapingo, México

El contenido de los trabajos aquí publicados es responsabilidad absoluta de los autores y coautores

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas 15 y 16 de octubre de 2026, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Índice

	Título	Página
1.	Ultrasonicación en frío de un extracto rico en β-ficoeritrina obtenido de Porphyridium cruentum como estrategia de descontaminación microbiana. Ángel Valdez Ortiz, Lourdes Janeth Germán Báez, José Antonio Garzón-Tiznado, Karelia Arizbeth Meza Ayala	**7**
2.	Estimación de la evapotranspiración del cultivo de ajo (*Allium sativum L.*) mediante aprendizaje automático. David Vargas Cano, Miguel Servín Palestina, Orlando Ramírez Valle, Sergio Iván Jiménez Jiménez.	**17**
3.	Implementación de sistemas IoT de bajo costo: Una alternativa tecnológica y accesible para el monitoreo climático en invernaderos agrícolas. Elizabeth Ome Sterling, Natalia Licet Sánchez Sánchez, Luis Humberto Martínez Palmeth, Nadia Brigitte Sanabria Méndez.	**31**
4.	Consumo y distribución del agua en Baja California y Sonora ante escasez hídrica. Fidel Bautista Mayorga, José Alberto García Salazar.	**41**
5.	El ADN propio como DAMP y su potencial como inmunoestimulante vegetal. Flor de Dalia Durán-Flores y Martin Heil.	**52**
6.	Sistema automático de bajo costo para estimar el requerimiento de agua de cultivo de rábano (*Raphanus sativus L.*) en condiciones de invernadero y cielo abierto. Graciano Javier Aguado Rodríguez, Abel Quevedo Nolasco.	**63**
7.	Detección Inteligente de Riesgos Microclimáticos en Invernaderos. Irlesa Indira Sánchez Medina, Marlio Bedoya Cardoso, Jorge Eliecer Martínez Gaitán.	**75**
8.	Tendencias científicas, convergencia tecnológica y oportunidades de integración en la agricultura en ambiente controlado (CEA) y sistemas Plant Factory: una revisión bibliométrica. Iván Alejandro García Lemus, Raquel Salazar Moreno, Irineo López Cruz, Jorge Flores Velázques.	**89**
9.	Automatización de la generación de modelos hidráulicos EPANET a partir de datos geoespaciales abiertos: una herramienta de apoyo para la enseñanza del diseño de redes de distribución de agua potable. Jair Del Valle Morales, Erika Hernández Vivar, Claudia Rojas Serna, José Antonio Quevedo Tiznado.	**103**

10. Desarrollo e implementación de dispositivos de energía solar térmica para aplicaciones agrícolas. Jonás Torres Montealbán. **116**

11. Modelo de inteligencia artificial para predecir la productividad agrícola según variables climáticas y del suelo. Jorge Eliecer Martínez Gaitán, Marlio Bedoya Cardoso, Irlesa Indira Sánchez Medina. **134**

12. Simulación CFD de Eficiencia Térmica y Dispersión de Gases en Estufa Rocket Tipo K Metálica. Jorge Flores Velázquez, Carlos A. Corona Solano, Eduardo Arzate Ramírez, Abraham Rojano. **145**

13. Diseño y construcción de microterrazas para el cultivo de café (*Coffea arabica L.*) en la finca la Florida (Gigante, Huila, Colombia). Mabel Yulexy Matta Nieto, John Jairo Arévalo-Hernández, Miguel Ángel Díaz Herrera. **160**

14. Modelo físico-matemático con inteligencia artificial para optimizar el uso de agua en parcelas agrícolas. Marlio Bedoya Cardoso, Jorge Eliecer Martínez Gaitán, Irlesa Indira Sánchez Medina. **177**

15. Evaluación de la degradabilidad ruminal in situ de harina de *Nauphoeta cinerea* para su utilización como fuente alternativa de proteína en alimentación animal. Mauricio Cervantes Silva, Laura Haydée Vallejo Hernández, Noé Galindo Dorantes, Carlos Enrique Álvarez Moreno. **188**

16. Evaluación fisicoquímica del proceso de digestión anaerobia de estiércol de bovinos para la producción de biogás y mitigación del impacto ambiental. Mauricio Cervantes Silva, Carlos Enrique Álvarez Moreno, Jesús Antonio García Martínez. **198**

17. Modelación Hidrogeológica del Acuífero de Cuxtal para la Gestión Sostenible del Recurso Hídrico. Mónica Marisol Carrillo Monsrreal, Iris Neri Flores, Bertha Hernández Aguilar, Didier Samayoa Ochoa. **210**

18. Análisis numérico de un sistema de ventilación forzada y geometría sobre el ambiente de una fábrica de plantas con luces artificiales (PFAL). Oneyda Oyorzabal Marquez, Raquel Salazar Moreno, Jorge Flores Velázquez, Enrrique Álvarez Moreno **214**

19. El Docente en un Contexto de Gran Influencia Digital. El Empleo del Celular y Uso de Plataformas y Simuladores. El caso del Área de Física de P.A de la UACh. Rafael Zamora Linares, Enrique Armando Gómez Lozoya y Donato Vázques Juárez. **226**

20. Predicción del caudal medio diario del Río Tequisistlán, Oaxaca, México mediante el uso de redes neuronales artificiales. Ricardo Álvarez López, Laura Alicia Ibáñez Castillo. **236**

21. Comparación de la huella hídrica azul y verde del mango Ataúlfo en el occidente y sur de México. Ricardo Álvarez López **244**

22. Actividad insecticida de extractos hexánico y etanólico de semillas de guanábana (*Annona muricata L.*) contra el gorgojo asociado a maíz (*Sitophilus zeamais*). Ricardo Hernández González, Ulises Murrieta Dionicio, Emanuel Quintero Delgadillo, Benito Reyes Trejo. **254**

23. La Deducción de Euler–Lagrange y una Interpretación Variacional de la Fuerza Emocional en Equipos Humanos de dos Integrantes. Abraham Rojano, Raquel Salazar, Irineo López, Jorge Flores Vázquez. **261**

24. Del Teorema de Pitágoras a la Inteligencia Artificial: la Evolución de la Sistematización del Conocimiento Matemático. Abraham Rojano. **269**

25. Evaluación técnica de la tubería de drenaje agrícola en Guadua angustifolia Kunth en la Universidad Surcolombiana Sede Pitalito. Solanyi Chaux Samboni, Edinson Mujica Rodríguez. **281**

26. Modelo espacial con enfoque hidráulico para la identificación de sitios óptimos de humedales artificiales mediante análisis multicriterio y SIG en la Subcuenca Almoloya-Otzolotepec. Hernández Bautista Valeria Nahomi, Cruz Castro Oscar, Osornio Berthet Luis Jesús, García Martínez Magdalena. **295**

27. Efectos de silicio y fosfito en el biocontrol de Fusarium verticillioides en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*). Zyanya Jazmín Castro Pérez, Fernando Carlos Gómez Merino, Libia Iris Trejo Tellez, Víctor Hugo Carbajal Vázquez. **306**

28. Diseño de sistema automatizado con panel TouchPad TFT de 3.5" y microsistema operativo basado en arquitectura ATmega2560 para control IoT de una mini-Plant Factory. Luis Tonatiuh Castellanos Serrano, José Alfredo Castellanos Suárez, María Victoria Gómez Águila, Fernando Salinas Paniagua. **315**

29. Impacto del uso del celular en las actividades académicas y las calificaciones de los estudiantes en Matemáticas I. Noé Ramírez Negrete, Oscar Palmeros Rojas, Blanca Isabel Sánchez Toledano. **330**

30. Evaluación de métodos convencionales, redes neuronales y CHIRPS para la reconstrucción de series mensuales de precipitación en la Ciudad de México, 1981–2024. María del Carmen García Pavón, Laura Alicia Ibáñez Castillo, Raquel Salazar Moreno. **344**

31. Altura de Flotación. Guillermo Becerra Córdova. **357**

32. Desarrollo de herramientas web para el diseño hidráulico de sistemas de riego. Ambrosio Ambrosio Juan Pablo, González Camacho Juan Manuel, Ambrosio Ambrosio Carlos Ulises. **371**

33. Efecto de la liofilización sobre la calidad química de café *Coffea arabica var*. Castillo procesado por vía seca y húmeda. Diego Fernando Gasca Bermeo, Jaime Daniel Bustos Vanegas, Andrés Felipe Bahamón Monje, Nelson Gutiérrez. **385**

34. Simulación sistemática mediante redes neuronales artificiales para determinación del contenido de carbono orgánico en suelos ejidales. Eduardo Michelle Martínez Crucess, Raquel Salazar Moreno, Oscar Fernández Fernández. **394**

35. Predicción de la temperatura de deshidratado mediante redes neuronales artificiales LSTM en el interior de un secador solar tipo invernadero. Baltazar López Velasco, Agustín Ruiz García, Irineo Lorenzo López Cruz, Ángel Garduño García. **405**

36. Modelos de respuesta de biomasa, rastrojo, rendimiento y componentes en arroz y la densidad de plantación. José Alberto Salvador Escalante Estrada, Yolanda Isabel Escalante Estrada, Luis Enrique Escalante Estrada, Cid Aguilar Carpio. **415**

37. Formulación de una dieta de costo mínimo para tilapia del Nilo mediante programación lineal. Carlos Enrique Álvarez Moreno, Sharon Guadalupe Cortés Cortés, Jesús Antonio García Martínez, Mauricio Cervantes Silva Martínez. **424**

38. Generación de Corriente Alterna a Partir de Fuentes de Energía Renovable: Un Enfoque Basado en el Control Conmutado de Convertidores Electrónicos de Potencia. Rogelio Ernesto García Chávez, Cristina Estefany Flores Juárez, David Hebert del Valle Paniagua, José María Laveaga Vergara. **435**

39. Estrategias prácticas para que profesores de matemáticas diseñen cuestionarios en línea con apoyo de la Inteligencia Artificial Generativa. Noé Ramírez Negrete, Oscar Palmeros Rojas, Alma Rosa Herrera Flores. **443**

40. Evaluación del Método Racional en la cuenca río Chapingo, con precipitación puntual y distribuida espacialmente. Gerardo Emmanuel Cervantes González; Erick Giovanni Martínez Esquivel; Jorge Víctor Prado Hernández. **456**

41. Evaluación microclimática multivariante en un invernadero tipo túnel para el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) mediante arquitectura IoT. Carlos Ernesto Luquez Gaitan, Natividad Hernández Mendoza, Raudel Flores Moreno, Samuel Rivera López. **464**

42. Construcción y caracterización microclimática de una minifábrica de plantas para la generación de datos de frontera en modelos CFD. Héctor Hugo Fuentes Franco, Agustín Ruíz García, Jorge Flores Velázquez, José Armando Ramírez Arias. **479**

43. Cuantificación de la Evapotranspiración Actual de Vitis vinifera L. en un Viñedo del Suroeste de Delicias, Chihuahua. Saúl Valencia Gaspar, Linda Citlalli Noperi Mosqueda, Orlando Ramirez Valle, Juan Manuel Soto Parra. **490**

44. Desarrollo de un Recubrimiento Comestible a Base de Pectina para Prolongar la Vida Útil de Fresas. Ilse Berenice Carrillo Salas. **502**

45. Diagrama de Flujo Computacional para Inteligencia Artificial en Trigo. Arturo Chong Eslava. **516**

46. Modelado matemático del crecimiento de lechuga en una minifábrica de plantas. Cecilia Jerónimo Cruz, Agustín Ruíz García, José Olaf Valencia Islas, José Armando Martínez Arias. **521**

Ultrasonicación en frío de un extracto rico en β-ficoeritrina obtenido de *Porphyridium cruentum* como estrategia de descontaminación microbiana

Ángel Valdez Ortiz[1], Lourdes Janeth Germán Báez[1], José Antonio Garzón Tiznado[1], Karelia Arizbeth Meza Ayala[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La β-ficoeritrina (BPE) es un pigmento proteico de alto valor con aplicaciones alimentarias y farmacéuticas; sin embargo, su termolabilidad limita el uso de tratamientos térmicos para garantizar la inocuidad microbiológica. El objetivo fue evaluar la ultrasonicación como tecnología no térmica para la descontaminación microbiana de un extracto rico en BPE de *Porphyridium cruentum*, comparando un baño ultrasónico (40 kHz, 80 W; 10–150 min) y un sonicador de pistilo (22.5 kHz, 100 W; 10–60 min). La eficacia microbiológica se determinó por recuento de unidades formadoras de colonias; la BPE se cuantificó mediante espectrofotometría UV-Vis y la capacidad antioxidante por ABTS y DPPH. Los tratamientos se realizaron por triplicado y se analizaron mediante ANOVA y prueba LSD de Fisher ($\alpha = 0.05$). La ultrasonicación por pistilo produjo una inactivación superior al 99 % a los 30 min, mientras que el baño requirió 150 min para una reducción equivalente. A los 60 min con pistilo, el recuento disminuyó hasta aproximadamente 5 UFC; sin embargo, la retención de BPE descendió a cerca del 60 % y se redujo la fluorescencia. Por ello, el tratamiento de 30 min se seleccionó como la condición más adecuada, al conservar aproximadamente el 70 % de la BPE y su fluorescencia característica, con elevada inactivación microbiana. Bajo esta condición, la capacidad antioxidante aumentó 235 % por ABTS y 380 % por DPPH. En conjunto, la ultrasonicación con pistilo fue la alternativa más rápida y eficiente para disminuir la carga microbiana sin anular la funcionalidad del extracto, y representa una estrategia promisoria para el procesamiento inocuo de ingredientes proteicos termolábiles.

Palabras clave: Capacidad antioxidante, esterilización en frío, microalgas, ficobiliproteínas, ultrasonido.

Abstract

β-Phycoerythrin (BPE) is a high-value protein pigment with food and pharmaceutical applications; however, its thermolability limits the use of heat treatments to ensure microbiological safety. This study aimed to evaluate ultrasonication as a nonthermal technology for the microbial decontamination of a BPE-rich extract from *Porphyridium cruentum*, comparing an ultrasonic bath (40 kHz, 80 W; 10–150 min) and a probe sonicator (22.5 kHz, 100 W; 10–60 min).

[1]Doctorado en Ciencias con Orientación en Biotecnología, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Blvd. de las Américas y Blvd. Universitarios S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 80040, Culiacán Rosales, Sinaloa, México, avaldez@uas.edu.mx, ljgerman@uas.edu.mx, garzon24@uas.edu.mx.
[2]Laboratorio de Biotecnología Aplicada, Ingeniería en Biotecnología, Universidad Autónoma Indígena de México, Prolongación 5 de Mayo S/N, C.P. 81890, Ejido Poblado de Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa, México. *Autor de correspondencia: karelia.meza@uaim.edu.mx

Microbiological efficacy was determined by colony-forming unit counts; BPE was quantified by UV–Vis spectrophotometry, and antioxidant capacity by the ABTS and DPPH assays. Treatments were performed in triplicate and analyzed by ANOVA followed by Fisher's LSD test ($\alpha = 0.05$). Probe ultrasonication produced more than 99% microbial inactivation after 30 min, whereas the ultrasonic bath required 150 min to achieve an equivalent reduction. After 60 min of probe treatment, the count decreased to approximately 5 CFU; however, BPE retention declined to about 60%, and fluorescence was reduced. Therefore, the 30-min treatment was selected as the most suitable condition because it retained approximately 70% of BPE and its characteristic fluorescence while maintaining high microbial inactivation. Under this condition, antioxidant capacity increased by 235% according to the ABTS assay and by 380% according to the DPPH assay. Overall, probe ultrasonication was the fastest and most efficient alternative for reducing microbial load without eliminating the functional properties of the extract and represents a promising strategy for the safe processing of thermolabile protein ingredients.

Keywords: antioxidant capacity, cold sterilization, microalgae, phycobiliproteins, ultrasound.

Introducción

La creciente preferencia por alimentos con etiquetas limpias y por ingredientes de origen natural ha impulsado la búsqueda de compuestos que, además de aportar color o valor nutricional, conserven propiedades funcionales. Dentro de este contexto, la biomasa microalgal representa una fuente atractiva de pigmentos, proteínas y antioxidantes, debido a sus ciclos de producción cortos, elevada eficiencia fotosintética y posibilidad de cultivo en sistemas controlados sin competir directamente por suelos agrícolas. Entre las especies de mayor interés se encuentra *Porphyridium cruentum*, microalga roja que acumula ficobiliproteínas y, de manera particular, β-ficoeritrina (BPE), responsable de su coloración rojiza y de su fluorescencia característica (Ramos-Frometa & Gómez-Luna, 2024; Wang et al., 2023).

Precisamente por estas características, la BPE se considera una proteína hidrosoluble de alto valor para las industrias alimentaria, farmacéutica y biotecnológica. Se ha estudiado como colorante natural, marcador fluorescente e ingrediente funcional, y su actividad antioxidante amplía todavía más sus posibilidades de aplicación. Sin embargo, esas mismas propiedades dependen de una estructura molecular sensible al pH, la temperatura, la luz y las condiciones de procesamiento. Por este motivo, garantizar la inocuidad microbiológica de extractos ricos en BPE constituye un reto, ya que los tratamientos térmicos convencionales pueden disminuir su concentración, alterar su color y fluorescencia o comprometer su actividad biológica (Kovaleski et al., 2022; Sonani et al., 2016).

Ante esta limitación, las tecnologías no térmicas han cobrado relevancia como alternativas para reducir la carga microbiana con menor impacto sobre moléculas sensibles al calor. Entre ellas, la ultrasonicación, la cual se basa en la propagación de ondas acústicas que generan ciclos de compresión y expansión y, en medios líquidos, producen cavitación. A partir de la formación y el colapso de microburbujas se originan fuerzas de cizalla, microcorrientes y cambios locales de presión capaces de alterar membranas y estructuras celulares. No obstante, la magnitud de este efecto no es constante, sino que depende de la frecuencia, potencia, amplitud, tiempo de exposición, volumen, viscosidad, temperatura y tipo de microorganismo presentes en cada matriz (Bhargava et al., 2021; Chavan et al., 2022).

Además de dichos parámetros, el modo en que la energía ultrasónica llega a la muestra, determina la eficiencia del tratamiento. En los baños ultrasónicos, la energía se transmite a través del líquido del equipo y de las paredes del recipiente, lo que puede generar zonas con

diferente intensidad. En cambio, en los sistemas de pistilo o sonda, la energía se aplica directamente al producto y favorece una cavitación localizada de mayor intensidad (Moholkar et al., 2000). A partir de estas diferencias, se planteó como hipótesis que el contacto directo del pistilo permitiría disminuir la carga microbiana en menor tiempo y con una mejor conservación funcional del extracto. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar y comparar la eficacia de ambos sistemas para reducir la carga microbiana de un extracto proteico rico en BPE, así como determinar su efecto sobre la concentración del pigmento y su capacidad antioxidante, a fin de valorar su potencial como tecnología no térmica para el procesamiento de ingredientes funcionales termolábiles destinados a matrices alimentarias.

Materiales y Métodos

Material biológico

Se utilizó un extracto proteico rico en β-ficoeritrina obtenido de la microalga *P. cruentum* y proporcionado por Microcell S.A. de C.V. La concentración inicial de BPE fue de 0.10 mg mL^{-1} y su índice de pureza fue de 2.1. El extracto sin ultrasonido se empleó como control para las evaluaciones microbiológicas, espectrofotométricas y antioxidantes.

Tratamientos de ultrasonicación

Para la ultrasonicación en baño, se colocaron 50 mL del extracto en matraces Erlenmeyer de 100 mL y se trataron en un equipo Branson 1800 (Branson Ultrasonics, Estados Unidos) a 40 kHz y 80 W durante 10, 20, 30, 40, 60, 90 y 150 min. Para la ultrasonicación por pistilo, 50 mL del extracto se trataron con un procesador Microson XL 2000 (Misonix, Estados Unidos) a 22.5 kHz y 100 W durante 10, 20, 30, 40, 50 y 60 min. Los recipientes se mantuvieron excluidos de la luz y sobre una base de hielo para limitar el incremento de temperatura. Cada tratamiento se realizó por triplicado.

Análisis microbiológico

Se prepararon diluciones seriadas de las muestras en agua destilada estéril. De cada dilución se inocularon 180 µL en cajas Petri con agar soya tripticaseína (TSA). Las placas se incubaron a 37 ± 1 °C durante 24 h y posteriormente se cuantificaron las unidades formadoras de colonias (UFC). Los resultados se expresaron como UFC mL^{-1} de muestra. La reducción microbiana se calculó respecto al control sin tratamiento.

Cuantificación de β-ficoeritrina

La BPE se cuantificó por espectrofotometría UV-Vis al término de cada tratamiento y se comparó con el control. Se registraron las absorbancias a 565, 620 y 650 nm y se aplicaron las ecuaciones de Bryant et al. (1979):

$$PC = \frac{[A_{620} - 0.72(A_{650})]}{6.29} \quad (1)$$

$$APC = \frac{[A_{650} - 0.19(A_{620})]}{5.79} \quad (2)$$

$$BPE = \frac{[A_{565} - 2.41(PC) - APC]}{12.70} \quad (3)$$

donde PC corresponde a ficocianina, APC a aloficocianina y A a la absorbancia registrada en la longitud de onda indicada. La concentración se expresó en mg mL^{-1}.

Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se determinó mediante ABTS y DPPH, de acuerdo con Martínez-Montaño et al. (2022). Para DPPH, se mezclaron 20 µL de muestra con 180 µL de una solución metanólica de DPPH a 150 µM; la mezcla se incubó 30 min a 37 °C, en oscuridad y con agitación a 50 rpm, y se leyó a 517 nm. Para ABTS, el radical se generó con ABTS 7 mM y persulfato de potasio 2.45 mM durante 16 h en oscuridad. La solución se diluyó con amortiguador de fosfatos hasta una absorbancia de 1.0–1.2 a 734 nm. Se mezclaron 7.5 µL de muestra con 292.5 µL del radical diluido, se incubó 10 min a 37 °C en oscuridad y se leyó a 734 nm. En ambos ensayos se utilizó una curva de Trólox de 0 a 250 µg mL^{-1} y los resultados se expresaron como µmol equivalentes de Trólox por gramo de extracto proteico (µmol ET g^{-1} EP).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante análisis de varianza y las medias se compararon con la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD; $\alpha = 0.05$) utilizando STATGRAPHICS Centurion XVI.I (Statpoint, Inc., Warrenton, Virginia, Estados Unidos).

Resultados y discusión

Caracterización espectrofotométrica del extracto

El espectro UV-Vis del extracto mostró una longitud de onda de máxima absorción a 545 nm, con 1.695 unidades de absorbancia (Figura 1). Este comportamiento es consistente con el perfil reportado para las ficoeritrinas de microalgas rojas y confirmó que el extracto contenía BPE como pigmento predominante (Sonani et al., 2014, 2016). La concentración inicial fue de 0.10 mg mL^{-1}, con una pureza de 2.1.

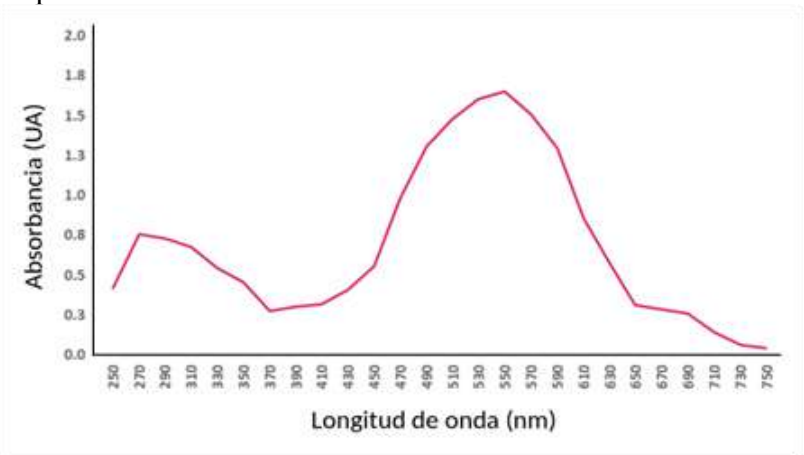


Figura 1. Espectro UV-Vis del extracto proteico rico en β-ficoeritrina. Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

Efecto del ultrasonido sobre la carga microbiana

La aplicación de ultrasonido redujo progresivamente la carga microbiana en los dos sistemas evaluados (Figura 2). La respuesta fue considerablemente más rápida con el pistilo, a los 10 min la carga disminuyó de 2957 ± 57 a 405 ± 45 UFC mL^{-1} y a los 30 min alcanzó 43 ± 12

UFC mL⁻¹, equivalente a una inactivación superior a 99 %. A los 60 min se detectaron 5 ± 0 UFC mL⁻¹. En el baño, la disminución fue más lenta, la carga pasó de 3432 ± 56 UFC mL⁻¹ en el control a 1352 ± 55 UFC mL⁻¹ a los 30 min; y a 475 ± 62 UFC mL⁻¹ a los 60 min. Para obtener una reducción superior a 99 % fue necesario prolongar el tratamiento hasta 150 min.

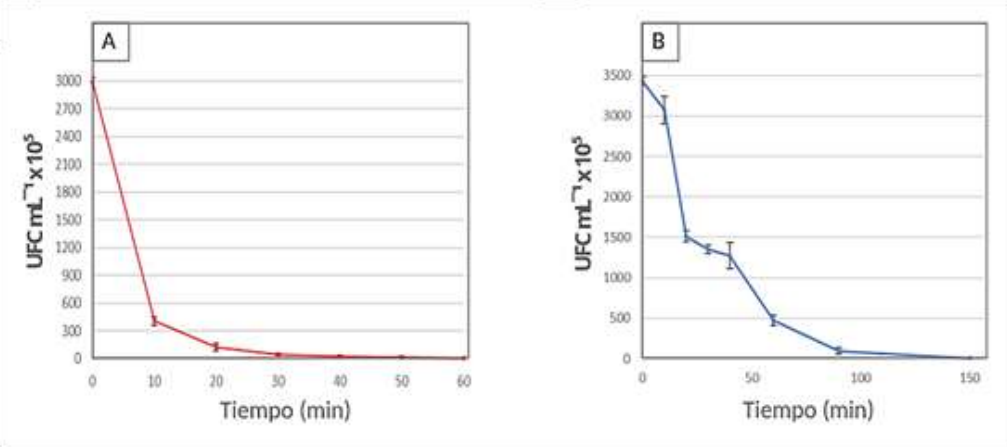


Figura 2. Disminución de la carga microbiana del extracto proteico durante la ultrasonicación. A, pistilo; B, baño ultrasónico. Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

Cuadro 1. Carga microbiana del extracto rico en BPE durante los primeros 60 min de ultrasonicación.

Tiempo de contacto (min)	Carga microbiana (UFC mL⁻¹)	
	Baño ultrasónico	Pistilo
0	3432 ± 56	2957 ± 57
10	3072 ± 172	405 ± 45
20	1513 ± 65	123 ± 40
30	1352 ± 55	43 ± 12
40	1275 ± 163	30 ± 5
60	475 ± 62	5 ± 0

Fuente: Elaboración propia. Valores expresados como media ± desviación estándar (n = 3).

La mayor eficacia del pistilo puede relacionarse con la transmisión directa de energía al extracto y con una cavitación más localizada. En contraste, durante la ultrasonicación por baño, las ondas deben atravesar el líquido del equipo y las paredes del recipiente antes de alcanzar la muestra, lo que puede generar una distribución heterogénea de la energía y zonas de menor intensidad, como fue documentado por Moholkar et al. (2000). Por su parte, Joyce et al. (2011) evaluaron un sonicador de baño a 40 kHz y uno de pistilo a 20 kHz sobre suspensiones de bacterias Gram negativas y observaron, a los 10 min, disminuciones de la carga microbiana de 20–26 % y 12–30 %, respectivamente. En el presente estudio, las reducciones obtenidas durante ese mismo tiempo fueron distintas (11–13 % y 14–16 %, respectivamente); sin embargo, los microorganismos contaminantes presentes en el extracto proteico de BPE no fueron identificados ni caracterizados, por lo que las diferencias no pueden atribuirse únicamente al tipo de equipo o a la frecuencia aplicada.

En este sentido, Chavan et al. (2022) señalaron que la resistencia a la inactivación ultrasónica varía según el tipo de microorganismo, con una tendencia general de resistencia en el orden esporas > hongos > levaduras > células vegetativas; además, las bacterias Gram positivas suelen presentar mayor resistencia que las Gram negativas y cada género puede mostrar un comportamiento particular. Esta variabilidad también permite interpretar los resultados de Muzaffar et al. (2016), quienes emplearon un baño ultrasónico a 33 kHz y obtuvieron, a los 10 min, una disminución de la carga microbiana del 13 %, similar a la observada en el presente estudio. No obstante, dicha similitud inicial no se mantuvo al prolongar el tratamiento, ya que estos autores reportaron reducciones de solo 32 y 35 % a los 40 y 60 min, mientras que en el extracto de BPE se alcanzaron disminuciones de 63 y 86 %, respectivamente. Por lo tanto, además del tipo de equipo y el tiempo de contacto, la naturaleza de los microorganismos presentes y las características particulares de la matriz condicionan la intensidad y la evolución de la respuesta microbiológica durante la ultrasonicación.

Conservación de BPE y capacidad antioxidante

El tratamiento por pistilo durante 30 min alcanzó más de 99 % de inactivación y conservó aproximadamente 70 % de la concentración inicial de BPE, asimismo, mantuvo la fluorescencia visible del extracto. Este resultado sugiere que el control de la temperatura durante la sonicación, contribuyó a limitar el deterioro térmico, aunque la cavitación y las fuerzas de cizalla pudieron inducir cambios parciales en la estructura proteica. La pérdida fue mayor cuando se prolongó el tratamiento y cuando se utilizó el baño durante tiempos largos, lo cual resalta la conveniencia de emplear el menor tiempo efectivo para alcanzar la reducción microbiana requerida.

En ambos sistemas aumentó la capacidad antioxidante medida por ABTS y DPPH (Figuras 3 y 4). Con pistilo, los valores máximos a 60 min fueron 660.404 ± 40.562 μmol ET g^{-1} EP mediante ABTS y 107.281 ± 9.010 μmol ET g^{-1} EP mediante DPPH, lo que representó incrementos de 235 % y 380 %, respectivamente, frente al extracto sin ultrasonido. De manera semejante, con el baño ultrasónico a 150 min se obtuvieron 537.110 ± 43.873 μmol ET g^{-1} EP por ABTS y 105.618 ± 4.264 μmol ET g^{-1} EP por DPPH; estos valores correspondieron a incrementos de 185 % y 456 %, respectivamente. Así, aunque ambos tratamientos potenciaron la respuesta antioxidante, el pistilo permitió alcanzar valores elevados en un tiempo considerablemente menor. Este comportamiento coincide parcialmente con lo reportado por Muzaffar et al. (2016), quienes observaron un incremento de la capacidad antioxidante en frutos frescos de cereza conforme aumentó el tiempo de ultrasonicación. No obstante, a los 60 min registraron una disminución de esta actividad, lo que atribuyeron al posible daño ocasionado por una exposición prolongada a las ondas ultrasónicas, incluida la disrupción celular y la degradación de algunos compuestos bioactivos. En contraste, en el extracto proteico rico en BPE, la capacidad antioxidante mantuvo una tendencia ascendente durante los tiempos evaluados, tanto con pistilo como con baño ultrasónico. Estas diferencias sugieren que la respuesta al ultrasonido depende de la naturaleza de la matriz, de los compuestos bioactivos presentes y de las condiciones específicas del tratamiento.

Además, el incremento de la respuesta antioxidante no implica necesariamente una mayor cantidad de BPE intacta. La cavitación puede favorecer la exposición de aminoácidos y grupos funcionales capaces de donar electrones o hidrógeno, promover una fragmentación parcial de la proteína o modificar las interacciones intramoleculares, con lo cual aumentaría la accesibilidad de los sitios reactivos. Fenómenos semejantes han sido descritos en proteínas y extractos bioactivos tratados con ultrasonido (Kumar et al., 2021). La diferencia entre ABTS y

DPPH también es esperable, ya que ambos ensayos presentan distinta sensibilidad frente a compuestos de diferente polaridad y a los grupos antioxidantes expuestos.

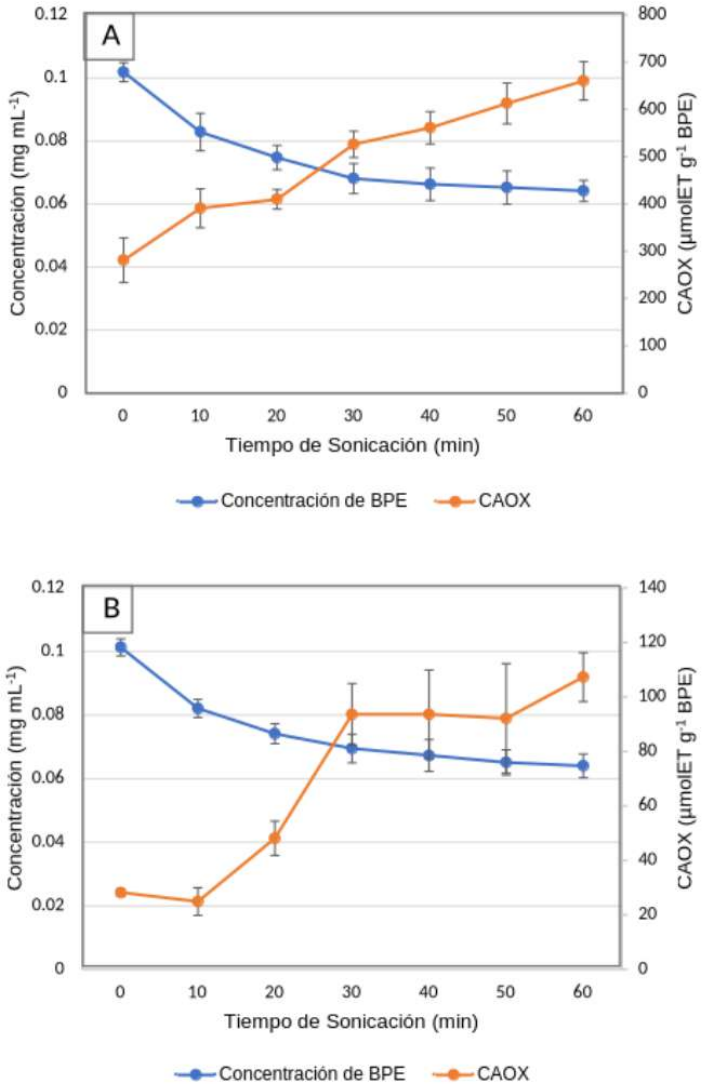


Figura 3. Efecto de la ultrasonicación por pistilo sobre la concentración de BPE y la capacidad antioxidante. A, ABTS; B, DPPH. Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

Desde una perspectiva integral, Muzaffar et al. (2016) alcanzaron mayores incrementos de CAOX mediante ABTS en un menor tiempo de ultrasonicación; sin embargo, como se señaló anteriormente, obtuvieron una menor reducción microbiana que la observada en el presente estudio durante los mismos tiempos de exposición. Esta comparación pone de manifiesto que la eficacia del tratamiento no debe valorarse únicamente por su capacidad para potenciar la actividad antioxidante, sino por el equilibrio entre la inactivación microbiana y la conservación o mejora de la funcionalidad del compuesto.

En este sentido, considerando conjuntamente el tiempo de procesamiento, la reducción microbiana y la conservación funcional, el tratamiento con pistilo durante 30 min mostró el

desempeño más equilibrado, al alcanzar más de 99 % de inactivación y conservar aproximadamente 70 % de la BPE y su fluorescencia característica. Aunque la prolongación del tratamiento hasta 60 min produjo los valores más altos de capacidad antioxidante y redujo aún más la carga microbiana, hasta un recuento residual de 5 UFC, también disminuyó la fluorescencia del extracto y la retención de BPE descendió a cerca del 60 %, además de representar el doble de tiempo de procesamiento. Por ello, la selección del tiempo óptimo debe responder al equilibrio entre inocuidad microbiológica, conservación del compuesto bioactivo y funcionalidad antioxidante, y no exclusivamente a la maximización de uno de estos parámetros.

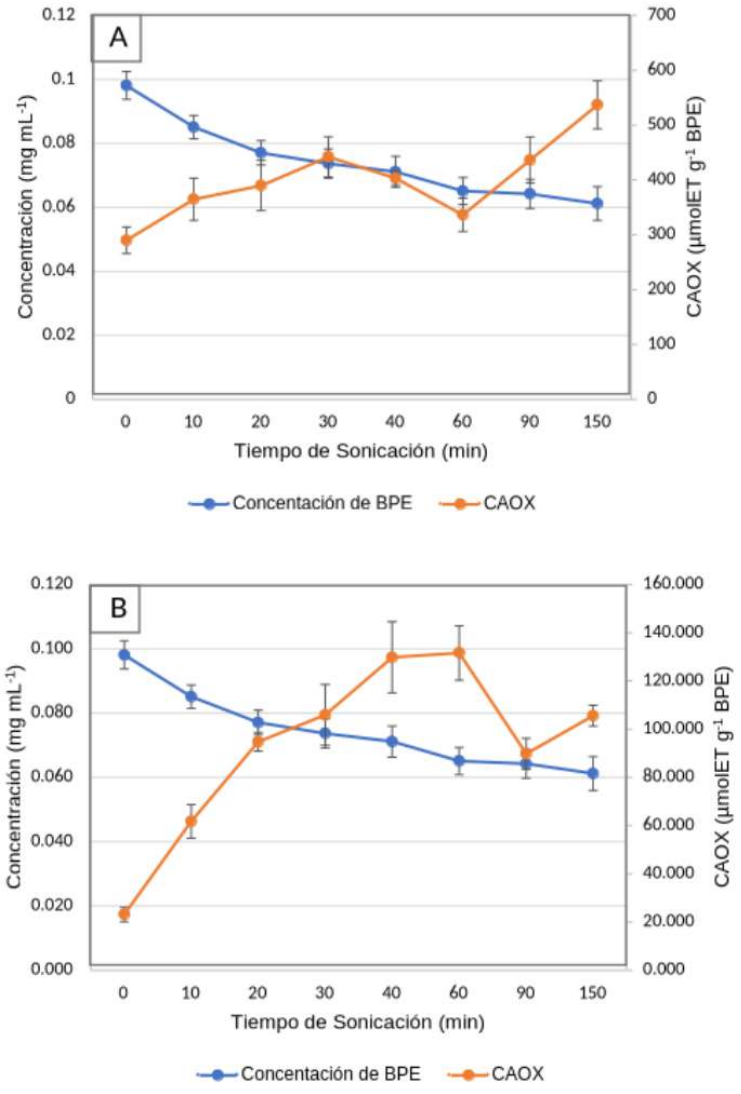


Figura 4. Efecto de la ultrasonicación en baño sobre la concentración de BPE y la capacidad antioxidante. A, ABTS; B, DPPH. Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

No obstante, para su posible aplicación industrial deberán controlarse parámetros como la amplitud, la densidad de energía, la temperatura y la geometría del sistema, además de validar su eficacia frente a microorganismos definidos y en matrices alimentarias o farmacéuticas reales. Aunque se alcanzó una reducción superior al 99 % de la carga microbiana cultivable

inicial, este resultado corresponde a una elevada descontaminación y no a la ausencia total de microorganismos viables. La demostración de esterilidad o esterilidad comercial requerirá ensayos adicionales con microorganismos resistentes, validaciones microbiológicas específicas y estudios de vida útil.

Conclusiones

La ultrasonicación redujo eficazmente la carga microbiana del extracto proteico rico en β-ficoeritrina. El sistema de pistilo fue más eficiente que el baño ultrasónico, al alcanzar una inactivación superior al 99 % en 30 min, mientras que el baño requirió 150 min para lograr una reducción equivalente. A los 30 min, el tratamiento con pistilo conservó aproximadamente el 70 % de la BPE y mantuvo su fluorescencia característica, por lo que se seleccionó como la condición más adecuada entre las evaluadas, considerando el tiempo de procesamiento, la reducción microbiana y la conservación del pigmento. Ambos sistemas incrementaron la capacidad antioxidante durante los tiempos evaluados. Los aumentos máximos fueron de 235 % por ABTS y 380 % por DPPH con pistilo, y de 185 % y 456 %, respectivamente, con baño ultrasónico. En conjunto, los resultados sustentan el potencial de la ultrasonicación con pistilo como tecnología no térmica para la descontaminación microbiana de extractos proteicos termolábiles destinados a aplicaciones alimentarias o farmacéuticas. Su implementación requerirá optimizar los parámetros de operación de acuerdo con la matriz, el microorganismo objetivo y el uso final del producto.

Literatura Citada

Bhargava, N., Mor, R. S., Kumar, K., & Sharanagat, V. S. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70: 105293. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293

Bryant, D. A., Guglielmi, G., Tandeau de Marsac, N., Castets, A. M., & Cohen-Bazire, G. (1979). The structure of cyanobacterial phycobilisomes: A model. *Archives of Microbiology*, 123(2): 113–127. https://doi.org/10.1007/BF00446810

Chavan, P., Sharma, P., Sharma, S. R., Mittal, T. C., & Jaiswal, A. K. (2022). Application of high-intensity ultrasound to improve food processing efficiency: A review. *Foods*, 11(1): 122. https://doi.org/10.3390/foods11010122

Joyce, E., Al-Hashimi, A., & Mason, T. J. (2011). Assessing the effect of different ultrasonic frequencies on bacterial viability using flow cytometry. *Journal of Applied Microbiology*, 110(4): 862–870. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.04923.x

Kovaleski, G., Kholany, M., Dias, L. M. S., Correia, S. F. H., Ferreira, R. A. S., Coutinho, J. A. P., & Ventura, S. P. M. (2022). Extraction and purification of phycobiliproteins from algae and their applications. *Frontiers in Chemistry*, 10: 1065355. https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1065355

Kumar, K., Srivastav, S., & Sharanagat, V. S. (2021). Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70: 105325. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325

Martínez-Montaño, E., Sarmiento-Machado, R. S., Osuna-Ruíz, I., Benítez-García, I., Pacheco-Aguilar, R., Navarro-Peraza, R. S., Lugo-Sánchez, M. E., Valdez-Ortiz, A., Germán-Báez, L. J., Bañuelos-Vargas, I., Rodríguez-Tirado, V. A., & Salazar-Leyva, J. A. (2022). Effect of degree of hydrolysis on biochemical properties and biological activities of protein hydrolysates from Pacific thread herring stickwater. *Waste and Biomass Valorization*, 13: 1015–1027. https://doi.org/10.1007/s12649-021-01590-z

Moholkar, V. S., Sable, S. P., & Pandit, A. B. (2000). Mapping the cavitation intensity in an ultrasonic bath using acoustic emission. *AIChE Journal*, 46(4): 684–694. https://doi.org/10.1002/aic.690460404

Muzaffar, S., Ahmad, M., Wani, S. M., Gani, A., Baba, W. N., Shah, U., Khan, A. A., Masoodi, F. A., Gani, A., & Wani, T. A. (2016). Ultrasound treatment: Effect on physicochemical, microbial and antioxidant properties of cherry (*Prunus avium*). *Journal of Food Science and Technology, 53*(6): 2752–2759. https://doi.org/10.1007/s13197-016-2247-3

Ramos-Frometa, C., & Gómez-Luna, L. M. (2024). Cultivo y aplicaciones de Porphyridium cruentum: Principales tendencias y proyecciones. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 26(1): e108815. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v26n1.108815

Sonani, R. R., Rastogi, R. P., Patel, R., & Madamwar, D. (2016). Recent advances in production, purification and applications of phycobiliproteins. *World Journal of Biological Chemistry*, 7(1): 100–109. https://doi.org/10.4331/wjbc.v7.i1.100

Sonani, R. R., Singh, N. K., Awasthi, A., Prasad, B., Kumar, J., & Madamwar, D. (2014). Phycoerythrin extends life span and health span of Caenorhabditis elegans. *AGE*, 36: 9717. https://doi.org/10.1007/s11357-014-9717-1

Wang, J., Qin, S., Lin, J., Wang, Q., Li, W., & Gao, Y. (2023). Phycobiliproteins from microalgae: Research progress in sustainable production and extraction processes. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16: 170. https://doi.org/10.1186/s13068-023-02387-z

Estimación de la evapotranspiración del cultivo de ajo (Allium sativum L.) mediante aprendizaje automático

David Vargas Cano[1], Miguel Servin Palestina[2], Orlando Ramírez Valle[3], Sergio Iván Jiménez Jiménez[4]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La programación eficiente del riego en el ajo (*Allium sativum* L. var. Mármol Blanco) requiere estimaciones precisas de la evapotranspiración real del cultivo (*ETc*), variable que el enfoque tradicional FAO-56 (*Kc·ETo*) suele reproducir de forma imprecisa cuando los coeficientes de cultivo tabulados no reflejan las condiciones locales de manejo y clima. En este estudio se midió la ETc real mediante un sistema Eddy Covariance LI-COR (LI-7500DS) y se combinó con datos de una estación meteorológica automática y el índice de vegetación NDVI, interpolado diariamente a partir de imágenes satelitales, para entrenar y comparar cuatro modelos: un modelo base Kc·ETo, una regresión lineal múltiple, Random Forest y XGBoost. Se evaluaron dos enfoques de selección de variables: un Modelo Completo (MC), que incluyó las 14 variables predictoras disponibles, y un Modelo Filtrado (MF), restringido a las 9 variables con correlación de Pearson absoluta ≥0.5 respecto a la ETc observada. En el conjunto de prueba (n=189 días), XGBoost fue el modelo más preciso en ambos enfoques (MC: R^2=0.855, RMSE=0.890 mm/día; MF: R^2=0.866, RMSE=0.855 mm/día), y el modelo MF superó consistentemente al MC en los tres algoritmos de aprendizaje automático, con la mejora más notable en la regresión lineal (R^2 de 0.811 a 0.852). Se proporciona una ecuación empírica de regresión lineal múltiple aplicable en campo formada con las 3 variables más importantes detectada con Random Forest.

Palabras clave: Evapotranspiración, ajo, aprendizaje automático, Eddy Covariance, NDVI.

Abstract

Efficient irrigation scheduling in garlic (*Allium sativum* L. var. Mármol Blanco) requires accurate estimates of actual crop evapotranspiration (*ETc*), a variable that the traditional FAO-56 approach (*Kc·ETo*) often reproduces imprecisely when tabulated crop coefficients do not reflect local management and climatic conditions. In this study, actual *ETc* was measured using a LI-COR Eddy Covariance system (LI-7500DS) and combined with data from an automatic weather station and the NDVI vegetation index, interpolated daily from satellite imagery, to train and compare four models: a *Kc·ETo* baseline model, multiple linear regression, Random Forest, and XGBoost.

[1]Universidad Autónoma de Zacatecas. Avda. Ramón López Velarde, 801. Zacatecas, México.
[2]Campo Experimental Zacatecas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, 98500 Calera de Víctor Rosales, Km 24.5 carretera Zacatecas-Fresnillo, México.
[3] INIFAP-CESICH. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México. C. P. 31500.
[4]INIFAP-CENID RASPA. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Durango. Mexico. d.v.c.cano@gmail.com, servin.miguel@inifap.gob.mx, ramirez.orlando@inifap.gob.mx, jimenez.sergio@inifap.gob.mx

Two variable selection approaches were evaluated: a Complete Model (MC), which included all 14 available predictor variables, and a Filtered Model (MF), restricted to the 9 variables with an absolute Pearson correlation ≥0.5 with respect to the observed ETc. On the test set (n=189 days), XGBoost was the most accurate model under both approaches (MC: R^2=0.855, RMSE=0.890 mm/day; MF: R^2=0.866, RMSE=0.855 mm/day), and the MF consistently outperformed the MC across all three machine learning algorithms, with the most notable improvement in linear regression (R^2 from 0.811 to 0.852). An empirical multiple linear regression equation applicable under field conditions, constructed using the 3 most important variables identified by Random Forest, is provided.

Keywords: Evapotranspiration, garlic, machine learning, Eddy Covariance, NDVI.

Introducción

La evapotranspiración del cultivo (ETc) es un componente clave del balance hídrico en la agricultura de riego, ya que determina las necesidades hídricas de los cultivos y permite programar el riego de manera eficiente (Allen et al., 1998; Doorenbos & Pruitt, 1977). Una estimación precisa de la ETc es fundamental para optimizar el uso del agua, especialmente en regiones con escasez hídrica y en cultivos de alto valor económico como el ajo (Allium sativum L.) (Fereres & Soriano, 2007; Pereira et al., 2015).

El método ampliamente recomendado para estimar la ETc es el enfoque de dos pasos de la FAO-56, que combina la evapotranspiración de referencia (ETo) con coeficientes de cultivo (Kc) específicos para cada especie y etapa fenológica (Allen et al., 1998). Sin embargo, los valores de Kc tabulados a menudo no reflejan las condiciones locales de clima, variedad, manejo del riego y estrés hídrico, lo que puede conducir a errores significativos (Paredes et al., 2014). En particular, para el ajo se dispone de pocos estudios que hayan determinado Kc locales mediante lisímetros o sistemas Eddy Covariance (Villalobos et al., 2000; Hanson & May, 2005).

En las últimas décadas, los modelos de aprendizaje automático (Machine Learning, ML) han surgido como herramientas alternativas para la estimación de la Evapotranspiración de referencia (ETo) y la ETc ya que pueden capturar relaciones no lineales e interacciones complejas entre variables climáticas y el cultivo sin necesidad de asumir una forma funcional predefinida [CITA: Cervantes et al., 2013; Ehteram et al., 2019; Granata et al., 2020). Entre los modelos ML más utilizados se encuentran las redes neuronales artificiales (ANN), Random Forest (RF), Support Vector Regression (SVR) y, más recientemente, XGBoost (Extreme Gradient Boosting) (Chen & Guestrin, 2016; Zhang et al., 2021). Estos métodos han mostrado un rendimiento superior al de modelos empíricos tradicionales (Kisi, 2014; Fan et al., 2018; Elbeltagi et al., 2020).

El sistema Eddy Covariance (EC) constituye el estándar de referencia para la medición directa de flujos turbulentos de calor latente en superficies vegetadas, al no depender de coeficientes empíricos ni de supuestos sobre la partición energética del cultivo (Aubinet et al., 2012). Su uso como variable de entrenamiento permite evaluar objetivamente si los modelos ML capturan la respuesta real del cultivo, en lugar de simplemente reproducir la ETo de referencia. Paralelamente, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), obtenido por sensores remotos, funciona como un sustituto dinámico del desarrollo del dosel vegetal y guarda una relación fisiológica directa con el coeficiente de cultivo Kc, ya que ambos reflejan la fracción de cobertura vegetal y la capacidad transpirativa del cultivo a lo largo del ciclo fenológico (Bausch & Neale, 1987; Glenn et al., 2010).

Sin embargo, en el cultivo del ajo, las aplicaciones de ML para estimar ETc a partir de datos meteorológicos y de riego son todavía escasas. Además, la mayoría de los estudios previos utilizan un número elevado de variables predictoras, sin un análisis previo de correlación que permita seleccionar las más relevantes, lo que puede introducir ruido y multicolinealidad (Kuhn & Johnson, 2019). La selección de variables no solo mejora la interpretabilidad del modelo, sino que también puede aumentar su precisión y reducir el sobreajuste (Guyon & Elisseeff, 2003).En este contexto, el objetivo del presente estudio fue: (1) evaluar el rendimiento de cuatro modelos (regresión lineal múltiple, Random Forest, XGBoost y un modelo base basado en Kc·ETo con Kc estándar) para estimar la ETc del ajo utilizando datos de una estación meteorológica automática, un sistema Eddy Covariance y NDVI satelital; (2) comparar explícitamente dos estrategias de selección de variable; un Modelo Completo (MC), que emplea la totalidad de las 14 variables predictoras disponibles (climáticas, de manejo y NDVI), frente a un Modelo Filtrado (MF), que retiene únicamente las variables con correlación absoluta de Pearson $|r| \geq 0.5$ respecto a la ETc observada; (3) comparar la precisión de ambos enfoques mediante las métricas R^2, RMSE, MAE y MAPE; y (4) proporcionar una fórmula empírica simple, derivada de la regresión lineal múltiple del modelo MF, que pueda ser utilizada por agricultores y técnicos en la región de estudio.

Materiales y métodos

Sitio de estudio y periodo experimental

El estudio se llevó a cabo en una parcela demostrativa de ajo (*Allium sativum* L., var. Mármol Blanco) ubicado en el Campo Experimental Zacatecas (CEZAC) perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agricolas y Pecuarias (INIFAP), durante el ciclo de cultivo comprendido entre el (02/10/2025 y el 18/05/2026). El clima de la zona es seco y semiseco, con una precipitación media anual de 416 mm y una temperatura media anual de 14.6 °C. El suelo se clasifica como Franco-Arcilloso con una capacidad de campo de 28.37 %. El riego se aplicó mediante un sistema de goteo, reponiendo el 100 % de la ETc estimada diariamente con ajustes semanales basados en la humedad del suelo medida con sondas. El periodo de estudio abarcó desde los 19 días después de la siembra (DDS) hasta la cosecha, con un total de 189 días con datos válidos tras el control de calidad (eliminación de valores atípicos y periodos con lluvia intensa o datos faltantes).

Datos meteorológicos y de ETc observada

Se utilizaron datos de una estación meteorológica automática (estación de la red del INIFAP). Las variables a escala diaria fueron: temperatura máxima, mínima y media del aire (Tmax, Tmin, Tmed, °C); humedad relativa máxima, mínima y media (Hmax, Hmin, Hmed, %); velocidad del viento máxima y media (Vmax, Vmed, m s^{-1}); radiación solar acumulada (Rad, W m^{-2}); precipitación (Pre, mm); y evapotranspiración de referencia (ETo, mm $día^{-1}$), calculada según la ecuación de FAO Penman-Monteith a partir de los datos horarios.

La evapotranspiración real del cultivo (ETc observada) se midió mediante un sistema Eddy Covariance (LI-7500DS, SmartFlux 3, LI-COR, USA), instalado a una altura de 3 m sobre el suelo (Figura 1). La ETc se obtuvieron cada 30 minutos y se integraron a escala diaria, además, se registraron diariamente los milímetros de riego aplicado (Riego, mm) y los días después de la siembra (DDS). El índice NDVI se obtuvo con la herramienta VICAL del INIFAP CENID-RASPA (Jiménez-Jiménez et al., 2022) y se interpoló linealmente para generar valores diarios continuos, cubriendo el ciclo completo del cultivo desde la emergencia hasta la senescencia foliar.



Figura 1. Estación Eddy Covariance LI-7500DS, SmartFlux 3 instalada en el cultivo de ajo

Análisis de correlación y selección de variables

Se construyó una matriz de correlación de Pearson entre las 14 variables predictoras disponibles (*DDS, Riego, NDVI, Tmax, Tmin, Tmed, Pre, Hmax, Hmin, Hmed, Rad, Vmax, Vmed, Eto*) y la *ETc* observada. A partir de esta matriz se definieron los dos enfoques de modelado comparados en este trabajo (MC y MF).

Las variables retenidas en el MF fueron *DDS* (r=0.816), Eto (r=0.809), *NDVI* (r=0.801), *Rad* (r=0.791), *Tmed* (r=0.690), *Tmax* (r=0.640), *Hmin* (r=−0.543), *Hmax* (r=−0.590) y *Hmed* (r=−0.629); en total 9 variables. Las variables excluidas del MF por no alcanzar el umbral fueron *Vmax* (r=0.486), *Vmed* (r=0.461), *Tmin* (r=0.449), *Riego* (r=0.171) y *Pre* (r=−0.158).

Modelo base (Kc teórico)

Como referencia tradicional, se estimó la *ETc* mediante el producto de la *ETo* y un coeficiente de cultivo (*Kc*) teórico para ajo obtenido de la literatura FAO-56 (Allen et al., 1998; Villalobos et al., 2004) y ajustado por fases fenológicas, según la función definida por tramos con *DDS* (Ecuación 1).

$$\mathrm{Kc} = \begin{cases} 0.5, & \mathrm{DDS} \leq 20; \\ 1.0, & 20 < \mathrm{DDS} \leq 160 \\ 1.2, & 160 < \mathrm{DDS} \leq 190 \\ 1.0, & \mathrm{DDS} \geq 190 \end{cases} \quad (1)$$

Este modelo base se evaluó en el mismo conjunto de prueba que los modelos ML, sin necesidad de entrenamiento, y es idéntico para los enfoques MC y MF ya que no depende de las variables seleccionadas.

Modelos de aprendizaje automático

Se implementaron tres modelos de aprendizaje automático para la estimación de la evapotranspiración del cultivo: regresión lineal múltiple (RLM), Random Forest (RF) y Extreme Gradient Boosting (XGBoost). La RLM se utilizó como modelo paramétrico de referencia, empleando las variables predictoras correspondientes a cada enfoque (14 variables para MC y 9 para MF), sin términos de interacción ni polinómicos, mediante la biblioteca scikit-learn (Pedregosa et al., 2011). El modelo RF se configuró con 200 árboles de decisión, una profundidad máxima de 10, un mínimo de 2 muestras para dividir un nodo y 1 muestra por hoja. Por su parte, XGBoost se implementó con 300 estimadores, una profundidad máxima de 5, una

tasa de aprendizaje de 0.1, un factor de muestreo de observaciones de 0.8 y un factor de muestreo de variables por árbol de 0.8, utilizando el error cuadrático como función objetivo y la biblioteca XGBoost (Chen & Guestrin, 2016).
Dado que los árboles de decisión (RF y XGBoost) son invariantes a la escala de las variables, no se aplicó estandarización; para la regresión lineal tampoco fue necesario al trabajar con unidades originales. Todos los modelos se entrenaron con el 70 % de los datos y se evaluaron en el 30 % restante, aplicando idéntica partición a ambos enfoques (MC y MF) para garantizar la comparabilidad directa de resultados.
El rendimiento de los modelos se cuantificó mediante: coeficiente de determinación (R^2), que mide la proporción de varianza explicada; raíz del error cuadrático medio (RMSE, mm día^{-1}), que penaliza errores grandes; error absoluto medio (MAE, mm día^{-1}); y error porcentual absoluto medio (MAPE, %), útil para comparar entre estudios. Para el modelo Random Forest se extrajo la importancia de cada variable basada en la reducción media de impureza (*Gini importance*). Se generaron gráficos de dispersión de valores observados vs. estimados, gráficos de residuos y un análisis de series temporales para los primeros 50 puntos del conjunto de prueba.
Todos los análisis se realizaron en Python 3.10, utilizando las librerías *pandas* y *numpy* para manejo de datos, *scikit-learn* para regresión lineal, Random Forest y partición de datos, xgboost para el modelo XGBoost, y matplotlib/*seaborn* para los gráficos.

Resultados y discusión

Análisis de correlación y selección de variables

El análisis de correlación de Pearson (Figura 2) permitió identificar nueve variables con una asociación lineal absoluta igual o superior a 0.5 con la ETc observada: DDS (r = 0.816), ETo (r = 0.809), NDVI (r = 0.801), radiación solar (r = 0.791), temperatura media (r = 0.690), temperatura máxima (r = 0.640), humedad relativa mínima (r = −0.543), humedad relativa máxima (r = −0.590) y humedad relativa media (r = −0.629). Por el contrario, la velocidad máxima y media del viento, la temperatura mínima, el riego y la precipitación presentaron correlaciones inferiores al umbral establecido y fueron excluidas del Modelo Filtrado (MF).
La alta correlación de DDS refleja el papel del desarrollo fenológico en la demanda hídrica del ajo, consistente con estudios en otros cultivos (Hanson & May, 2005; Villalobos et al., 2004). La fuerte asociación de ETo y Rad con ETc era esperable, ya que la ETo integra los efectos combinados de radiación, temperatura y viento (Allen et al., 1998). Las correlaciones negativas de la humedad relativa se explican por su efecto inverso sobre el déficit de presión de vapor (VPD), que impulsa la transpiración foliar: en condiciones de baja humedad relativa (VPD alto), el gradiente de presión de vapor entre la hoja y el aire aumenta, incrementando la tasa transpiratoria hasta el punto en que puede inducirse cierre estomático parcial como mecanismo de protección hídrica (Pereira et al., 2015). La baja correlación del riego (r=0.17) y la precipitación (r=−0.16) sugiere que el cultivo no sufrió estrés hídrico significativo durante el ciclo, lo cual es coherente con el manejo de riego por goteo que reponía el 100 % de la ETc estimada, y explica por qué estas variables aportan poca información marginal una vez que ETo y NDVI ya están presentes en el modelo.

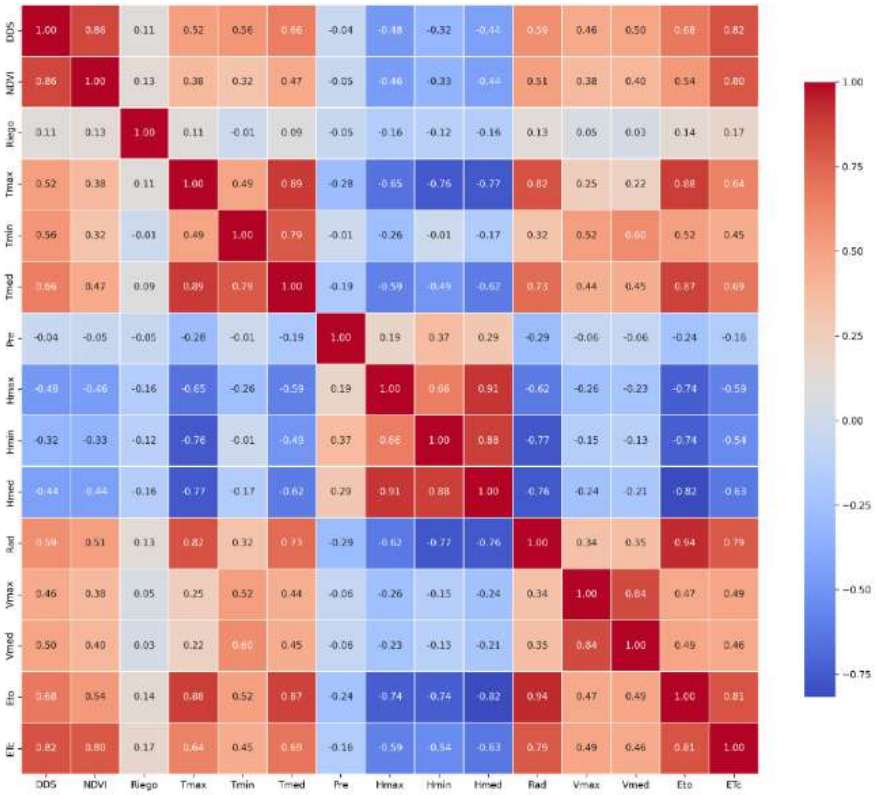


Figura 2. Matriz de correlación de Pearson con todas las variables

La matriz de correlación completa (Figura 2) revela colinealidad fuerte entre varios predictores independientemente de su relación con la ETc: Rad–Eto (r=0.94), Tmax–Rad (r=0.82), DDS–NDVI (r=0.86) y Hmax–Hmed (r=0.91). Esto implica que la selección mediante el criterio $|r| \geq 0.5$ no elimina la multicolinealidad entre predictores, un punto que se retoma más adelante al interpretar los coeficientes de la regresión lineal.

Desempeño del modelo completo

En el enfoque MC (Figura 3), XGBoost fue el modelo más preciso (R^2=0.855, RMSE=0.890 mm/día), seguido de Random Forest (R^2=0.825) y la regresión lineal múltiple (R^2=0.811). Un resultado notable es que, pese a tener el R^2 más bajo de los tres modelos ML (Cuadro 1), la regresión lineal presentó el menor MAPE (15.93 %), por debajo de Random Forest (16.88 %) y XGBoost (16.28 %); esto sugiere que la RLM produce errores relativos más consistentes a lo largo del rango de ETc, aunque con mayor varianza absoluta en valores extremos. El modelo base Kc·ETo mostró el desempeño más pobre en las cuatro métricas (R^2=0.745, MAPE=24.92 %), evidenciando que los coeficientes de cultivo tabulados no son directamente transferibles a las condiciones locales de esta parcela. En un problema como la estimación de ETc, la respuesta del cultivo ante cambios en la demanda atmosférica no necesariamente sigue una relación lineal simple, debido a la interacción entre el desarrollo del dosel, la radiación, la temperatura y la humedad atmosférica. Los modelos de ensamble basados en árboles han mostrado utilidad en problemas de estimación de evapotranspiración debido a su capacidad para capturar relaciones complejas entre variables meteorológicas y la respuesta evapotranspirativa (Fan et al., 2018; Elbeltagi et al., 2020).

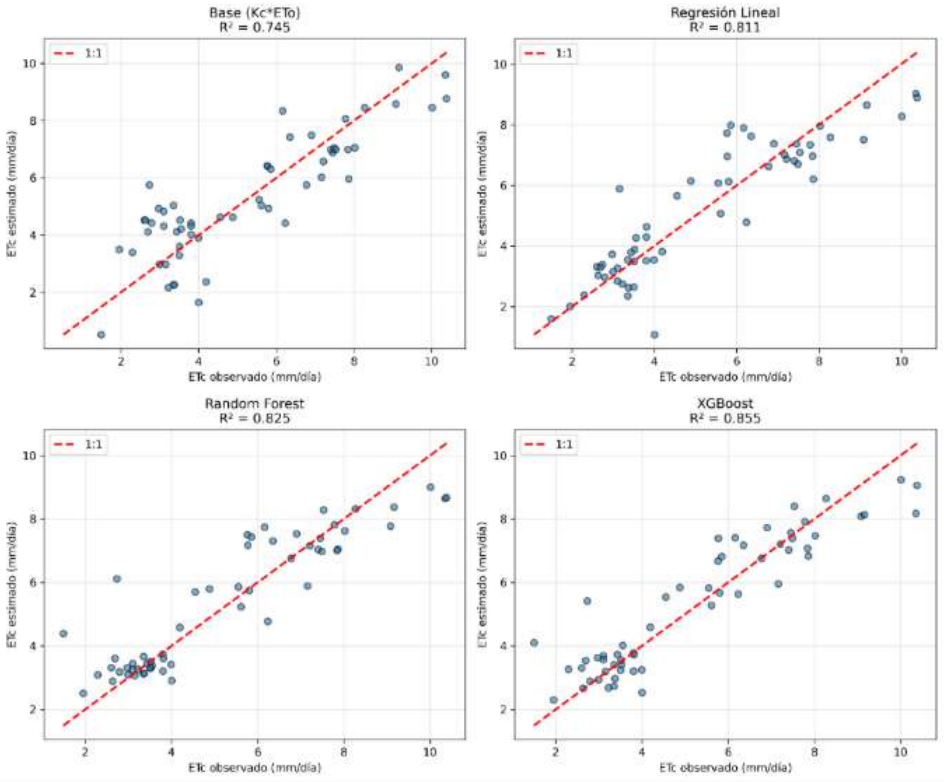


Figura 3. Dispersión de todos los modelos con variables completas en el conjunto de prueba.

Cuadro 1. Métricas de desempeño del Modelo Completo (MC, 14 variables) en el conjunto de prueba.

Modelo	R^2	RMSE (mm/día)	MAE (mm/día)	MAPE (%)
XGBoost	0.8545	0.8898	0.6613	16.28
Random Forest	0.8253	0.9749	0.6856	16.88
Regresión Lineal	0.8114	1.0130	0.7687	15.93
Base (Kc·ETo)	0.7446	1.1789	0.9710	24.92

Rendimiento del Modelo Filtrado (MF)

En el enfoque MF (Figura 4), XGBoost se mantuvo como el modelo más preciso (R^2=0.866, RMSE=0.855 mm/día), pero la regresión lineal múltiple alcanzó (R^2=0.852), superando a Random Forest (R^2=0.837). Nuevamente, la regresión lineal obtuvo el menor MAPE del conjunto (14.40 %), reforzando el patrón observado en el MC (Cuadro 2). Sin embargo, estos resultados no deben interpretarse como evidencia de que las variables excluidas sean fisiológicamente irrelevantes. El criterio de Pearson identifica únicamente asociaciones lineales individuales con la variable objetivo. Por lo tanto, una variable con baja correlación lineal puede conservar información útil mediante relaciones no lineales o interacciones con otros predictores. Esta consideración es especialmente relevante para variables como velocidad del viento, precipitación y riego, cuya influencia sobre la ETc puede depender de las condiciones ambientales y del estado hídrico del suelo.

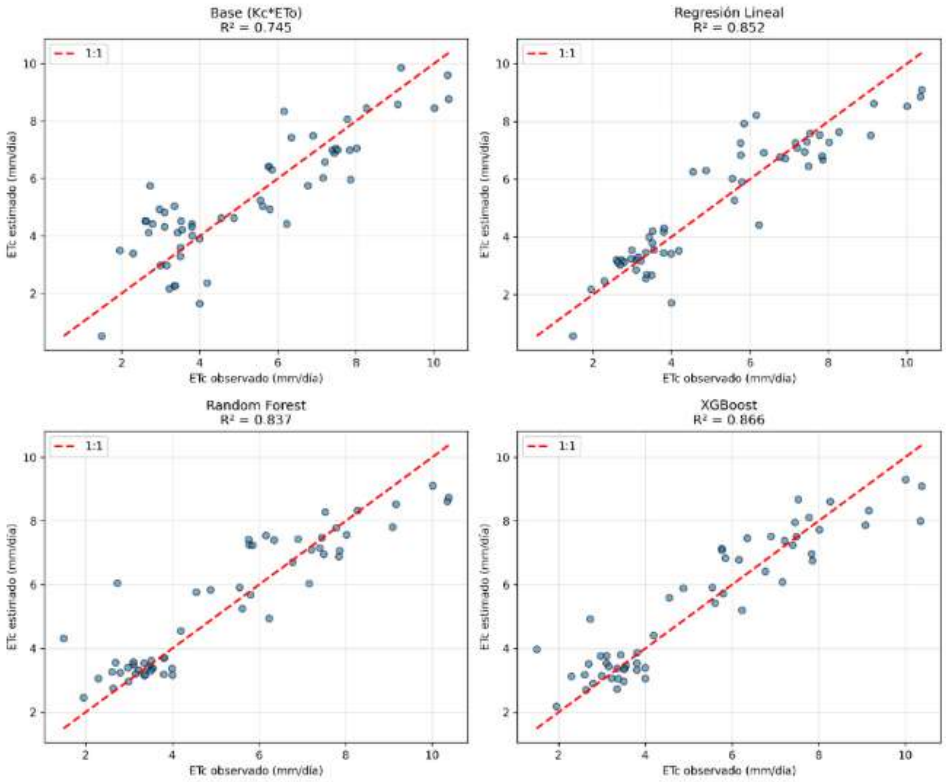


Figura 4. Dispersión de todos los modelos con variables filtradas en el conjunto de prueba.

En consecuencia, el principal resultado de este análisis es que el filtrado aplicado fue efectivo para este conjunto de datos y bajo las condiciones experimentales estudiadas, pero no debe considerarse como un procedimiento universal para eliminar variables en futuros experimentos. La selección de variables podría fortalecerse mediante métodos adicionales, como eliminación recursiva de variables, importancia por permutación, regularización o métodos basados en información mutua (Guyon & Elisseeff, 2003; Kuhn & Johnson, 2019).

Cuadro 2. Métricas de desempeño del Modelo Filtrado (MF, 9 variables, $|r| \geq 0.5$) en el conjunto de prueba.

Modelo	R^2	RMSE (mm/día)	MAE (mm/día)	MAPE (%)
XGBoost	0.8657	0.8548	0.6512	15.56
Regresión Lineal	0.8515	0.8988	0.6851	14.40
Random Forest	0.8369	0.9422	0.6653	16.41
Base (Kc·ETo)	0.7446	1.1789	0.9710	24.92

Análisis de residuos y comportamiento de los errores

En ambos enfoques (MC y MF), la regresión lineal exhibe un patrón de subestimación sistemática en el rango medio-alto de ETc, mientras que Random Forest y XGBoost muestran residuos mejor centrados en torno a cero (Figura 5). La ausencia de un patrón sistemático claro en los residuos de RF y XGBoost indica que estos modelos capturan adecuadamente la relación funcional entre los predictores y la ETc sin sesgos direccionales evidentes (Kuhn & Johnson, 2019), aunque la presencia de residuos elevados en días puntuales sugiere la necesidad de un

control de calidad más riguroso o la inclusión de variables adicionales como la humedad del suelo.

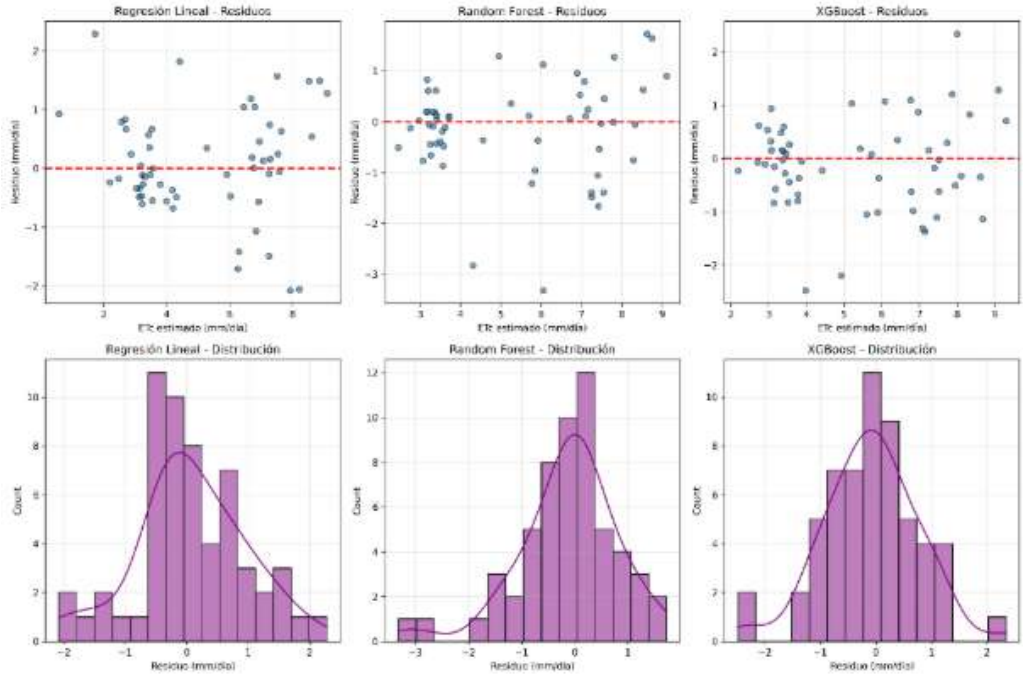


Figura 5. Residuos de los modelos con variables filtradas.

Importancia de variables, multicolinealidad y ecuación de regresión lineal

En Random Forest, el ranking de importancia de variables es prácticamente idéntico entre el MC y el MF: *Eto* domina con una importancia relativa de ≈ 0.59, seguida de *DDS* (≈ 0.15), *NDVI* (≈ 0.10) y *Rad* (≈ 0.08); el resto de las variables climáticas aporta una importancia marginal individual inferior a 0.03 (Figura 6). Este resultado es fisiológicamente coherente: *ETo* integra la demanda evaporativa atmosférica (radiación, temperatura, viento y humedad combinados), *DDS* refleja el desarrollo fenológico del cultivo y su senescencia, y *NDVI* aporta información directa sobre la cobertura vegetal activa, complementando a *ETo* con una señal específica del estado del cultivo que no está contenida en las variables puramente meteorológicas (Allen et al., 1998).

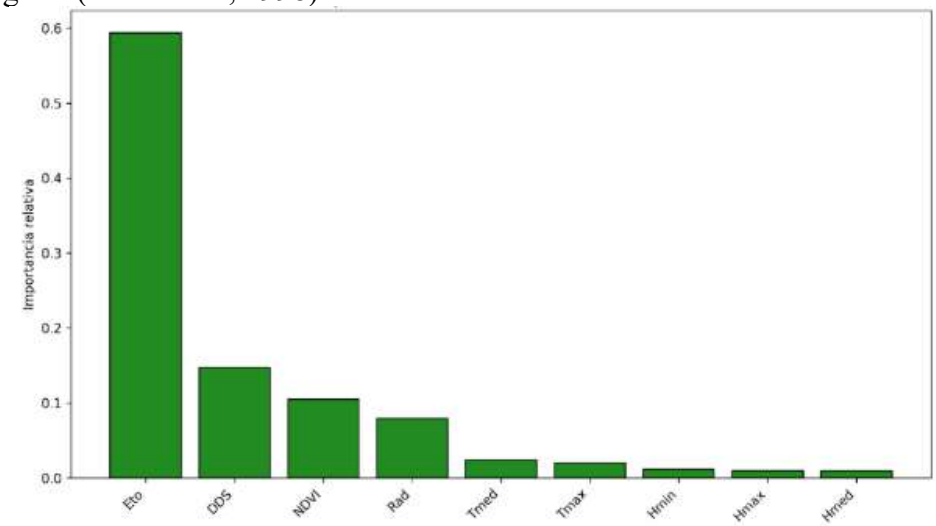


Figura 6. Importancia de variables en el MF obtenida mediante random forest.

Un hallazgo relevante surge al observar los coeficientes de la regresión lineal (Figura 7): en ambos enfoques, *Eto* presenta un coeficiente negativo (≈ −0.5 en MC, ≈ −0.6 en MF) pese a su fuerte correlación positiva con la *ETc* (r ≈ 0.81). Simultáneamente, *NDVI* concentra un coeficiente desproporcionadamente alto (≈ 5.4 en MC, ≈ 5.9 en MF). Este patrón es un signo característico de multicolinealidad severa entre predictores: como se documentó en la sección (Análisis de correlación y selección de variables), *Eto* está correlacionada 0.94 con *Rad*, 0.87 con *Tmed* y 0.88 con *Tmax*, de modo que el algoritmo de mínimos cuadrados ordinarios redistribuye el peso explicativo entre variables redundantes de forma inestable, pudiendo invertir el signo de coeficientes individuales sin que ello refleje una relación física real (Kuhn & Johnson, 2019). Esto es importante porque confirma que el filtrado por $|r| \geq 0.5$ con la ETc (criterio univariante) no resuelve la colinealidad *entre* predictores, y por tanto los coeficientes brutos de la RLM deben interpretarse con cautela como herramienta física, aunque conservan validez como herramienta predictiva.

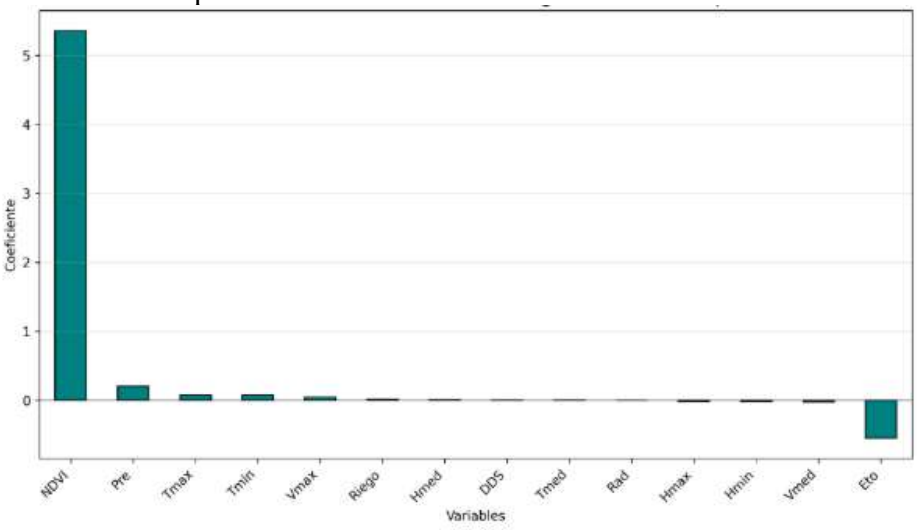


Figura 7. Coeficientes estandarizados de la regresión lineal múltiple.

Modelo Reducido (MR)

Con el propósito de simplificar la estructura de los modelos y evaluar la contribución de las variables más relevantes para la estimación de la evapotranspiración del cultivo (*ETc*), se desarrolló un nuevo escenario de modelación utilizando únicamente las tres variables con mayor importancia predictiva identificadas previamente (*Eto*, *NDVI* y *DDS*). Los resultados muestran que los tres algoritmos evaluados conservaron una elevada capacidad predictiva utilizando únicamente estas tres variables (Figura 8).

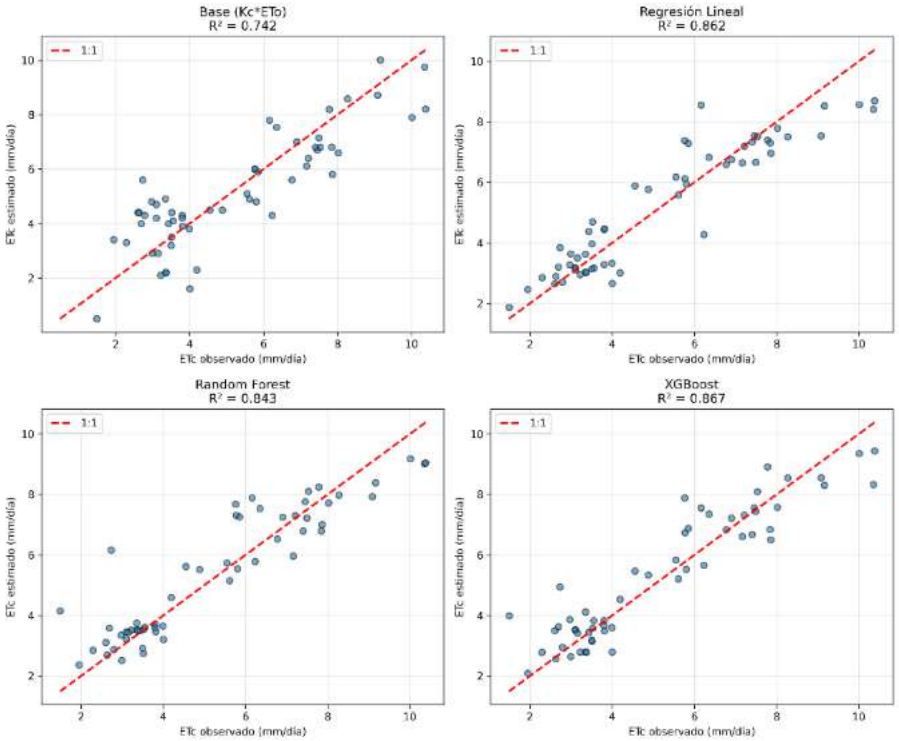


Figura 8. Dispersión de todos los modelos con las tres variables más importantes (Modelo reducido) en el conjunto de prueba.

La regresión lineal múltiple (RLM) alcanzó un $R^2 = 0.862$, un RMSE = 0.865 mm día^{-1}, un MAE = 0.659 mm día^{-1} y un MAPE = 13.8 %. Random Forest (RF) presentó un $R^2 = 0.843$, un RMSE = 0.924 mm día^{-1}, un MAE = 0.662 mm día^{-1} y un MAPE = 16.2 %. Por su parte, XGBoost obtuvo el mayor coeficiente de determinación ($R^2 = 0.867$), así como los menores valores de RMSE (0.851 mm día^{-1}) y MAE (0.643 mm día^{-1}), aunque presentó un MAPE de 15.7 %. Estos resultados muestran que XGBoost presentó el mejor desempeño global en términos de R^2, RMSE y MAE, mientras que la RLM obtuvo el menor error porcentual medio (MAPE), sin embargo, la diferencia de desempeño entre ambos modelos fue reducida.

Este comportamiento es relevante debido a que evidencia que la mayor complejidad algorítmica de XGBoost no produjo una mejora sustancial respecto a la RLM cuando se utilizaron únicamente las tres variables de mayor importancia. La RLM explicó el 86.2 % de la variabilidad observada de la ETc, mientras que XGBoost explicó el 86.7 %, lo que representa una diferencia relativamente pequeña. Por tanto, aunque XGBoost puede considerarse el modelo con mejor desempeño global, la RLM constituye una alternativa competitiva debido a su estructura más sencilla y facilidad de interpretación e implementación.

El modelo reducido se obtuvo la ecuación 2 de regresión lineal múltiple, con coeficientes en unidades originales.

$$ETc = -1.8718 + 0.0025 \cdot DDS + 6.61 \cdot NDVI + 0.6424 \cdot Eto \qquad (2)$$

donde: *ETc* en mm/día; *DDS* en días; *NDVI* adimensional; Eto en mm/día.

Esta ecuación, aunque construida con solo 3 variables y de fácil implementación en una hoja de cálculo, mantiene el R^2=0.862 y puede ser utilizada por técnicos sin necesidad de software especializado (Doorenbos & Pruitt, 1977).

Análisis temporal y predicción en secuencia

En todos los enfoques, los tres modelos ML siguen razonablemente bien la tendencia general de la ETc observada a lo largo de los primeros 50 puntos del conjunto de prueba, pero los tres fallan sistemáticamente en capturar los picos más altos: por ejemplo, en el índice de tiempo ≈15 (Figura 9), el valor observado (≈ 4.0 mm/día) es subestimado por la regresión lineal (≈ 2.5 mm/día), un error puntual de 1.5 mm/día. En general, los tres modelos tienden a subestimar los máximos de ETc (> 9 mm/día), lo cual es consistente con el patrón de residuos negativos identificado en la sección 3.5. Este comportamiento sugiere que, para aplicaciones donde los días de alta demanda hídrica son críticos (por ejemplo, durante el llenado del bulbo), el modelo XGBoost con menor sesgo relativo en los extremos sería la opción más fiable, aunque ningún modelo elimina completamente el sesgo de subestimación en el rango alto.

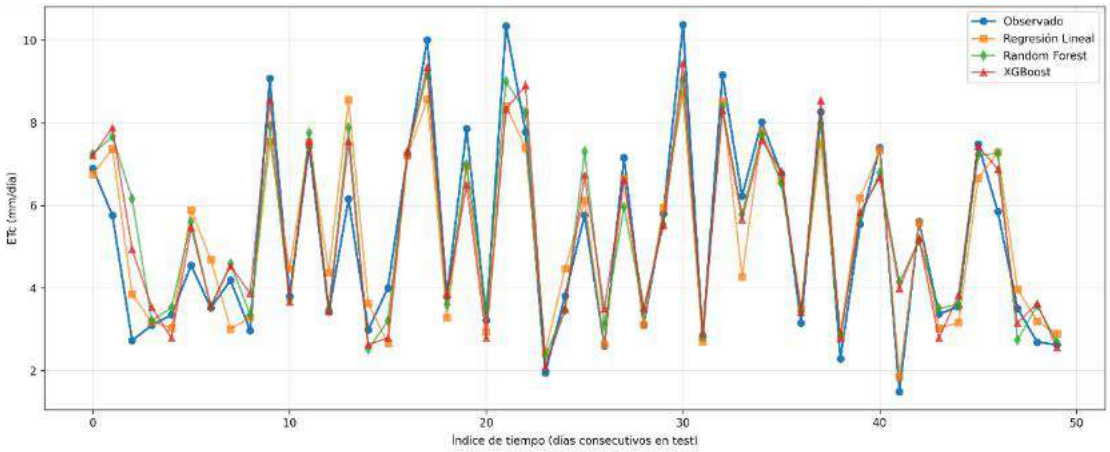


Figura 9. Comparación temporal de *ETc* observado vs estimada (Primeros 50 puntos de prueba)

Limitaciones del estudio y perspectivas futuras

Entre las principales limitaciones de este trabajo se encuentran: (1) el tamaño muestral, restringido a un solo ciclo de cultivo, lo que limita la generalización de los coeficientes obtenidos a otros años climáticos; (2) la ausencia de humedad del suelo como predictor, cuya inclusión podría mejorar la estimación en periodos de riego deficitario o tras eventos de lluvia; (3) el hecho de que la correlación de Pearson, al ser una medida estrictamente lineal, no captura relaciones no lineales ni efectos umbral (por ejemplo, el posible cierre estomático abrupto a partir de cierto VPD crítico), por lo que variables como Riego, Vmax o Tmin descartadas del MF por su baja correlación lineal podrían aún aportar información predictiva no lineal que RF y XGBoost sí podrían aprovechar si se incluyeran; y (4) la posible saturación del NDVI durante las etapas de máximo desarrollo foliar, fenómeno asociado con la respuesta no lineal de los índices de vegetación ante incrementos en la densidad del dosel (Gao et al., 2000), lo que podría limitar su capacidad para discriminar variaciones adicionales en la cobertura vegetal durante la fase de bulbéo tardío.

Implicaciones prácticas

Los resultados de este estudio tienen implicaciones directas para la programación del riego del ajo en la región. En primer lugar, la ecuación de regresión lineal múltiple del MR (sección 3.7), fácilmente implementable en una hoja de cálculo o en un controlador de riego básico, constituye una herramienta operativa de bajo costo instrumental, ya que prescinde de sensores de viento y de registro de riego/precipitación sin pérdida relevante de precisión frente al modelo con todas las variables.

Conclusiones

Este estudio comparó, por primera vez para el cultivo de ajo variedad Mármol Blanco, un enfoque de modelado con la totalidad de las variables meteorológicas y de manejo disponibles a un enfoque restringido a las variables con correlación absoluta de Pearson ≥0.5 respecto a la ETc observada mediante Eddy Covariance. Los resultados confirman la hipótesis de partida: el filtrado de variables no solo preservó, sino que mejoró la capacidad predictiva de los tres modelos de aprendizaje automático evaluados, con ganancias de R^2 de hasta +0.040 en la regresión lineal múltiple, al tiempo que redujo en cinco el número de sensores/variables necesarias (eliminando riego, precipitación, temperatura mínima y viento máximo/medio). La regresión lineal múltiple del modelo MR, con R^2=0.862 y una ecuación de 3 términos fácilmente calculable, se recomienda como alternativa de bajo costo instrumental para técnicos y agricultores de la región.

Literatura citada

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO.

Aubinet, M., Vesala, T., & Papale, D. (Eds.). (2012). Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Dordrecht: Springer

Bausch, W. C., & Neale, C. M. U. (1987). Crop Coefficients Derived from Reflected Canopy Radiation: A Concept. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 30(3). https://doi.org/10.13031/2013.30463

Cervantes, R.; Arteaga, R.; Vázquez, M. A.; Ojeda, B. W. y Quevedo, N. A. 2013. Modelos Hargreaves Priestley-Taylor y redes neuronales artificiales en la estimación de la evapotranspiración de referencia. Ingeniería Investigación y Tecnología. 16(2):163-176.

Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp. 785-794). https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24. Rome: FAO.

Ehteram, M., Singh, V. P., Ferdowsi, A., et al. (2019). An improved model based on the support vector machine and cuckoo algorithm for simulating reference evapotranspiration. PLoS ONE, 14(5), e0217499
Elbeltagi, A., Deng, J., Wang, K., Malik, A., & Maroufpoor, S. (2020). Modeling long-term dynamics of crop evapotranspiration using deep learning in a semi-arid environment. Agricultural Water Management, 241, 106334.

Fan, J., Yue, W., Wu, L., Zhang, F., Cai, H., Wang, X., Lu, X., & Xiang, Y. (2018). Evaluation of SVM, ELM and four tree-based ensemble models for predicting daily reference evapotranspiration using limited meteorological data in different climates of China. Agricultural and Forest Meteorology, 263, 225-241.

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany, 58(2), 147-159.

Gao, X., Huete, A. R., Ni, W., & Miura, T. (2000). Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. Remote Sensing of Environment, 74(3), 609–620. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00150-4.

Glenn, E. P., Nagler, P. L., & Huete, A. R. (2010). Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing. Surveys in Geophysics, 31(6), 531-555. https://doi.org/10.1007/s10712-010-9102-2.

Granata, F., Gargano, R., & de Marinis, G. (2020). Artificial intelligence based approaches to evaluate actual evapotranspiration in wetlands. Science of The Total Environment, 703, 135653.

Guyon, I., & Elisseeff, A. (2003). An Introduction to Variable and Feature Selection. Journal of Machine Learning Research, 3, 1157-1182. https://dl.acm.org/doi/10.5555/944919.944968
Hanson, B. R., & May, D. M. (2003). Response of garlic to irrigation water. Agricultural Water Management, 63(1), 1-15.

Jiménez-Jiménez, S. I., Marcial-Pablo, M. d. J., Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Inzunza-Ibarra, M. A., & Sánchez-Cohen, I. (2022). VICAL: Global Calculator to Estimate Vegetation Indices for Agricultural Areas with Landsat and Sentinel-2 Data. Agronomy, 12(7), 1518. https://doi.org/10.3390/agronomy12071518.

Implementación de sistemas IoT de bajo costo: Una alternativa tecnológica y accesible para el monitoreo climático en invernaderos agrícolas.

Elizabeth Ome Sterling[1], Natalia Licet Sánchez Sánchez[1], Luis Humberto Martínez Palmeth[2], Nadia Brigitte Sanabria Méndez[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La agricultura bajo cubierta permite un mayor control de las condiciones ambientales y favorece la productividad de los cultivos; sin embargo, el acceso a tecnologías de monitoreo climático continúa limitado por los altos costos de los sistemas comerciales. Este trabajo presenta el diseño, implementación y validación de un sistema IoT de bajo costo para el monitoreo en tiempo real de temperatura y humedad relativa en invernaderos agrícolas bajo condiciones tropicales. El prototipo fue validado experimentalmente en el invernadero de la Granja Experimental de la Universidad Surcolombiana (Palermo, Huila, Colombia). El nodo tecnológico se basó en hardware de código abierto, integrando un microcontrolador Arduino Mega 2560, un módulo Wi-Fi ESP8266 y un arreglo de cuatro sensores DHT22. Los componentes electrónicos se alojaron en un encapsulado de ABS fabricado mediante impresión 3D, y su desempeño se contrastó frente a una estación meteorológica comercial de referencia (modelo Tycon Pro TP3000WC) bajo condiciones de alto estrés térmico. Los resultados mostraron un desempeño satisfactorio del sistema, con coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0,95 para ambas variables y una elevada concordancia entre las mediciones durante los periodos de estabilidad nocturna. El sistema permitió la visualización dual de los datos: localmente a través de una pantalla LCD y de forma remota mediante la plataforma Weather Underground. Se concluye que esta alternativa tecnológica constituye una opción funcional y de bajo costo para el monitoreo ambiental en invernaderos, con potencial para facilitar la adopción de tecnologías de agricultura de precisión por pequeños y medianos productores.

Palabras clave: Internet de las Cosas (IoT), Invernaderos, Monitoreo ambiental, Sensores de bajo costo, Agricultura de precisión.

Abstract

Protected cultivation enables better control of environmental conditions and can improve crop productivity; however, access to climate monitoring technologies remains limited by the high cost of commercial systems. This study presents the design, implementation, and experimental validation of a low-cost Internet of Things (IoT) system for real-time monitoring of air temperature and relative humidity in agricultural greenhouses under tropical conditions. The prototype was validated in the greenhouse of the Experimental Farm at Universidad Surcolombiana (Palermo, Huila, Colombia). The IoT node was built using open-source hardware, integrating an Arduino Mega 2560 microcontroller, an ESP8266 Wi-Fi module, and an array of four DHT22 sensors housed in a 3D-printed ABS enclosure.

[1] Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana, Avenida Pastrana Borrero- Carrera 1, Neiva Huila; eliomesterling31@gmail.com, natalia.licet.sanchez@gmail.com, nadia.sanabria@usco.edu.co.
[2] Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, lhmarpal@uis.edu.co.

System performance was evaluated against a commercial reference weather station (Tycon Pro TP3000WC) under naturally occurring high-temperature greenhouse conditions. The results showed satisfactory performance, with coefficients of determination (R^2) exceeding 0.95 for both variables and strong agreement between the measurements during periods of nighttime thermal stability. The system provided both local visualization through an LCD display and remote monitoring via the Weather Underground platform. Overall, the proposed system represents a functional and low-cost solution for environmental monitoring in greenhouses, supporting the adoption of precision agriculture technologies by small and medium-sized producers.

Keywords: Internet of Things (IoT), Greenhouses, Environmental monitoring, Low-cost sensors, Precision agriculture.

Introducción

La agricultura bajo cubierta ha demostrado ser una estrategia técnica eficaz para mitigar los efectos adversos de la variabilidad climática y optimizar el rendimiento agronómico de los cultivos (Shamshiri et al., 2018). El control y monitoreo continuo de las variables climáticas, especialmente la temperatura y la humedad relativa, resulta fundamental para garantizar la sanidad vegetal, gestionar eficientemente los recursos hídricos y maximizar la productividad de los biosistemas. Sin embargo, la implementación de estas prácticas de agricultura de precisión ha estado históricamente restringida a grandes esquemas agroindustriales debido a las altas inversiones de capital que exigen (Tzounis et al., 2017).

El principal obstáculo para la tecnificación de los pequeños y medianos productores radica en el elevado costo de las estaciones meteorológicas comerciales y los sistemas de monitoreo privativos (Elijah et al., 2018). Estos equipos representan una barrera económica significativa no solo en su adquisición inicial, sino también en los costos asociados a su mantenimiento, calibración y licencias de software. Esta brecha tecnológica limita drásticamente la capacidad de los agricultores para tomar decisiones fundamentadas en datos reales, dejándolos en una posición de vulnerabilidad frente a las rápidas fluctuaciones ambientales que afectan sus ciclos productivos dentro de los invernaderos (Ray, 2017).

Ante este panorama de desigualdad tecnológica, el surgimiento del Internet de las Cosas (IoT) y las plataformas de hardware y software de código abierto ofrecen una oportunidad estratégica para democratizar el acceso a la instrumentación agrícola (Villa-Henriksen et al., 2020). La integración de microcontroladores de arquitectura abierta, como los módulos ESP8266 o placas de desarrollo compatibles, junto con sensores de bajo costo, permite la creación de sistemas de telemetría destinados a optimizar recursos en biosistemas controlados (Haritha et al., 2025). Estas herramientas alternativas posibilitan la construcción de redes de monitoreo económicamente viables, modulares y de fácil mantenimiento, facilitando su adopción en diversos contextos agrícolas regionales (Friha et al., 2021)

Por consiguiente, el presente trabajo tiene como objetivo exponer la implementación y estructuración de un sistema IoT de bajo costo destinado al monitoreo de condiciones ambientales en invernaderos agrícolas. Mediante el diseño y ensamblaje de este nodo tecnológico, se busca proporcionar una alternativa accesible que empodere al productor mediante el registro en tiempo real de datos climáticos, promoviendo así una transición hacia una agricultura de precisión más inclusiva.

Materiales y Métodos

Área de Estudio y Condiciones Climáticas

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el invernadero de la Granja Experimental de la Universidad Surcolombiana, ubicado en el municipio de Palermo, departamento del Huila, a una altitud de 464 msnm. La infraestructura de estudio comprende un área total de 120 m², distribuida en dos naves continuas de 5 m de ancho por 12 m de largo. La estructura está construida con hierro galvanizado y cubierta plástica, alcanzando una altura de 4.5 m al inicio de la cubierta y 2 m hasta la cumbrera, complementada con ventanas cenitales de 1.25 m de altura para la ventilación natural.

Desde el punto de vista meteorológico, esta zona representa un escenario climático crítico para el diseño y monitoreo agrícola, registrando una temperatura máxima promedio mensual de 36.23°C, una velocidad mínima promedio anual del viento de 4.6 m/s y una irradiancia instantánea máxima que alcanza los 5000 W/m² (Martínez Palmeth et al., 2026). Estas severas exigencias térmicas y de radiación configuran el entorno idóneo para validar el desempeño, la resistencia y la precisión del sistema de monitoreo electrónico propuesto bajo condiciones reales de estrés continuo.

Arquitectura del Sistema Propuesto

El diseño de la arquitectura propuesta buscó responder a los desafíos de bajo costo y durabilidad que la literatura identifica como críticos para el éxito del IoT agrícola (Elijah et al., 2018). Para la captura y el procesamiento de las variables climáticas, se implementó una solución de hardware basada en un microcontrolador Arduino Mega 2560. Con el fin de garantizar un mayor respaldo en la adquisición de datos, se integró un arreglo de cuatro sensores digitales DHT22, seleccionados por su alta fiabilidad y relación costo-beneficio (Ver Figura 1). Dado que los dispositivos en campo están expuestos a condiciones ambientales severas que pueden comprometer su fiabilidad (Ayaz et al., 2019), se diseñó un encapsulado fabricado en filamento ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) para proteger la instrumentación electrónica frente a la radiación solar directa y la humedad. Integrada en esta carcasa, se incorporó una pantalla LCD que permite la visualización directa de las variables climáticas in situ, facilitando la lectura inmediata sin depender de internet. Finalmente, la conectividad hacia la nube se garantizó mediante un módulo Wi-Fi ESP8266, consolidando un diseño modular y robusto.



Figura 1. Sensores higrotérmicos DHT22, junto al sensor WH32 de la estación de referencia instalados en el invernadero. Fuente: Propia

Sistema de Referencia e Integración IoT

Para validar las lecturas obtenidas por el prototipo desarrollado, se estableció como estándar de comparación una estación meteorológica comercial inalámbrica, modelo Tycon Pro TP3000WC. Para la medición específica de la temperatura y la humedad relativa de referencia, este equipo utiliza sensores WH32 equipados con tecnología Sensirion SHT3x. Asimismo, en el marco del desarrollo del sistema de monitoreo, se implementó la integración con la plataforma Weather Underground (WU) para almacenar y visualizar la información de manera continua. Esta vinculación tecnológica permite a los agricultores y técnicos acceder a las variables climáticas en tiempo real desde cualquier dispositivo con conexión a Internet, facilitando la toma de decisiones ágiles e informadas para el manejo del cultivo.

Evaluación del Funcionamiento y Análisis Estadístico

Para verificar la viabilidad técnica y la estabilidad operativa del nodo tecnológico propuesto, se ejecutó una fase de prueba y monitoreo continuo dentro del invernadero durante un periodo de tres días en el mes de julio de 2024. Durante esta etapa, el sistema capturó y transmitió los datos ambientales con una frecuencia de muestreo de cinco minutos y en tiempo real, lo que permitió evaluar el comportamiento del hardware bajo las condiciones de estrés térmico previamente descritas, así como la robustez del enlace de comunicación inalámbrica hacia la nube.

El análisis de la información recolectada se estructuró desde una perspectiva descriptiva y de funcionamiento, centrada en corroborar la viabilidad del prototipo como herramienta de monitoreo continuo. En este sentido, se contrastaron visualmente y descriptivamente las tendencias de las series temporales capturadas por el equipo de bajo costo frente a los registros emitidos por la estación comercial de referencia. Este procedimiento permitió confirmar la capacidad del sistema implementado para detectar con coherencia las fluctuaciones higrotérmicas (dinámicas diurnas y nocturnas), demostrando que la arquitectura desarrollada es una herramienta funcional, confiable y accesible, que permite al productor agrícola el acceso a la información en tiempo real.

Resultados y Discusión

Estabilidad del Hardware bajo Condiciones de Estrés Climático

Durante la fase de validación empírica en el invernadero, la arquitectura de hardware propuesta demostró una alta resiliencia frente a las severas condiciones del entorno. El encapsulado fabricado en filamento ABS (Ver Figura 2) cumplió efectivamente su función de escudo protector, aislando el microcontrolador y los sensores de la radiación directa y las altas temperaturas, sin comprometer la ventilación necesaria para la captura de los datos. El sistema operó de manera ininterrumpida, evidenciando que la integración de componentes de bajo costo, la manufactura aditiva y el código abierto pueden soportar las exigencias térmicas de la agricultura tropical sin requerir inversiones en instrumentación industrial pesada.

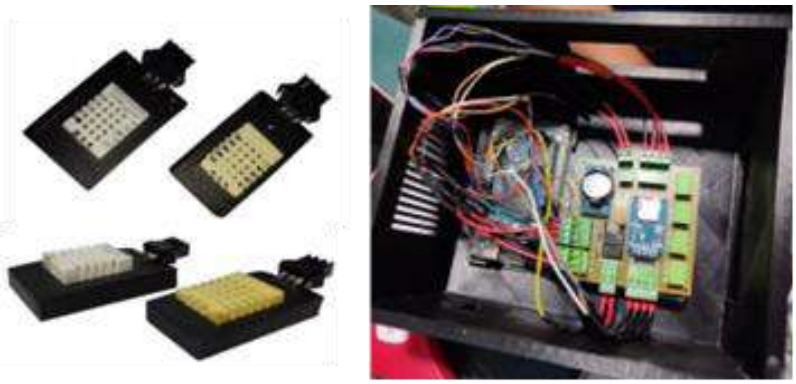


Figura 2. Arquitectura física del nodo de bajo costo. A la izquierda, el arreglo de sensores higrotérmicos DHT22. A la derecha, la placa de circuito impreso (PCB) con el microcontrolador y los periféricos de comunicación alojados en la carcasa impresa en 3D. Fuente: Propia

Conectividad IoT y Monitoreo en Tiempo Real

Uno de los logros más destacados de la implementación fue la estabilidad del enlace de comunicación y la dualidad en la disponibilidad de los datos. Por un lado, el módulo Wi-Fi integrado logró sostener la transmisión de paquetes hacia la nube respetando la frecuencia de muestreo establecida, lo que permitió visualizar el comportamiento climático de forma remota a través del panel de control de Weather Underground (Ver Figura 3a). Por otro lado, a nivel local, el sistema garantizó el procesamiento y la transmisión ininterrumpida de las lecturas hacia la pantalla LCD integrada en el encapsulado. Esta interfaz local logró desplegar de manera simultánea e instantánea los valores de temperatura y humedad relativa capturados por el arreglo de los cuatro sensores DHT22 (Ver Figura 3b).

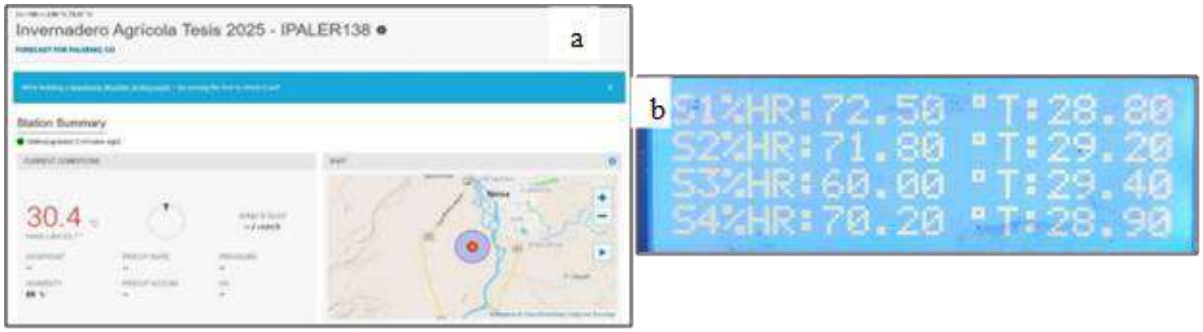


Figura 3. Interfaces de visualización de datos climáticos en tiempo real. (a) Panel de monitoreo remoto en la plataforma Weather Underground (WU) accesible vía web; (b) Visualización local simultánea de las variables de temperatura (°T) y humedad relativa (%HR) de los cuatro nodos sensores a través de la pantalla LCD integrada en el prototipo. Fuente: Propia

Esta continuidad en el registro temporal y en la visualización de los datos tanto de forma remota como in situ es un resultado crítico (Ray, 2017; Shamshiri et al., 2018). Además, demuestra la viabilidad de utilizar tecnologías de código abierto para generar bases de datos climáticas robustas (Friha et al., 2021), al tiempo que rompe la barrera del monitoreo diferido (Ayaz et al., 2019; Haritha et al., 2025). Al garantizar la disponibilidad de la información en tiempo real a través de plataformas accesibles, el sistema facilita la toma de decisiones inmediatas en el entorno agrícola (Elijah et al., 2018; Raza et al., 2021).

Validación Descriptiva de las Series Temporales

Al contrastar visualmente las series temporales generadas por el nodo IoT de bajo costo frente a los registros de la estación meteorológica comercial durante el periodo de prueba comprendido por los días 7, 8 y 9 de julio de 2024, se observó una alta correspondencia en la captura de las dinámicas microclimáticas. Como se evidencia en las curvas de temperatura y humedad relativa (Ver Figuras 4 y 5), el prototipo desarrollado logró rastrear con precisión los ciclos de calentamiento diurno y enfriamiento nocturno, un desempeño que coincide con lo reportado por Telaumbanua et al. (2024), quienes obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) de 0.9976 al validar sensores similares para el monitoreo de temperatura en invernaderos.

Desde el punto de vista térmico, el seguimiento diario demostró una alta coherencia entre ambos sistemas. El arreglo de sensores DHT22 registró su temperatura máxima absoluta de 38.6 °C durante el segundo día de medición (8 de julio), momento en el que la estación de referencia reportó 36.3 °C presentando una diferencia de 2.3 °C. Esta tendencia en las máximas se mantuvo estable durante los tres días, con diferencias que oscilaron entre 2.2 °C y 3.1 °C, variaciones previsibles bajo condiciones de estrés térmico por alta radiación; al respecto, Pereira y Ramos (2022) señalan que las desviaciones están correlacionadas con la temperatura, aunque la naturaleza de esta relación depende del sensor específico, habiéndose observado en algunos casos tendencias inversamente proporcionales al incremento térmico.

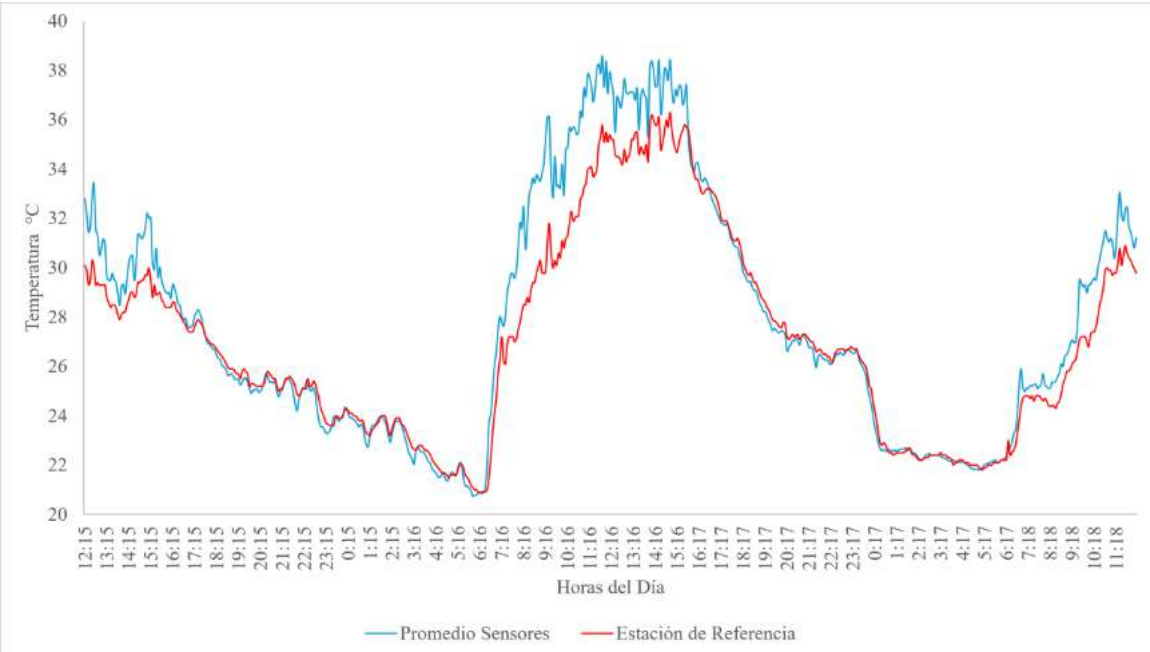


Figura 4. Comportamiento temporal de la temperatura (°C). Contraste entre el promedio registrado por el arreglo de sensores de bajo costo (DHT22) y la estación meteorológica de referencia durante los tres días de evaluación en el invernadero. Fuente: Propia

En contraste, el desempeño de los sensores DHT22 fue sobresaliente durante los periodos de enfriamiento nocturno. Al analizar las temperaturas mínimas diarias, el sistema reportó diferencias de apenas 0.3 °C para el 7 de julio, 0.1 °C para el 8 de julio, registrando el mínimo absoluto de 20.8 °C frente a los 20.9 °C del equipo comercial, y alcanzó una sincronía perfecta con una diferencia de 0.0 °C durante la madrugada del 9 de julio. Esto demuestra una altísima fiabilidad del hardware de código abierto en periodos de estabilidad térmica. Estos hallazgos son respaldados por investigaciones como la de Mubarak et al., (2022), quienes, al usar sistemas

basados en Arduino, reportaron errores promedio de apenas 0.27 °C en condiciones agrícolas reales durante la calibración de un sensor DHT22 en un rango de temperatura entre los 25.7 y 34,7 °C.

En cuanto a la humedad relativa (HR), el comportamiento dinámico fue igualmente consistente a lo largo de las tres jornadas. Ambos sistemas detectaron el momento de máxima humedad durante el tercer día (9 de julio), con el prototipo promediando un 92.8 % frente a un 93.0 % de la estación de referencia, logrando una diferencia de tan sólo 0.2 %. De hecho, las diferencias en las máximas diarias de humedad nunca superaron el 1.5 % en todo el periodo evaluado. Respecto a la caída de humedad, ambos equipos registraron los valores mínimos simultáneamente el 8 de julio, con 42.8 % para el prototipo y 37.0 % para la estación de referencia.

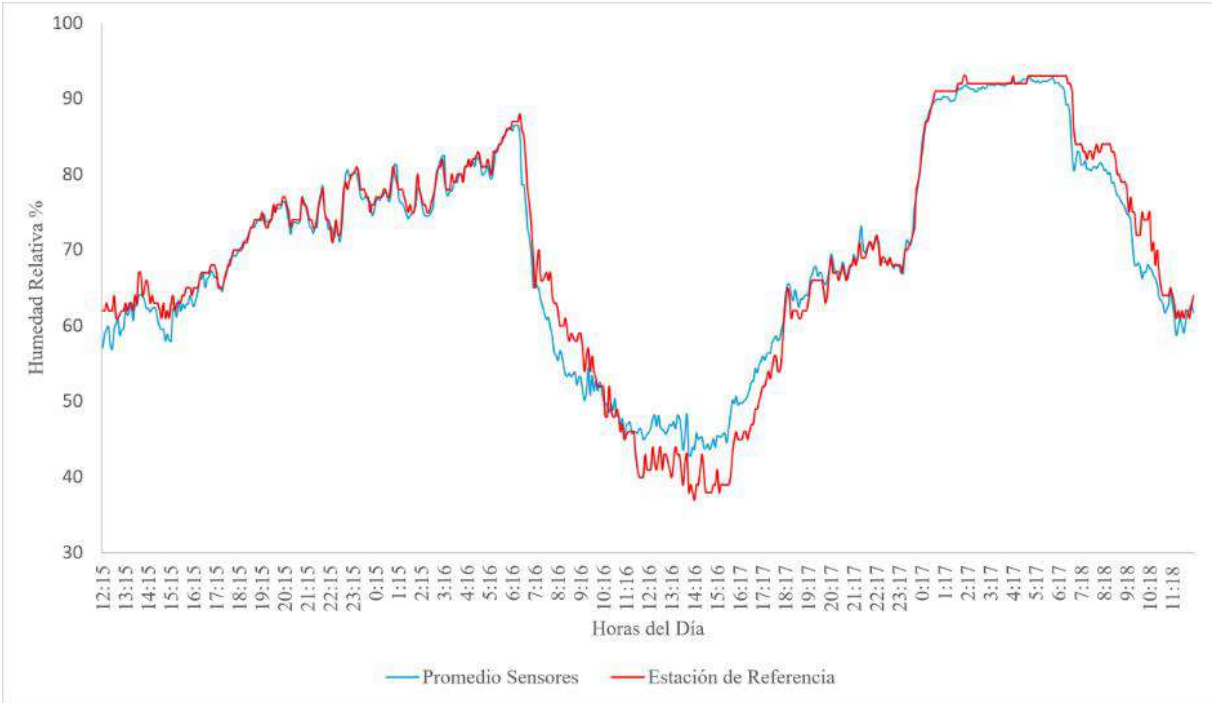


Figura 5. Comportamiento temporal de la humedad relativa (%). Contraste entre el promedio registrado por el arreglo de sensores de bajo costo (DHT22) y la estación meteorológica de referencia durante los tres días de evaluación en el invernadero. Fuente: Propia

Estas fluctuaciones en los momentos de mayor estrés evidencian que, aunque los sensores de bajo costo presentan una amplitud de lectura inherentemente distinta en los extremos higrométricos frente a equipos de alta gama, la arquitectura implementada es completamente capaz de trazar el comportamiento dinámico del microclima y alertar sobre umbrales críticos de manera confiable, con coeficientes de determinación ([Ecuación]) por encima de 0,95 para temperatura y humedad relativa (Ver Figura 6) indican una alta correlación lineal entre las mediciones del sistema desarrollado y la estación de referencia, y superan los coeficientes de determinación reportados por Chen et al. (2025), quienes obtuvieron valores de R^2 entre 0,60 y 0,90 para temperatura y entre 0,76 y 0,83 para humedad relativa.

En síntesis, la arquitectura implementada es completamente capaz de alertar sobre umbrales críticos de manera confiable. El uso de estos enfoques de Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo y control en invernaderos inteligentes constituye una práctica robusta y estandarizada en la Agricultura 4.0, garantizando un manejo eficiente del microclima a una

fracción del costo de los equipos tradicionales (Bersani et al., 2022), lo que democratiza el acceso a la tecnología de precisión para diversos perfiles de productores.

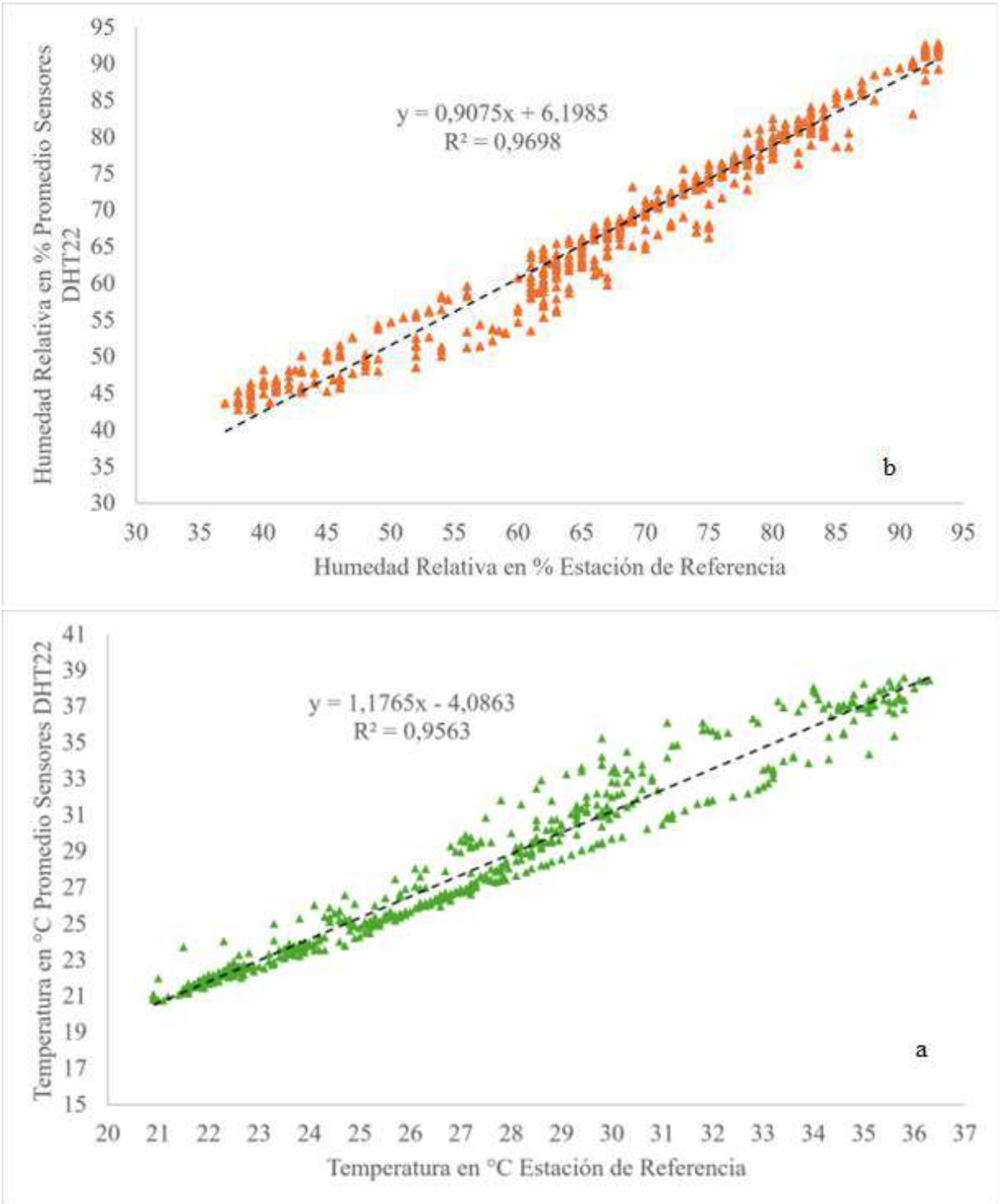


Figura 6. Análisis de correlación lineal entre el prototipo IoT y la estación de referencia. (a) Concordancia de las lecturas de temperatura (°C); (b) Concordancia de las lecturas de humedad relativa (%). Fuente: Propia

Conclusiones

El diseño y ensamblaje del nodo IoT basado en hardware de código abierto, un arreglo de sensores DHT22 y un encapsulado protector en ABS demostró ser una alternativa estructuralmente robusta frente a las exigencias del entorno, logrando consolidar una herramienta de monitoreo funcional que compite en operatividad con estaciones comerciales, pero reduciendo drásticamente las barreras económicas para su implementación en campo.

La alta correspondencia de las series temporales, respaldada por coeficientes de correlación (R^2) superiores a 0,95 para temperatura y humedad relativa frente al equipo de referencia, validan la precisión del sistema para detectar las dinámicas microclimáticas. Esta fiabilidad asegura que las alertas sobre umbrales críticos de estrés térmico o higrométrico sean exactas y oportunas.

La arquitectura de conectividad dual resolvió eficazmente el desafío del acceso a la información. Al garantizar la transmisión constante de paquetes de datos hacia la plataforma remota y, simultáneamente, permitir la lectura in situ mediante la pantalla LCD, se minimiza el rezago en el monitoreo, facilitando un seguimiento continuo de las variables climáticas.

En definitiva, el desarrollo de este sistema valida que la implementación de arquitecturas IoT de bajo costo constituye una alternativa tecnológica real y accesible para el monitoreo climático en invernaderos. Al dotar al productor de una herramienta conectada, autónoma y altamente confiable, se le empodera para dejar de lado la gestión intuitiva y transitar hacia la toma de decisiones basada en datos, promoviendo un manejo agronómico más eficiente y productivo.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a la Universidad Surcolombiana y la Universidad Industrial de Santander por proporcionar las instalaciones y los recursos físicos y computacionales necesarios para esta investigación.

Literatura Citada

Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E.-H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access, 7*, 129551–129583. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609

Bersani, C., Ruggiero, C., Sacile, R., Soussi, A., & Zero, E. (2022). Internet of Things Approaches for Monitoring and Control of Smart Greenhouses in Industry 4.0. *Energies*, 15(10), 3834. https://doi.org/10.3390/en15103834

Chen, X. C., Gonzalez, O. R., O'Connor, D., Tallon, L. A., & Pilla, F. (2025). Assessment of IoT low-cost sensor networks for long-term outdoor and indoor air quality monitoring: A case study in Dublin. *Atmospheric Pollution Research*, 16(11), 102651. https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102651

Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. N. (2018). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. *IEEE Internet of Things Journal, 5*(5), 3758–3773. https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2844296

Friha, O., Ferrag, M. A., Shu, L., Maglaras, L., & Wang, X. (2021). Internet of Things for the future of smart agriculture: A comprehensive survey of emerging technologies. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 8*(4), 718–752. https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1003925

Haritha, A., Nikitha, D., Ashritha, G., & Lohith Kumar, G. (2025). IoT based monitoring and controlling system of hydroponic vertical farming. *International Journal of Innovative Research in Technology*, 11(12), 4357–4362. https://ijirt.org/article?manuscript=178650

Martínez Palmeth, L. H., Sanabria Méndez, N. B., Bedoya Cardoso, M., González Carmona, M. A., & Cuervo Velásquez, P. A. (2026). CFD evaluation of crop presence and evapotranspiration on natural ventilation and thermal stratification in a tropical tomato greenhouse (OpenFOAM). *Eng, 7*, 194. https://doi.org/10.3390/eng7050194

Mubarak, H., Rizal, M., Iqbal, I., Waris, A., Sapsal, M. T., & Suelfikhar, I. (2022). Perancangan sistem kontrol suhu dan kelembapan ruang greenhouse menggunakan sensor DHT 22. *Jurnal AgriTechno, 15*(2), 160–165. https://doi.org/10.20956/at.vi.943

Pereira, P. F., & Ramos, N. M. M. (2022). Low-cost Arduino-based temperature, relative humidity and CO_2 sensors: An assessment of their suitability for indoor built environments. *Journal of Building Engineering, 60*, 105151. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105151

Ray, P. P. (2017). Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 9*(4), 395–420. https://doi.org/10.3233/AIS-170440

Raza, A., Khan, M. B., Ali, W., Memon, M. J., & Daudpota, R. (2021). IoT Based Smart Agriculture Monitoring and Control. *International Journal of Electrical Engineering & Emerging Technology, 4*(SI 1), 8–14.

Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Yamin, Z. M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering,* 11(1), 1–22. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210

Telaumbanua, M., Noval, F. A., Erika, Y., Haryanto, A., Lanya, B., Wisnu, F. K., Ansari, A., & Indriyawati, A. (2024). Design of temperature-soil moisture control and monitoring system for chili cultivation in greenhouse. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1386(1), 012029. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1386/1/012029

Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture: Recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering, 164*, 31–48. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007

Villa-Henriksen, A., Edwards, G. T., Pesonen, L. A., Green, O., & Sørensen, C. A. G. (2020). Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. *Biosystems Engineering, 191*, 60–84. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas 15 y 16 de octubre de 2026, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Consumo y distribución del agua en Baja California y Sonora ante escasez hídrica

Fidel Bautista Mayorga[1*], José Alberto García Salazar[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

El crecimiento demográfico y económico en el norte de Baja California y Sonora ha intensificado la competencia por el agua, complicando el abastecimiento sostenible en la región. El objetivo del presente trabajo fue analizar el consumo y la distribución del agua del acuífero valle de Mexicali y San Luis Río Colorado (SLRC) ante un escenario de escasez hídrica. Se empleó un modelo de equilibrio espacial con datos de 2019. Los principales resultados fueron, un consumo total estimado de los sectores residencial, comercial, industrial, agrícola de riego y pecuario de 197.2, 21.7, 16.7, 758, y 5.7 hm^3, respectivamente, siendo los municipios de Baja California los de mayor consumo. Al reducir la disponibilidad de agua en 10%, ocasionó la siguiente asignación del consumo total de agua 197.1, 21.7, 16.7, 735.5 y 5.6 hm^3 para los mismos sectores mencionados anteriormente y aumento en las tarifas de agua de 20 y 22%, principalmente, en el sector agrícola de los municipios de Mexicali y SLRC. Se concluye que, el sector que reduce su consumo en mayor medida es el agrícola tanto en Mexicali como en SLRC, lo anterior implica ser eficiente en el uso del agua para no afectar a este sector.

Palabras clave: Modelo de equilibrio espacial, consumo y distribución del agua, uso eficiente del agua.

Abstract

Population and economic growth in northern Baja California and Sonora has intensified competition for water, complicating sustainable supply in the region. The objective of this study was to analyze water consumption and distribution in the Mexicali Valley and the San Luis Río Colorado (SLRC) aquifer under a water scarcity scenario. A spatial equilibrium model was used with 2019 data. The main results showed estimated total consumption for the residential, commercial, industrial, irrigated agricultural, and livestock sectors of 197.2, 21.7, 16.7, 758, and 5.7 hm^3, respectively, with the municipalities of Baja California registering the highest consumption. The 10% reduction in water availability resulted in the following distribution of total water consumption: 197.1, 21.7, 16.7, 735.5, and 5.6 hm^3, respectively, and an increase in water rates of 20% and 22%, primarily affecting the agricultural sector in the municipalities of Mexicali and San Luis Río Colorado (SLRC). It is concluded that the agricultural sector has reduced its consumption the most in both Mexicali and SLRC, highlighting the need for greater water use efficiency to avoid impacting this sector.

Keywords: Model spatial equilibrium, water consumption and distribution, efficient use of water.

[1] Posgrado en Socioeconomía, Estadística e Informática-Economía. Carretera México-Texcoco, km. 36.5, Montecillo, Texcoco, C.P. 56264. *Autores de correspondencia: bautista.fidel@colpos.mx ; jsalazar@colpos.mx

Introducción

La Península de Baja California es la cuarta región hidrológica administrativa de las 13 que existen en el país con más acuíferos sobreexplotados, sólo por debajo de otras regiones Lerma Santiago Pacífico, Cuenca Central del Norte y Río Bravo. En 2011, la Península reportó 13 acuíferos sobreexplotados y 10 con intrusión marina, para 2019 reportó 18 sobreexplotados y 11 con intrusión marina. De esta región hidrológica, destacan los municipios de Mexicali (Baja California) y San Luis Río Colorado (SLRC, en Sonora) por ser grandes consumidores de agua, especialmente en el sector agrícola, pertenecientes al distrito de riego 014 (CONAGUA, 2019). En ese mismo año, de los 602 hm^3 del acuífero Valle de Mexicali (sobreexplotado), el sector agrícola de Mexicali consumió 588 hm^3 de agua y de los 263.5 hm^3 del acuífero Valle de SLRC, el cual se encuentra cerca de la sobreexplotación, la población de SLRC consumió 170 hm^3 (CONAGUA, 2020).

Tijuana sobresale por el dinamismo demográfico, comercial e industrial. En 2019, Baja California tenía una población total aproximada de 3.6 millones de personas, de los cuales el 49% (1.8 millones de personas) se concentran en Tijuana y 30% en Mexicali. Se proyecta que la población de Tijuana crecerá 19.5% en el periodo 2019-2030 (CONAPO, 2018). El INEGI (2021a) evidenció el dinamismo en el sector comercial e industrial en Tijuana, ya que el 97.2% de la Población Económicamente Activa se encontraba ocupada durante el segundo trimestre de 2019. El 59.4% se desenvolvía dentro del sector terciario (comercio, restaurantes y servicios de alojamiento, entre otros), y 34.3% laboró en el sector secundario (industrias extractiva, eléctrica y manufacturera, entre otros). El 6.2% de los trabajadores no especificaron la actividad económica en el que se encontraban ocupados.

Cabe mencionar que Tijuana (incluye Playas de Rosarito), Tecate y una parte de Ensenada abastecen su demanda de agua gracias a las concesiones que tienen asignadas de los acuíferos antes mencionados y el agua es transportada por el Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT) hasta llegar a las presas el Carrizo y las Auras (CEABC, 2018). Como se dijo anteriormente, el crecimiento de la población y los sectores económicos implica mayor demanda de agua y un aumento en la sobre explotación de los acuíferos. Ante tal situación, se vislumbran probables soluciones; por un lado, aumentando el suministro de agua para satisfacer la creciente demanda del líquido y, por otro lado, administrando y reduciendo la demanda para disminuir la presión sobre los recursos hídricos de la región.

Existen estudios que han determinado que se puede usar el precio del agua (tarifa) como mecanismo para disminuir la demanda y hacer un uso más eficiente del recurso en diferentes sectores consumidores (Gómez-Ugalde et al., 2012; Torres-Sombra et al., 2013; Cota-Verdugo et al., 2013; Romano et al., 2016). Otros estudios se han enfocado en asignar el agua de manera espacial e inter-temporal entre los sectores consumidores ante una situación de escasez y competencia por el recurso (Miranda-Trejo et al., 2015; Castro et al., 2017).

Ante una disminución en la disponibilidad de agua, algunos sectores tendrán que disminuir su consumo y el precio aumentaría. Aunque el agua es un bien necesario para todos los sectores consumidores, dicha disminución se observará en aquellos sectores donde el agua tiene el menor valor de uso. En términos económicos, el mayor valor de agua se observará en aquellos sectores con la demanda más inelástica, como el sector residencial, en donde el consumidor final es un ser vivo y no hay posibilidad de reducir el consumo per cápita. La demanda de agua en el sector residencial será más inelástica en colonias de bajos ingresos, en donde el consumo del líquido es mínimo; lo que determina que la demanda no disminuya, aún con un considerable aumento en el precio. Una situación similar se observará en la ganadería, sector en donde el consumidor final es un ser vivo.

El menor valor se observará en los sectores en donde la demanda es menos inelástica, como el sector agrícola, en donde técnicamente es posible reducir el consumo usando métodos de riego más eficientes en el uso del agua. En este sector un aumento en el precio del agua puede inducir al productor a agrícola a hacer un uso más eficiente del líquido; el aumento del precio puede motivar la adopción de sistema de riego tecnificados que permitan un ahorro de agua por unidad de superficie e incluso se podría aumentar la productividad de la agricultura de riego. El precio del agua puede proporcionar información al productor sobre el valor económico y la escasez del recurso, y puede motivar a los agricultores para cambiar hacia un patrón de cultivo más productivo.

Algo similar pasa en el sector industrial, un aumento en el precio del agua usada en la industria puede motivar al empresario a adoptar sistemas que reciclen el agua usada en los procesos industriales. Tal reciclaje permitirá un ahorro considerable de agua con la consecuente disminución en el consumo.

Dado el contexto anterior, este estudio tuvo como objetivos asignar el agua extraída de los acuíferos Valle de Mexicali y SLRC ante un escenario de escasez del recurso hídrico, entre los diferentes sectores consumidores de agua por municipio del Estado de Baja California y Sonora, así como determinar el precio que haría posible disminuir la cantidad extraída de los acuíferos. La hipótesis establece que ante escenarios de escasez disminuirá el consumo de agua en aquellos sectores con menor valor de uso.

Materiales y Métodos

Para dar respuesta al objetivo del trabajo se propuso el siguiente modelo de equilibrio espacial (Takayama y Judge, 1971):

$$\begin{aligned} MAXVSN = & \sum_{r=1}^{R}\left[\lambda_r y_r + \frac{1}{2}\omega_r y_r^2\right] + \sum_{c=1}^{C}\left[\lambda_c y_c + \frac{1}{2}\omega_c y_c^2\right] + \sum_{i=1}^{I}\left[\lambda_i y_i + \frac{1}{2}\omega_i y_i^2\right] \\ & + \sum_{f=1}^{F}\left[\lambda_f y_f + \frac{1}{2}\omega_f y_f^2\right] + \sum_{g=1}^{G}\left[\lambda_g y_g + \frac{1}{2}\omega_g y_g^2\right] + \sum_{p=1}^{P}[PAP y_p] - \sum_{s=1}^{S}[PASX_s] \\ & - \sum_{p=1}^{P}[PAPX_p] - \sum_{s=1}^{S}\sum_{r=1}^{R}[D_{sr}X_{sr}] - \sum_{s=1}^{S}\sum_{c=1}^{C}[D_{sc}X_{sc}] - \sum_{s=1}^{S}\sum_{i=1}^{I}[D_{si}X_{si}] \\ & - \sum_{s=1}^{S}\sum_{f=1}^{F}[D_{sf}X_{sf}] - \sum_{s=1}^{S}\sum_{g=1}^{G}[D_{sg}X_{sg}] - \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}[D_{sp}X_{sp}] \\ & - \sum_{P=1}^{P}\sum_{r=1}^{R}[D_{pr}X_{pr}] - \sum_{P=1}^{P}\sum_{c=1}^{C}[D_{pc}X_{pc}] - \sum_{P=1}^{P}\sum_{i=1}^{I}[D_{pi}X_{pi}] \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$X_s \geq \sum_{r=1}^{R} X_{sr} + \sum_{c=1}^{C} X_{sc} + \sum_{i=1}^{I} X_{si} + \sum_{f=1}^{F} X_{sf} + \sum_{g=1}^{G} X_{sg} + \sum_{p=1}^{P} X_{sp} \quad (2)$$

$$X_p \geq \sum_{r=1}^{R} X_{pr} + \sum_{c=1}^{C} X_{pc} + \sum_{i=1}^{I} X_{pi} \quad (3)$$

$$\sum_{s=1}^{S} X_{sr} + \sum_{p=1}^{P} X_{pr} \geq y_r \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^{S} X_{sc} + \sum_{p=1}^{P} X_{pc} \geq y_c \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^{S} X_{si} + \sum_{p=1}^{P} X_{pi} \geq y_i \quad (6)$$

$$\sum_{s=1}^{S} X_{sf} \geq y_f \quad (7)$$

$$\sum_{s=1}^{S} X_{sg} \geq y_g \quad (8)$$

$$\sum_{s=1}^{S} X_{sp} \geq y_p \quad (9)$$

$$y_r, y_c, y_i \ldots X_{sr}, X_{sc}, X_{si} \ldots X_{sg}, X_s, X_p \geq 0 \quad (10)$$

donde:

r son las regiones consumidoras de agua del sector residencial (r=1…R=5), *c* regiones consumidoras de agua del sector comercial (c=1…C=4), *i* regiones consumidoras de agua del sector industrial (i=1…I=4), *f* regiones consumidoras de agua del sector agrícola (f=1…F=2), *g* regiones consumidoras de agua del sector pecuario (g=1…G=2), *s* son las fuentes de agua subterránea (s=1…S=2), *p* son las presas (p=1…P=2). λ_r, λ_c, λ_i, λ_f, λ_g son las ordenadas de las funciones inversas de la demanda en las regiones *r, c, i, f, g*; y_r, y_c, y_i, y_f, y_g son las cantidades consumidas de agua en los sectores *r, c, i, f, g, p*; ω_r, ω_c, ω_i, ω_f, ω_g son las pendientes de las funciones inversas de la demanda de agua en las regiones *r, c, i, f, g*; y_p es la cantidad de agua disponible total en la presa *p*; *PAS* es el costo de extracción de agua subterránea en la región *s*; *PAP* es el precio del agua a la salida de la presa *p*; X_s es la cantidad de agua extraída en la región *s*; X_p es la cantidad de agua disponible para envío en la presa *p*; D_{sr}, D_{sc}, D_{si}, D_{sf}, D_{sg}, D_{sp} son los costos de distribución del agua de *s* a *r, c, i, f, g, p*; D_{pr}, D_{pc}, D_{pi} son los costos de distribución del agua de *p* a *r, c, i*; X_{sr}, X_{sc}, X_{si}, X_{sf}, X_{sg}, X_{sp} son las cantidades de agua subterránea enviada de *s* a *r, c, i, f, g, p*; X_{pr}, X_{pc}, X_{pi} son las cantidades de agua enviada de *p* a *r, c, i*.

Cuadro 1. Variables y fuentes de consulta.

Variable	Unidad de Medida	Fuente
Elasticidad precio de la demanda (r, c, i, f, g)	%	Estimación propia (regresión lineal); Torres-Sombra y García-Salazar (2015).

Consumo de agua (r, c, i)	hm^3	CEABC (2021); estimación propia con datos de CEABC (2017); INEGI (2021b) e INEGI (2021c).
Consumo de agua agrícola (Mexicali y SLRC)	hm^3	CONAGUA (2020).
Consumo de agua de uso pecuario (Mexicali y SLRC)	hm^3	Estimación propia con datos de FAO (2013) y SIAP (2020).
Costos de distribución	$\$/m^3$	Estimación propia (diferencia de precios) con datos de CEABC (2018) y CONAGUA (2021).
Tarifa de energía eléctrica	\$/Kw/h	INEGI (2021d)
Ingreso	\$	CONASAMI (2021)
PIB de las act. Secundarias	Millones de \$	INEGI (2021e)
Precipitación	Mm	SMN (2021)
Temperatura	°C	SMN (2021)

Fuente: Elaboración propia.

Resultados y Discusión

En 2019, el consumo de agua por sectores se distribuyó principalmente entre Tijuana, Mexicali y San Luis Río Colorado (SLRC). El sector agrícola lideró la demanda con 758 hm^3, donde Mexicali

acaparó 588 hm^3, seguido por el sector residencial con 197.2 hm^3, repartidos en 98.5 hm^3 para Tijuana y 63.4 hm^3 para Mexicali. En el sector comercial (21.7 hm^3) e industrial (16.7 hm^3), Tijuana registró los mayores consumos con 15.4 hm^3 y 10 hm^3, mientras que Mexicali demandó 4.2 hm^3 y 4.7 hm^3, respectivamente. Finalmente, el sector pecuario sumó 5.7 hm^3, consumidos casi en su totalidad por Mexicali, quedando el remanente de este y del sector agrícola para SLRC (Cuadro 2).

En Baja California, los municipios de Tijuana, Tecate y el norte de Ensenada registran las tarifas de agua más elevadas en los sectores residencial, comercial e industrial, destacando Tijuana con las siguientes tarifas 19.5, 80 y 83.8 $\$/m^3$, respectivamente. En contraste, las tarifas más bajas se localizan en Mexicali y San Luis Río Colorado (SLRC); este último, ubicado en Sonora, es el que paga menos por el recurso, apenas 8.3 $\$/m^3$ en el sector residencial, 6.7 $\$/m^3$ en el

comercial y 9.7 $/m^3 en el industrial. para el sector agropecuario en la región de Mexicali y SLRC, se paga por el agua aproximadamente 0.20 $/m^3 (Cuadro 2).

La validación del modelo para el consumo y precio del agua por sector consumidor en los municipios de Baja California y SLRC, Sonora, se presenta en el Cuadro 2. Los signos positivos y negativos en las diferencias porcentuales indican si el modelo base sobreestima o subestima los valores observados en la realidad. No obstante, el margen de diferencia es mínimo (oscila entre 0 y 4.6%), lo que confirma la precisión y confiabilidad del modelo para el diseño de escenarios predictivos.

Cuadro 2. Validación del modelo

Municipio	R	C	I	F	G	R	C	I	F	G
	Millones de m^3					Pesos por m^3				
	Consumo observado					Precio observado				
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.53	80.05	83.78		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.91	66.86	64.51		
Ensenada	9.0					14.15				
Mexicali	63.4	4.2	4.7	588.0	5.7	7.15	51.16	59.82	0.19	0.19
SLRC	24.6	2.0	0.7	170.0	0.0	8.28	6.68	9.70	0.19	0.19
Total	197.2	21.7	16.7	758.0	5.7					
	Consumo modelo base					Precio modelo base				
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.53	80.05	83.78		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.91	66.84	64.51		
Ensenada	9.0					14.15				
Mexicali	63.4	4.2	4.7	584.6	5.7	7.15	51.16	59.82	0.20	0.19
SLRC	24.6	2.0	0.7	170.8	0.0	8.28	6.68	9.71	0.18	0.19
Total	197.3	21.7	16.7	755.4	5.7					
	Diferencia % respecto al observado									
Tijuana	0.0	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0		
Tecate	0.0	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0		
Ensenada	0.0					0.0				
Mexicali	0.0	0.0	0.0	-0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	0.1
SLRC	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.1	-3.7	-0.1
Total	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0					

Fuente: Elaboración propia.

Al reducir un 10% la disponibilidad de agua en los acuíferos Valle de Mexicali y SLRC, la extracción total estimada pasaría de 996.8 a 897.2 hm³, según los efectos analizados en el

Cuadro 2. Como consecuencia directa de esta contracción en la oferta hídrica, la demanda global del recurso disminuirá y el precio del agua aumentará.

La reducción hídrica no genera cambios significativos en el consumo de los sectores residencial, comercial e industrial, pero impacta notoriamente el sector agrícola con una disminución del 2.6% en Mexicali y SLRC, y una caída del 1.4% en el sector pecuario de ambas localidades. Este comportamiento indica una mayor sensibilidad a la disponibilidad de agua en las actividades agrícolas y pecuarias frente a las urbanas.

Cuadro 3. Asignación del agua entre consumidores y aumento en el precio ante escasez del recurso.

Municipio	R	C	I	F	G	R	C	I	F	G
	Millones de m^3					Pesos por m^3				
	Consumo modelo base					Precio modelo base				
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.53	80.05	83.78		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.91	66.84	64.51		
Ensenada	9.0					14.15				
Mexicali	63.4	4.2	4.7	584.6	5.7	7.15	51.16	59.82	0.20	0.19
SLRC	24.6	2.0	0.7	170.8	0.0	8.28	6.68	9.71	0.18	0.19
Total	197.3	21.7	16.7	755.4	5.7					
	La disponibilidad disminuye en 10%									
Tijuana	98.5	15.4	10.0			19.57	80.09	83.82		
Tecate	1.8	0.2	1.4			13.95	66.94	64.55		
Ensenada	9.0					14.19				
Mexicali	63.3	4.2	4.7	569.2	5.6	7.19	51.20	59.86	0.24	0.23
SLRC	24.5	2.0	0.7	166.3	0.0	8.32	6.72	9.75	0.22	0.23
Total	197.1	21.7	16.7	735.5	5.6					
	Diferencia % respecto al escenario base									
Tijuana	0.0	0.0	0.0			0.2	0.0	0.0		
Tecate	-0.1	0.0	0.0			0.3	0.1	0.1		
Ensenada	-0.1					0.3				
Mexicali	-0.1	0.0	0.0	-2.6	-1.4	0.6	0.1	0.1	20.0	21.0
SLRC	-0.1	0.0	0.0	-2.6	-1.4	0.5	0.6	0.4	22.0	21.1
Total	-0.1	0.0	0.0	-2.6	-1.4					

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la investigación concuerdan con Ghosh et al. (2017), al demostrar que una disminución en la oferta hídrica afecta principalmente al sector agropecuario sobre el residencial, comercial e industrial, debido a que la actividad agrícola posee un menor valor económico en el uso del agua. Este hallazgo subraya una asimetría en el impacto sectorial ante la escasez hídrica.

Los resultados anteriores también son similares a los encontrados por otros autores para el caso de México. García-Salazar et al. (2006), indicaron que un aumento en el precio del agua en el sector agrícola de 98.6% para disminuir en 10% las extracciones del líquido en la Comarca Lagunera, señalan que tal aumento en el precio podría lograrse eliminando o reduciendo los subsidios que tienen en este sector; por ejemplo, aumentar el precio de la energía eléctrica, el principal insumo para bombear agua. El aumento en el precio fomentaría un ahorro de agua por parte de los agricultores, ya que introducirían tecnología en los cultivos y en los sistemas de riego, como el riego por goteo subsuperficial. Un aumento de casi 100% en el precio del agua usada en el sector agrícola del Norte de Baja California también sería posible si se considera el bajo nivel de precio observado en esta región.

Ramírez et al. (2019) señalan que el cobro del agua por hectárea y no por volumen genera tarifas que ocultan su valor real, propiciando un uso ineficiente del recurso hídrico en los distritos de riego de México. Ante esto, tanto los autores mencionados como García-Salazar et al. (2006) y la presente investigación coinciden en la necesidad de incrementar el precio del agua en el sector agrícola para desincentivar el desperdicio y reducir significativamente la sobreexplotación de los acuíferos.

El PIB del estado de Baja California en 2019 fue de 575.8 mil millones de pesos constantes de 2013, de los cuales las actividades primarias, secundarias y terciarias aportaron 15.5, 221.2 y 339.1 mil millones de pesos, respectivamente (INEGI, 2021d). De acuerdo con el consumo de agua, el sector primario es el sector que más agua consume, pero es el que menos aporta al PIB de la entidad. Los otros sectores no agrícolas consumen menos agua, pero son los de mayor participación en el PIB; por lo tanto, en una situación de escasez o reducción de agua de los acuíferos, el agua extraída se asignaría en aquellos sectores con mayor valor de uso del agua (Ghosh et al., 2017).

Debido al creciente dinamismo comercial, industrial y residencial de Tijuana y a la falta de fuentes de suministro adicionales, se prevé una reasignación de agua desde el sector agrícola de Mexicali hacia dicha urbe, un fenómeno de transferencia intersectorial respaldado por la literatura científica que suele generar tensiones entre municipios beneficiados y perjudicados. Para mitigar los impactos negativos en las zonas agrícolas de Mexicali y San Luis Río Colorado, es fundamental que los tomadores de decisiones implementen regulaciones estrictas y restricciones claras sobre estos trasvases. Asimismo, se requiere mayor investigación y la realización de un estudio técnico que determine el consumo óptimo en el campo mexicalense, estableciendo así un límite máximo de transferencia que proteja la vocación agrícola de la región frente a la demanda urbana.

Finalmente, junto con el ajuste de tarifas, la eficiencia hídrica puede potenciarse mediante estrategias tecnológicas y de reuso específicas para cada sector en Mexicali y SLRC. El sector agrícola se beneficiaría de tecnologías de riego avanzadas y del uso de agua tratada proveniente de otros municipios, mientras que los sectores comercial e industrial podrían implementar sistemas internos de reciclaje de agua. Finalmente, el ámbito residencial requiere la adopción de dispositivos ahorradores en regaderas, inodoros y lavabos, complementados con cambios en los hábitos de consumo diario, como reducir el tiempo de ducha y reutilizar el agua de lavado.

Conclusiones

La escasez de agua perjudica principalmente al sector agropecuario de Mexicali y SLRC debido a su menor valor de uso, mientras que la reasignación del recurso beneficia a las áreas residencial, comercial e industrial de Tijuana.
Se recomienda aumentar el precio del agua como estrategia para frenar la sobreexplotación y disminuir el consumo, pero implementando regulaciones específicas para proteger la actividad agrícola de la región.

Literatura Citada

Castro, J. C., Cruz, F. V., Magaña, J. D., Martínez, G., Reyes, A., & Sainz, R. O. (2017). La demanda del agua y su asignación eficiente en la agricultura: un caso en Guanajuato, México. *Economía Coyuntural*, 2: 145–180. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2415-06222017000200005&script=sci_arttext

Comisión Estatal del Agua de Baja California (CEABC). (2018). "Programa hídrico del Estado
de Baja California". Baja California. Disponible en: http://www.cea.gob.mx/phebc/resejec/RESUMEN%20EJECUTIVO%20PHEBC.pdf [consultado: marzo, 2021].

Comisión Estatal del Agua de Baja California (CEABC). (2021). "Indicadores OOA". Baja California. Disponible en: http://www.cea.gob.mx/indicadores.html [consultado: mayo, 2022].
Comisión Nacional de los Salarios Mínimos (CONASAMI). (2021). "Tabla de Salarios Mínimos Generales y Profesionales por Áreas Geográficas". Ciudad de México. Disponible en: https://www.gob.mx/conasami/documentos/tabla-de-salarios-minimos-generales-y-profesionales-por-areas-geograficas?idiom=es [consultado: marzo, 2021].

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). "Acuíferos por región hidrológico-administrativa". Ciudad de México. Disponible en: http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&ver=reporte [consultado: marzo, 2021].

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). "Disponibilidad por acuíferos". Ciudad de México. Disponible en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html [consultado: febrero, 2021].

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). "Recaudación de la CONAGUA". Ciudad de México. Disponible en: http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=recaudacion&ver=mapa&o=0&n=nacional [consultado: agosto, 2021].

Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2018). "Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas 2016–2050". Ciudad de México". Disponible en:

https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050 [consultado: febrero, 2021].
Cota-Verdugo, L. F., Beltrán-Morales, A., Troyo-Diéguez, E., García-Hernández, J. L., Beltrán-Morales, L. F., Hernández-Trejo, V. A., Ortega-Rubio, A., & Navarro, B. A. (2013). Mercado de derechos de agua para uso agrícola en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4: 63–75. https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/1259/1111

Ghosh, S., Ibarrarán, M. E., Willett, K. D., Torres-Esqueda, G. S. (2017). Water allocation and management along the Santa Cruz border region. *Water Resources and Economics*, 19: 1–17. https://doi.org/10.1016/j.wre.2017.09.004

Gómez-Ugalde, S. G., Mora-Flores, J. S., García-Salazar, J. A., & Valdivia-Alcalá, R. (2012). Demanda de agua para uso residencial y comercial. *Terra Latinoamericana*, 30: 337–342. https://www.redalyc.org/pdf/573/57325814005.pdf

Guzmán-Soria, E., García-Salazar, J. A., Mora-Flores, J. S., Fortis-Hernández, M., Valdivia-Alcalá, R., & Portillo-Vázquez, M. (2006). La demanda de agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia*, 40: 793-804. https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/issue/view/42

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021a). "Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), Población de 15 y más años de edad". Aguascalientes. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/programas/enoe/15ymas/default.html#Tabulados [Consultado: febrero, 2021].

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021b). "México en cifras". Aguascalientes. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=02 [Consultado: junio, 2021].

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021c). "Censos económicos 2019". Aguascalientes. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/#Datos_abiertos [Consultado: junio, 2021].

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021d). "Publicaciones". Aguascalientes. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/publicaciones/ [Consultado: agosto, 2021].

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021e). "Banco de Información Económica (BIE)". Aguascalientes. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0#divFV472180 [Consultado: agosto, 2021].

Miranda-Trejo, M., Ocampo-Fletes, I., Escobedo-Castillo, J. F., & Hernández-Rodríguez, M. L. (2015). La distribución del agua potable en Tepexi de Rodríguez, Puebla. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 12: 261–277. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722015000300001

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia: opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Chile: FAO. p.270.

Ramírez, B. A., González, A., Valdivia, R, Salas, J. M., & García, J. A. (2019). Tarifas Eficientes Para El Agua De Uso Agrícola En La Comarca Lagunera. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 10: 539-550. https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295

Romano, G., Salvati, N., & Guerrini, A. (2016). An empirical analysis of the determinants of water demand in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 130: 74–81. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.141

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2021). "Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia". Ciudad de México. Disponible en: https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias [Consultado: marzo, 2021]

Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera (SIAP). (2020). "Anuario Estadístico de la Producción Agrícola". Ciudad de México. Disponible en: https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430 [Consultado: julio, 2021]

Takayama, T. y Judge, G.G. (1971). *Spatial and Temporal Price and Allocation Models*, Amsterdam: North-Holland Publishing Company. 528 p.

Torres-Sombra J., García-Salazar, J. A., García-Mata, R., Matus-Gardea. J., González-Estrada, E., & Pérez-Zamorano, A. (2013). Respuesta de la demanda de agua a cambios en el precio: un estudio por tipo de consumidor en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 47: 293–307. https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1020/1020

Torres-Sombra, J., & García-Salazar, J. A. (2015). Uso del agua en el norte de Sinaloa: ¿A cuál consumidor asignar el recurso? *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6: 167–173. http://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1214/1117

El ADN propio como DAMP y su potencial como inmunoestimulante vegetal

Flor de Dalia Durán Flores[1] y Martin Heil[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Las plantas y los mamíferos perciben fragmentos de ADN extracelular o citoplasmático como patrones moleculares asociados al daño (DAMPs) y activan respuestas inmunitarias innatas. Mientras que los mamíferos responden más intensamente al ADN no propio y pueden sufrir autoinmunidad o inflamación crónica al reconocer ADN propio, las plantas muestran el patrón opuesto. En diversas especies como el maíz, arroz, frijol común, frijol lima, lechuga, durazno y Arabidopsis, el ADN vegetal fragmentado induce respuestas altamente específicas frente al ADN propio y no propio. Sin embargo, faltaba demostrar si estas respuestas se traducen en resistencia y mayor rendimiento en campo.
Tratamos plántulas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* cv. Negro San Luis) con ADN propio y con ADN no propio de una especie congenérica (*Phaseolus lunatus*) y otra más distantemente emparentada de la misma familia (*Acacia farnesiana*). Solo el ADN propio indujo ácido jasmónico (AJ), lo que se asoció con una reducción del daño causado por un herbívoro masticador. En cambio, tanto el ADN propio como el no propio indujeron el ácido salicílico (AS) y redujeron las infecciones por diversos hongos y bacterias patógenos. En condiciones de campo abierto, una sola aplicación de ADN propio aumentó el rendimiento aproximadamente 1.5 veces en la temporada de lluvias y 3.2 veces en la temporada seca. Estos resultados señalan al ADN propio como un bioestimulante o inmunoestimulante prometedor para estrategias preventivas de control biológico de plagas y enfermedades vegetales.

Palabras clave: ADN extracelular, control biológico, damage-associated molecular pattern, frijol común, resistencia inducida.

Abstract.

Plants and mammals sense extracellular or cytoplasmatic DNA fragments as damage-associated molecular patterns (DAMPs) and respond with the activation of an innate immune response. While mammals show stronger responses to non-self (i.e. microbial or viral) DNA and suffer from autoimmune diseases or chronic inflammation when responding to self-DNA, plants show the opposite pattern. Diverse studies reported for maize, rice, lettuce, common bean, lima bean, Arabidopsis and other species that a treatment with fragmented plant DNA triggers a highly self/non-self-specific immune response.

[1]Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Unidad Irapuato, Km 9.6 Libramiento Norte, Carretera Irapuato–León, C.P. 36824, Irapuato, Guanajuato, México.dalia.azul@gmail.com, correspondencia: martin.heil@cinvestav.mx

However, it remained to be studied whether the reported early signalling responses and changes in gene expression translate to phenotypic resistance to biological enemies and, ultimately, enhance yield under realistic field conditions.
Here, we treated common bean (*Phaseolus vulgaris*, cultivar Negro San Luis) plantlets with self-DNA and with non-self-DNA from a congeneric species (lima bean, *P. lunatus*) and from a more distantly related species in the same family (*Acacia farnesiana*). We observed a specific induction of jasmonic acid (JA) only by self-DNA, which was associated with decreased damage caused by a chewing herbivore. By contrast, salicylic acid (SA) was induced by self- and non-self-DNA to similar degrees, which was also reflected in reduced infection rates by several pathogenic fungi and bacteria. Most importantly, under open field conditions, a single self-DNA-treatment increased yield ca. 1.5-fold in the rainy season and 3.2-fold in the dry season, respectively. We suggest that self-DNA merits attention as a bio- or immunostimulant for future, preventive strategies in the biological control of pests and plant diseases.

Keywords: biological control, damage-associated molecular pattern, extracellular DNA, induced resistance, innate immunity.

Introducción

La agricultura debe aumentar el rendimiento y, al mismo tiempo, reducir el uso de plaguicidas (FAO, 2018). En este contexto, los bioestimulantes y elicitores de resistencia pueden contribuir a sustituir estrategias curativas por protección biológica preventiva. El frijol común es un cultivo básico de gran importancia en México y en otras regiones (Ntatsi et al., 2020), su producción mundial supera 23 millones de toneladas (Gepts, 2001) y aporta una fracción considerable de las calorías y proteínas consumidas por numerosas familias rurales (Nadeem et al., 2021; Uebersax et al., 2023).

Diversos extractos de algas o de plantas, ácidos húmicos y fúlvicos, microorganismos, quitosano y hidrolizados de proteínas se utilizan como bioestimulantes para mejorar el estatus de nutrición de las plantas y promover su crecimiento (Rouphael & Colla, 2020; Pereira et al., 2021). Interesantemente, algunos de estos preparados también aumentan el nivel de resistencia de la planta ante sus enemigos naturales, como las plagas y los patógenos. Al menos para el caso de los extractos de algas y hojas, se propuso que este efecto podría resultar de los efectos inmunoestimulantes del ADN vegetal o de otros patrones moleculares asociados al daño (DAMPs, por sus siglas en Inglés damage-associated molecular patterns) (Quintana-Rodriguez et al., 2018). Entre las señales identificadas recientemente se encuentra el ADN propio fragmentado. Originalmente, el ADN propio se reportó como causante de una inhibición transitoria del crecimiento (Mazzoleni et al., 2015a,b). Sin embargo, en mamíferos, los efectos inmunogénicos del ADN son bien establecidos (Paludan & Bowie, 2013; Chen et al., 2016; Ablasser & Chen, 2019; Heil & Vega-Muñoz, 2019). Tomando en cuenta también que la respuesta inmune de las plantas tiene un costo (Heil et al., 2000; Heil & Baldwin, 2002), que frecuentemente se manifiesta como una inhibición del crecimiento y contemplando, además, Matzinger's modelo del peligro, según el cual moléculas propias fragmentadas o fuera de su compartimento funcionan como señales de daño (Matzinger, 1994; 2002), se propuso que el llamado efecto Mazzoleni resulta de respuesta inmunológica costosa al ADN propio (Duran-Flores & Heil, 2015).

El ADN propio activa señales tempranas y genes de defensa en numerosas especies vegetales (Barbero et al., 2016, 2021; Duran-Flores & Heil, 2018; Vega-Muñoz et al., 2018, 2023; Chiusano et al., 2021; Rassizadeh et al., 2021; Li et al., 2023; Tjia et al., 2023; Zhou et al., 2023), y puede aumentar la resistencia fenotípica frente a insectos, hongos, oomicetos y bacterias (Duran-Flores & Heil, 2018; Rassizadeh et al., 2021, 2024, 2026; Cunha-Chiamolera et al., 2024; Zou et al., 2024).

Los efectos suelen ser mayores con ADN propio que con ADN no propio (Duran-Flores & Heil, 2018; Rassizadeh et al., 2021; Vega-Muñoz et al., 2023). La respuesta vegetal contrasta con las patologías inflamatorias causadas por el reconocimiento de ADN propio en animales (Kopfnagel et al., 2018; Ablasser & Chen, 2019; Heil, 2024). En plantas, varios estudios vinculan esta señal con el ácido jasmónico (AJ), sin embargo, la inmunidad frente a enemigos bióticos depende también del ácido salicílico (AS) (Glazebrook, 2005; Van Loon et al., 2006; Pieterse et al., 2012; Wasternack & Feussner, 2018) y ambos circuitos pueden mostrar antagonismo (Heil & Bostock, 2002; Thaler et al., 2012). Se planteó, por tanto, si el ADN exógeno induce ambos reguladores, si la respuesta es específica y si se traduce en resistencia y rendimiento.

Materiales y Métodos

Material biológico y tratamientos. El presente trabajo se realizó usando *P. vulgaris* cv. Negro San Luis Como como modelo. Plantas de cuatro semanas de edad cultivadas en un invernadero se usaron como fuente de ADN propio y para estudiar el efecto del tratamiento con ADN sobre los niveles de las hormonas SA y JA y sobre la resistencia ante un herbívoro y ocho microorganismos patogénicos, mientras plantas sembradas y cultivadas en un campo abierto establecido en CINVESTAV-Irapuato (20°43′13″ N, 101°19′43″ O; 1730 m s.n.m.) se usaron para investigar los efectos sobre el rendimiento. Como fuentes de ADN no propio usamos usaron frijol lima (*Phaseolus lunatus*) y *Acacia farnesiana*.

Extracción y fragmentación del ADN. El ADN se extrajo con el método de Dellaporta et al. (1983), se purificó, cuantificó por espectrofotometría y fragmentó por sonicación hasta obtener fragmentos menores de 1000 pb. Las soluciones se prepararon en Tween 20 al 0.05%; salvo en el ensayo de dosis, se aplicaron 50 µg mL^{-1} hasta humedecer ambas superficies foliares.

Hormonas y bioensayos. La extracción de AJ siguió a Pluskota et al. (2007) y la de AS a Malamy et al. (1992) y Meuwly & Metraux (1993). Ambos compuestos se cuantificaron mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Para AJ y AS se usaron seis plantas por tratamiento. El daño por una larva de quinto estadio de *Spodoptera frugiperda* se midió después de 24 h (n = 7). Cuatro bacterias y cuatro hongos se inocularon en plantas tratadas y se cuantificaron como unidades formadoras de colonias (n = 10).

Ensayo de campo y análisis estadístico. Se establecieron 12 bloques (tres por tratamiento) en dos ciclos de 2018. Las plantas recibieron una sola aplicación foliar de ADN y completaron su ciclo sin plaguicidas. Se cosecharon las siete plantas centrales de cada bloque y se registró la masa total de semilla. Los efectos se evaluaron mediante modelos lineales generales o ANOVA y comparaciones de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Resultados y Discusión

Respuesta hormonal específica y resistencia al herbívoro

El ADN propio indujo AJ y AS, aunque con cinéticas diferentes. El AJ alcanzó su máximo 30 min después del tratamiento y mostró una respuesta óptima a 50 µg mL^{-1} (Duran-Flores & Heil, submitted); el AS aumentó a partir de 8 h y llegó al máximo a las 24 h. El nivel máximo del AS se observó después del tratamiento con todas concentraciones del ADN ≥ 50 µg mL^{-1}. Por ello se seleccionaron 50 µg mL^{-1} para los experimentos posteriores.

La comparación filogenética incluyó ADN no propio de *P. lunatus* y *A. farnesiana*, como establecido en un estudio anterior (Duran-Flores & Heil, 2018). Solamente el ADN propio incrementó significativamente el AJ (Figura 1A), en contraste, los tres tipos de ADN elevaron el AS sin diferencias estadísticas entre ellos (Figura 1B). Esta separación revela que el reconocimiento del ADN no activa una única ruta y que la especificidad depende del componente hormonal evaluado.

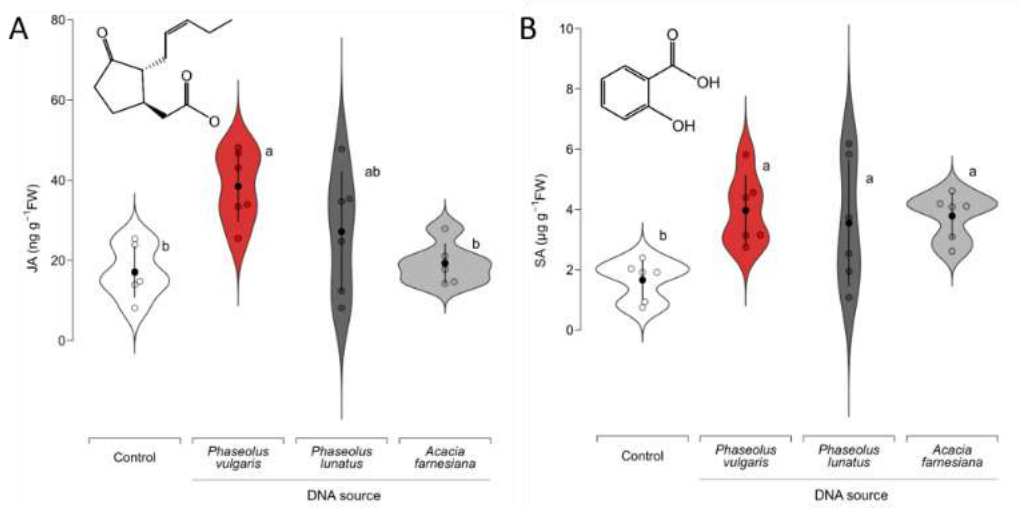


Figura 1. Inducción diferencial de las hormonas de defensa por ADN de diferentes fuentes.

Los gráficos de violín muestran la distribución de frecuencias de (A) la concentración de ácido jasmónico (AJ), expresada en nanogramos de AJ por gramo de peso fresco foliar (PF), 30 min después del tratamiento, y (B) la concentración de ácido salicílico (AS), expresada en microgramos por gramo de peso fresco foliar (PF), 24 h después de tratar plantas de frijol común con 50 µg ml^{-1} de ADN propio (*Phaseolus vulgaris*, rojo), ADN no propio (*Phaseolus lunatus* y *Acacia farnesiana*, gris oscuro y gris claro, respectivamente) o 0 µg ml^{-1} de ADN (control, violín blanco). Los elementos incluidos en los violines indican las medias (puntos negros) ± 1 DE; letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA univariado y prueba post hoc de Tukey: $P < 0.05$, $n = 6$).

En la mayoría de las plantas, el AJ controla la defensa contra herbívoros masticadores y patógenos necrótrofos, mientras que el AS controla la resistencia contra patógenos biótrofos. En concordancia con la respuesta de AJ, solo el ADN propio redujo significativamente el daño foliar causado por *S. frugiperda*, reduciéndolo de ca 7% de área foliar dañada en plantas control a menos de 0.5% en plantas tratadas con ADN propio, mientras el ADN de *P. lunatus* produjo

una reducción intermedia no significativa y el de *A. farnesiana* no tuvo efecto detectable (Figura 2A). Al contrario, ADN propio como no proprio redujo la densidad poblacional de varios microorganismos patogénicos (Figura 2B,C). La densidad poblacional de los microorganismos se utilizó como aproximación de su aptitud reproductiva. Aunque los tratamientos no afectaron a *Colletotrichum lindemuthianum* ni a *Fusarium oxysporum* (Duran-Flores & Heil, submitted), tratamientos con los tres tipos de ADN redujeron significativamente a la densidad de los hongos *Botrytis cinerea* y *Sclerotinia sclerotiorum* (Figura 2B) y de las bacterias *Enterobacter* sp. strain FCB1 *y Pseudomonas syringae* pv. *phaseoli* (Figura 2C) igual como *Pseudomonas syringae* pv. *syringae y Xanthomonas phaseoli* (Duran-Flores & Heil, submitted). Para ninguno de los ocho microorganismos hubo diferencias entre ADN propio y no propio, patrón congruente con la inducción no específica de AS (Figura 2B,C).

Aunque el ADN extracelular puede mostrar actividad antimicrobiana directa, ninguno de los tres tipos de ADN inhibió a los patógenos en medio de cultivo. Por tanto, la reducción observada en planta se explica mejor por la activación de defensas del hospedero que por toxicidad directa.

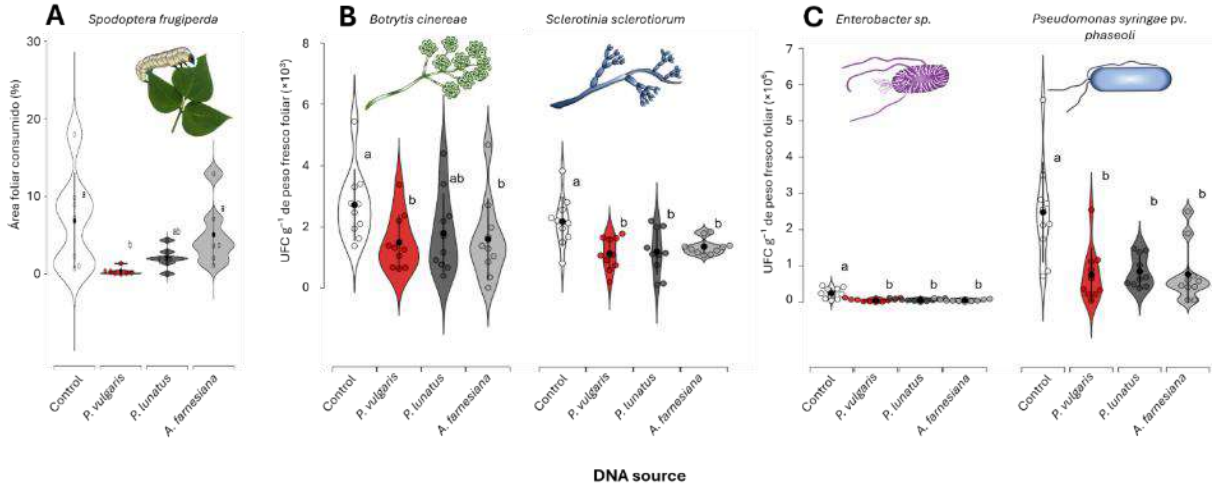


Figura 2. Diferentes grados de especificidad en la inducción de resistencia frente a un herbívoro y cuatro patógenos.

Los gráficos de violín muestran la distribución de frecuencias de (A) la herbivoría causada por larvas de *Spodoptera frugiperda*, (B) las unidades formadoras de colonias (UFC) de los patógenos fúngicos *Botrytis cinerea* y *Sclerotinia sclerotiorum*, y (C) las UFC de los patógenos bacterianos *Enterobacter* sp. cepa FCB1 y *Pseudomonas syringae* pv. *phaseoli*. La herbivoría se cuantificó como el porcentaje de área foliar perdida por la alimentación de una larva por hoja durante 24 h, después de tratar plantas de *Phaseolus vulgaris* con 50 µg ml^{-1} de ADN propio (*Phaseolus vulgaris*, rojo) o ADN no propio (*Phaseolus lunatus* y *Acacia farnesiana*, gris oscuro y gris claro, respectivamente). Los patógenos microbianos se inocularon 5 min después de aplicar los mismos tratamientos de ADN, y las hojas se recolectaron después de ocho días para las bacterias o quince días para los hongos, con el fin de determinar las UFC. Los elementos incluidos en los violines indican las medias (puntos negros) ± 1 DE; los violines blancos representan los controles (0 µg ml^{-1} de ADN), y las letras diferentes situadas sobre los violines indican diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA univariado y prueba *post hoc* de Tukey: $P < 0.05$; $n = 7$ en A y $n = 10$ en B y C).

Rendimiento en campo

Los beneficios reproductivos de una resistencia inducida dependen del ambiente y de sus costos (Heil, 2002; Heil & Baldwin, 2002; Heidel & Dong, 2006; Heil & Walters, 2009). En ambos ciclos de campo hubo un efecto significativo del tratamiento. En lluvias, el ADN propio incrementó el rendimiento aproximadamente 1.5 veces y el ADN no propio no produjo cambios detectables. En sequía, los tres tratamientos aumentaron la producción, pero el efecto fue mayor con ADN propio (3.2 veces) que con ADN de *P. lunatus* (2.3 veces) o *A. farnesiana* (2.2 veces) (Figura 3).

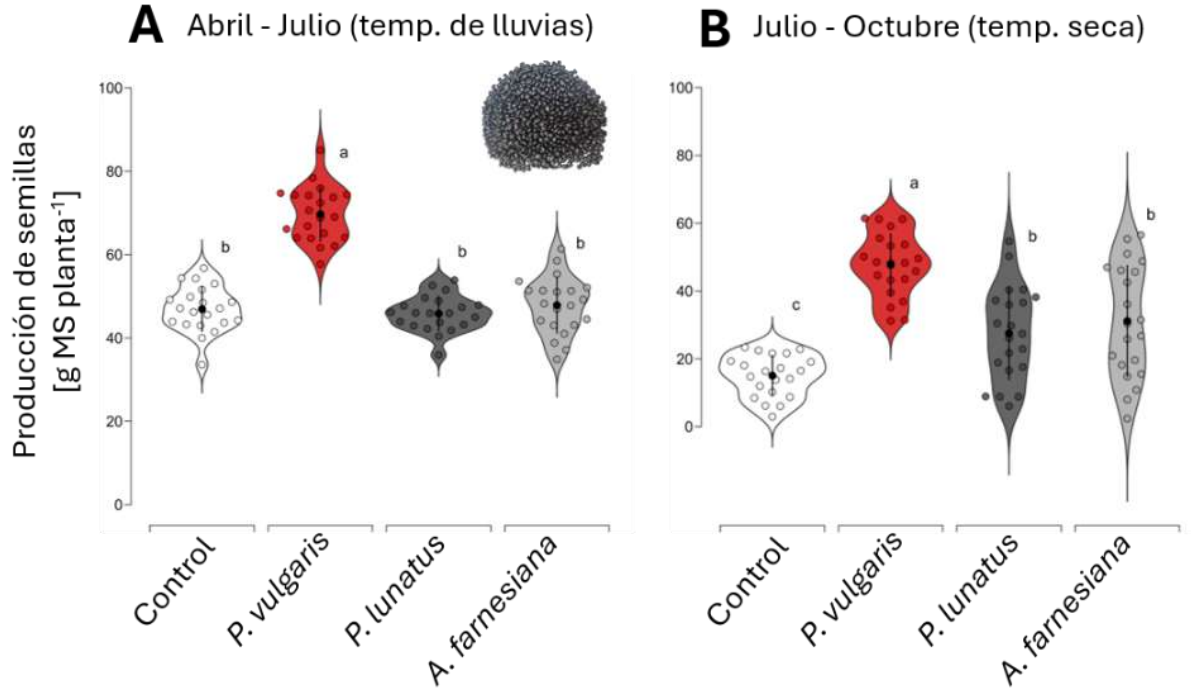


Figura 3. El tratamiento con ADN propio aumenta la producción de semillas bajo la presión de enemigos naturales. Los gráficos de violín muestran la distribución de frecuencias de la producción de semillas, expresada en gramos de masa seca de semillas por individuo, de plantas de *Phaseolus vulgaris* cultivadas en campo durante la temporada de lluvias (panel A) y la temporada seca (panel B).

Las plantas fueron tratadas una sola vez, a las cuatro semanas de edad, con 50 µg ml^{-1} de ADN propio (*Phaseolus vulgaris*, rojo) o ADN no propio (*Phaseolus lunatus* y *Acacia farnesiana,* gris oscuro y gris claro, respectivamente). Los violines blancos representan los controles (0 µg ml^{-1} de ADN). Los elementos incluidos en los violines indican las medias (puntos negros) ± 1 DE; las letras diferentes situadas sobre los violines indican diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA y prueba post hoc de la diferencia mínima significativa de Fisher: $P < 0.05$; n = 3 bloques de 7 individuos).

Conclusiones y perspectivas

El ADN propio induce una respuesta inmune en plantas y mamíferos, y en frijol, esta respuesta tiene un resultado neto benéfico: aumentó la resistencia contra los enemigos bióticos de la planta y - bajo condiciones de campo abierto - elevó el rendimiento. Los aumentos en el rendimiento se lograron sin usar pesticidas. Por lo tanto, parece que usar el ADN propio como inmunoestimulante abre nuevos caminos hacía estrategias preventivas en el control biológico, al menos en cultivos de frijol. Lamentablemente, el diseño experimental no permite atribuir el aumento del rendimiento exclusivamente a la defensa. También deben considerarse un aporte de fósforo, un efecto bioestimulante conforme a la definición regulatoria (European Union, 2019), o una mayor tolerancia al estrés abiótico. Las plantas podrían absorber el ADN como nutrimento, aunque esto hasta la fecha se ha demostrado principalmente en raíces (Paungfoo-Lonhienne et al., 2010). Por lo tanto, futuros estudios deberán identificar los mecanismos moleculares que causan el aumento del rendimiento observado. Además, la alta especificidad del efecto y la resultante necesidad de extraer ADN del mismo cultivo pueden generar problemas logísticos y de aceptación, sobre todo en cuando el ADN se usa para tartar semillas, y se requieren escrutinios de diferentes cultivos para entender si los efectos benéficos observados son un efecto específico del frijol o si el ADN propio realmente tiene potencial como un inmunoestimulante universal para los cultivos.

Agradecimientos

Se agradece a Rosa-María Adame-Álvarez y José-Luis Hernández-Flores por el apoyo técnico; a Isaac Vega-Muñoz por las gráficas; y a Patricia Sánchez-García, Silvia Sánchez-García y Rosa-María Adame-Álvarez por el trabajo de campo. El estudio recibió apoyo de CONACyT (258119, 278283 y 394371), IDEA GTO (IDEAGTO/CONV/014/2022) y SECIHTI (PEE-2025-G-403). Para la traducción y condensación lingüística se utilizó ChatGPT (OpenAI); los autores revisaron y asumieron responsabilidad por el contenido final.

Literatura Citada

Ablasser, A. & Chen, Z.J.J. (2019). cGAS in action: Expanding roles in immunity and inflammation. *Science* 363(6431): eaat8657. https://doi.org/10.1126/science.aat8657

Barbero, F., Guglielmotto, M., Capuzzo, A. & Maffei, M.E. (2016). Extracellular Self-DNA (esDNA), but not heterologous plant or insect DNA (etDNA), induces plasma membrane depolarization and calcium signaling in Lima bean (*Phaseolus lunatus*) and maize (*Zea mays*). *International Journal of Molecular Sciences* 17(10): 1659. https://doi.org/10.3390/ijms17101659

Barbero, F., Guglielmotto, M., Islam, M. & Maffei, M.E. (2021). Extracellular fragmented self-DNA is involved in plant responses to biotic stress. *Frontiers in Plant Science* 12(1558): 686121. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.686121

Chen, Q., Sun, L.J. & Chen, Z.J.J. (2016). Regulation and function of the cGAS-STING pathway of cytosolic DNA sensing. *Nature Immunology* 17(10): 1142–1149. https://doi.org/10.1038/ni.3558

Chiusano, M.L., Incerti, G., Colantuono, C., Termolino, P., Palomba, E., Monticolo, F., et al. (2021). *Arabidopsis thaliana* response to extracellular DNA: self versus nonself exposure. *Plants* 10(8): 1744. https://doi.org/10.3390/plants10081744

Cunha-Chiamolera, T.P.L., Urrestarazu, M., Carbajal-Valenzuela, I.A., Ramos, J.B., Ortega, R., Miralles, I., et al. (2024). Extracellular fragmented self-DNA displays biostimulation of lettuce in soilless culture. *Horticulturae* 10(9): 964. https://doi.org/10.3390/horticulturae10090964

Dellaporta, S.L., Wood, J. & Hicks, J.B. (1983). A plant DNA minipreparation: Version II. *Plant Molecular Biology Reporter* 1:19–21. https://doi.org/10.1007/BF02712670

Duran-Flores, D. & Heil, M. (2015). Growth inhibition by self-DNA: a phenomenon and its multiple explanations. *New Phytologist* 207(3): 482–485. https://doi.org/10.1111/nph.13542

Duran-Flores, D. & Heil, M. (2018). Extracellular self-DNA as a damage-associated molecular pattern (DAMP) that triggers self-specific immunity induction in plants. *Brain, Behavior, and Immunity* 72:78–88. https://doi.org/10.1016/j.bbi.2017.10.010

Duran-Flores, D. & Heil, M. (in press). Self-DNA acts as an immunostimulant for common bean (*Phaseolus vulgaris*) that induces defence against pests and diseases and increases seed yield. *Crop Health*, in press

European Union (2019). Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/200. *Official Journal of the European Union* 62L170–171–127

FAO (2018). *Transformar la alimentación y la agricultura para alcanzar los ODS.* Rome: FAO.

Gepts, P. (2001). "*Phaseolus vulgaris* (Beans)," in *Encyclopedia of Genetics,* eds. S. Brenner & J.H. Miller. (New York: Academic Press), pp. 1444–1445.

Glazebrook, J. (2005). Contrasting mechanisms of defense against biotrophic and necrotrophic pathogens. *Annual Review of Phytopathology* 43: 205–227. https://doi: 10.1146/annurev.phyto.43.040204.135923

Heidel, A.J. & Dong, X.N. (2006). Fitness benefits of systemic acquired resistance during *Hyaloperonospora parasitica* infection in *Arabidopsis thaliana*. *Genetics* 173(3): 1621–1628. https://doi:10.1534/genetics.106.059022

Heil, M. (2002). Ecological costs of induced resistance. *Current Opinion in Plant Biology* 5(4): 345–350

Heil, M. (2024). Self-DNA driven inflammation in COVID-19 and after mRNA-based vaccination: lessons for non-COVID-19 pathologies. *Frontiers in Immunology* 14:1259879. https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1259879

Heil, M. & Baldwin, I.T. (2002). Fitness costs of induced resistance: emerging experimental support for a slippery concept. *Trends in Plant Science* 7(2): 61–67. https://doi.org/10.1016/S1360-1385(01)02186-0

Heil, M. & Bostock, R.M. (2002). Induced systemic resistance (ISR) in the context of induced plant defences. *Annals of Botany* 89(5): 503–512. https://doi.org/10.1093/aob/mcf076

Heil, M., Hilpert, A., Kaiser, W. & Linsenmair, K.E. (2000). Reduced growth and seed set following chemical induction of pathogen defence: does systemic acquired resistance (SAR) incur allocation costs? *Journal of Ecology* 88(4): 645–654. https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00479.x

Heil, M. & Vega-Muñoz, I. (2019). Nucleic acid sensing in mammals and plants - facts and caveats. *International Review of Cell and Molecular Biology* 345: 225–285. https://doi.org/10.1016/bs.ircmb.2018.10.003

Heil, M. & Walters, D.R. (2009). "Ecological consequences of plant defence signalling," in *Advances in Botanical Research - Plant Innate Immunity,* ed. L.C. Van Loon. (Amsterdam: Elsevier), pp 667–716.

Kopfnagel, V., Wagenknecht, S., Harder, J., Hofmann, K., Kleine, M., Buch, A., et al. (2018). RNase 7 strongly promotes TLR9-mediated DNA sensing by human plasmacytoid dendritic cells. *Journal of Investigative Dermatology* 138(4): 872–881. https://doi.org/10.1016/j.jid.2017.09.052

Li, C., Wang, K., Zou, Y., Lei, C., Chen, Z. & Zheng, Y. (2023). Extracellular self-DNA induced a PTI-related local defence against *Rhizopus* rot in postharvest peach fruit. *Postharvest Biology and Technology* 200: 112306. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112306

Malamy, J., Hennig, J. & Klessig, D.F. (1992). Temperature-dependent induction of salicylic acid and its conjugates during the resistance response to *Tobacco Mosaic Virus* infection. *The Plant Cell* 4: 359–366

Matzinger, P. (1994). Tolerance, danger, and the extended family. *Annual Review of Immunology* 12(1): 991–1045. https://doi:10.1146/annurev.iy.12.040194.005015

Matzinger, P. (2002). The danger model: A renewed sense of self. *Science* 296(5566): 301–305. https://doi.org/10.1126/science.1071059

Mazzoleni, S., Bonanomi, G., Incerti, G., Chiusano, M.L., Termolino, P., Mingo, A., et al. (2015a). Inhibitory and toxic effects of extracellular self-DNA in litter: a mechanism for negative plant–soil feedbacks? *New Phytologist* 205(3): 1195–1210. https://doi.org/10.1111/nph.13121

Mazzoleni, S., Cartenì, F., Bonanomi, G., Senatore, M., Termolino, P., Giannino, F., et al. (2015b). Inhibitory effects of extracellular self-DNA: a general biological process? *New Phytologist* 206(1): 127–132. https://doi.org/10.1111/nph.13306

Meuwly, P. & Metraux, J.P. (1993). Ortho-anisic acid as internal standard for the simultaneous quantitation of salicylic acid and its putative biosynthetic precursors in cucumber leaves. *Analytical Biochemistry* 214(2): 500–505. https://doi.org/10.1006/abio.1993.1529

Nadeem, M.A., Yeken, M.Z., Shahid, M.Q., Habyarimana, E., Yılmaz, H., Alsaleh, A., et al. (2021). Common bean as a potential crop for future food security: an overview of past, current and future contributions in genomics, transcriptomics, transgenics and proteomics. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 35(1): 759–787. https://doi.org/10.1080/13102818.2021.1920462

Ntatsi, G., Karkanis, A., Tran, F., Savvas, D. & Iannetta, P.P.M. (2020). Which agronomic practices increase the yield and quality of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)? A systematic review protocol. *Agronomy* 10(7): 1008. https://doi.org/10.3390/agronomy10071008

Paludan, S.R. & Bowie, A.G. (2013). Immune sensing of DNA. *Immunity* 38(5): 870–880. https://doi.org/10.1016/j.immuni.2013.05.004

Paungfoo-Lonhienne, C., Lonhienne, T.G.A., Mudge, S.R., Schenk, P.M., Christie, M., Carroll, B.J., et al. (2010). DNA is taken up by root hairs and pollen, and stimulates root and pollen tube growth. *Plant Physiology* 153: 799–805. https://doi.org/10.1104/pp.110.154963

Pereira, R.V., Filgueiras, C.C., Dória, J., Peñaflor, M.F.G.V. & Willett, D.S. (2021). The effects of biostimulants on induced plant defense. *Frontiers in Agronomy* 3: 630596. https://doi.org/10.3389/fagro.2021.630596

Pieterse, C.M.J., Van der Does, D., Zamioudis, C., Leon-Reyes, A. & Van Wees, S.C.M. (2012). Hormonal modulation of plant immunity. *Annual Review of Cell and Developmental Biology* 28(1): 489–521. https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-092910-154055

Pluskota, W.E., Qu, N., Maitrejean, M., Boland, W. & Baldwin, I.T. (2007). Jasmonates and its mimics differentially elicit systemic defence responses in *Nicotiana attenuata*. *Journal of Experimental Botany* 58: 4071–4082. https://doi:10.1093/jxb/erm263

Quintana-Rodriguez, E., Duran-Flores, D., Heil, M. & Camacho-Coronel, X. (2018). Damage-associated molecular patterns (DAMPs) as future plant vaccines that protect crops from pests. *Scientiae Horticulturae* 237: 207–220. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.026

Rassizadeh, L., Cañadas, E., Cervero, R., Flors, V. & Gamir, J. (2024). Extracellular DNA induces resistance against *Frankliniella occidentalis* through callose accumulation. *Journal of Pest Science* 97: 2035–2046. https://doi.org/10.1007/s10340-023-01733-2

Rassizadeh, L., Cervero, R., Flors, V. & Gamir, J. (2021). Extracellular DNA as an elicitor of broad-spectrum resistance in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* 312: 111036. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.111036

Rassizadeh, L., Garcia-Molina, A., Flors, V., Vega-Muñoz, I. & Gamir, J. (2026). Extracellular DNA triggers glucosinolate-dependent defence responses against *Frankliniella occidentalis*. *BMC Plant Biology* publ. online 12 March 2026. https://doi.org/10.1186/s12870-026-08533-7

Rouphael, Y. & Colla, G. (2020). Editorial: Biostimulants in Agriculture. *Frontiers in Plant Science* 11: 40. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040

Thaler, J.S., Humphrey, P.T. & Whiteman, N.K. (2012). Evolution of jasmonate and salicylate signal crosstalk. *Trends in Plant Science* 17(5): 260–270

Tjia, T.O.S., Meitha, K., Septiani, P., Awaludin, R. & Sumardi, D. (2023). Extracellular self-DNA induces local inhibition of growth, regulates production of reactive oxygen species, and gene expression in rice roots. *Biologia plantarum* 67(1): 9–18. https://doi.org/10.32615/bp.2022.037

Uebersax, M.A., Cichy, K.A., Gomez, F.E., Porch, T.G., Heitholt, J., Osorno, J.M., et al. (2023). Dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a vital component of sustainable agriculture and food security—A review. *Legume Science* 5(1): e155. https://doi.org/10.1002/leg3.155

Van Loon, L.C., Rep, M. & Pieterse, C.M.J. (2006). Significance of inducible defense-related proteins in infected plants. *Annual Review of Phytopathology* 44: 135–162

Vega-Muñoz, I., Feregrino-Pérez, A.A., Torres-Pacheco, I. & Guevara-González, R.G. (2018). Exogenous fragmented DNA acts as a damage-associated molecular pattern (DAMP) inducing changes in CpG DNA methylation and defence-related responses in *Lactuca sativa*. *Functional Plant Biology* 45(10): 1065–1072. https://doi.org/10.1071/FP18011

Vega-Muñoz, I., Herrera-Estrella, A., Martínez-de la Vega, O. & Heil, M. (2023). ATM and ATR, two central players of the DNA damage response, are involved in the induction of systemic acquired resistance by extracellular DNA, but not the plant wound response. *Frontiers in Immunology* 14: 1175786. https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1175786

Wasternack, C. & Feussner, I. (2018). The oxylipin pathways: biochemistry and function. *Annual Review of Plant Biology* 69: 363–386. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040440

Zhou, X., Gao, H., Zhang, X., Khashi u Rahman, M., Mazzoleni, S., Du, M., et al. (2023). Plant extracellular self-DNA inhibits growth and induces immunity via the jasmonate signaling pathway. *Plant Physiology* 192(3): 2475–2491. https://doi.org/10.1093/plphys/kiad195

Zou, Y., Yang, S., Ren, Q., Chen, J., Wang, K., Li, C., et al. (2024). Extracellular self-DNA as a DAMP signal for induced systemic resistance to anthracnose rot in postharvest loquat fruit via EjRAV2-EjERF39 module. *Postharvest Biology and Technology* 216: 113023. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.113023

Sistema automático de bajo costo para estimar el requerimiento de agua del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) en condiciones de invernadero y cielo abierto

Graciano Javier Aguado Rodríguez[1], Abel Quevedo Nolasco[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

El manejo eficiente del agua representa uno de los principales retos de la agricultura debido a la creciente demanda del recurso hídrico. En este trabajo se desarrolló y evaluó un sistema automático de monitoreo y riego basado en sensores de humedad del suelo tipo FDR y una tarjeta Arduino Mega 2560, con el propósito de estimar el agua requerida durante el ciclo del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.). El sistema fue evaluado en condiciones de invernadero y a cielo abierto durante dos periodos experimentales de 32 días cada uno. En el primer periodo se utilizó suelo franco y en el segundo un sustrato areno-terroso. El sistema registró automáticamente la humedad del suelo, los eventos de riego y, en condiciones de cielo abierto, la precipitación. Los resultados mostraron que durante el primer periodo el requerimiento de agua promedio de agua fue de 9.86 L maceta^{-1} a cielo abierto y 7.65 L maceta^{-1} en invernadero. En el segundo periodo experimental el requerimiento de agua fue de 2.44 L maceta^{-1} a cielo abierto y 5.38 L maceta^{-1} en invernadero. En todos los tratamientos el sistema mantuvo el contenido de humedad del suelo cercano al umbral establecido por el usuario, activando automáticamente el riego únicamente cuando fue necesario. La metodología desarrollada permitió estimar el agua aplicada durante el ciclo del cultivo y constituye una alternativa de bajo costo que puede adaptarse a otros cultivos para generar información de referencia sobre sus requerimientos hídricos y apoyar una programación más eficiente del riego.

Palabras clave: humedad de suelo, riego automático, agricultura de precisión, eficiencia del agua.

Abstract

Efficient water management has become one of the major challenges in agriculture due to the increasing demand for water resources. In this study, a low-cost automatic monitoring and irrigation system based on a Frequency Domain Reflectometry (FDR) soil moisture sensor and an Arduino Mega 2560 board was developed and evaluated to estimate the water requirement throughout the growing cycle of radish (*Raphanus sativus* L.). The system was tested under greenhouse and open-field conditions during two 32-day experimental periods. Loam soil was used during the first period, whereas sandy loam soil was evaluated during the second period. The system automatically recorded soil moisture, irrigation events, and, under open-field conditions, rainfall.

[1]SECIHTI-COLPOS Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco Km 36.5 Montecillo, Texcoco, Edo. Mex. gjaguadoro@secihti.mx
[2]Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco Km 36.5 Montecillo, Texcoco, Edo. Mex. anolasco@colpos.mx

During the first experimental period, the average water requirement was 9.86 L pot^{-1} under open-field conditions and 7.65 L pot^{-1} in the greenhouse. During the second experimental period, the corresponding values were 2.44 L pot^{-1} and 5.38 L pot^{-1}, respectively. In all treatments, the system maintained soil moisture close to the user-defined threshold, activating irrigation only when required. The proposed methodology allowed automatic estimation of the crop water requirement throughout the growing cycle and represents a low-cost alternative that can be adapted to other crops to generate reference information for irrigation planning and more efficient water management.

Keywords: soil moisture, automatic irrigation, precision agriculture, water use efficiency.

Introducción

El agua es un recurso indispensable para la producción agrícola; sin embargo, su disponibilidad es cada vez más limitada debido al crecimiento de la población, la expansión de las actividades productivas y la variabilidad climática. En México, durante 2022, la distribución de los volúmenes concesionados para usos consuntivos correspondió al sector agrícola con el 76.3 %, seguido del abastecimiento público (14.8 %), la industria (4.8 %) y la generación de energía eléctrica (4.1 %) (CONAGUA, 2023). Debido a que la agricultura concentra la mayor demanda del recurso hídrico, resulta necesario desarrollar estrategias que permitan incrementar la eficiencia en el uso del agua y reducir las pérdidas asociadas a métodos tradicionales de riego, como el riego por gravedad.

En los sistemas de riego localizado, uno de los principales retos consiste en determinar la cantidad de agua que debe suministrarse durante el ciclo del cultivo. Flores et al. (2007) señalan que, en tomate, debido a la escasa información sobre sus requerimientos de riego, la calendarización del riego se realiza de manera empírica. Asimismo, Salazar-Moreno et al. (2014) indican que es urgente incrementar la eficiencia en el uso del agua en el sector agrícola, ya que una programación inadecuada del riego puede provocar tanto desperdicio de agua como disminuciones en el rendimiento de los cultivos.

Con el propósito de mejorar el manejo del riego, se han desarrollado diferentes metodologías para estimar los requerimientos hídricos de las plantas. Por ejemplo, Ruelas-Islas (2023) empleó un lisímetro de drenaje para determinar el suministro de agua en tomate y concluyó que las mediciones diarias de transpiración permiten calcular los requerimientos hídricos del cultivo. De manera complementaria, actualmente se dispone de sensores de humedad del suelo, como los basados en las tecnologías FDR y TDR, los cuales constituyen una herramienta confiable para evaluar el estado hídrico del suelo y pueden integrarse a plataformas de adquisición de datos de bajo costo, como Arduino Mega 2560, facilitando el desarrollo de sistemas automatizados para el monitoreo y manejo del riego.

En este contexto, resulta de interés generar información sobre el consumo de agua de cultivos de ciclo corto mediante sistemas automáticos de monitoreo, ya que esta información puede servir como referencia para estimar la disponibilidad de agua requerida durante el desarrollo del cultivo bajo distintas condiciones de producción.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el funcionamiento de un sistema automático de riego basado en sensores de humedad del suelo tipo FDR, implementado tanto

en condiciones de invernadero como a cielo abierto y en dos sustratos contrastantes, con el fin de estimar el requerimiento de agua del cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) durante su ciclo de desarrollo y generar información de referencia para la planeación del suministro de agua en este cultivo.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en las instalaciones del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, y se desarrolló en varias etapas: desarrollo del sistema, establecimiento del experimento, cultivo y adquisición de datos y, tratamiento de los datos.
Desarrollo del sistema. Para el desarrollo del sistema de monitoreo y riego automático se utilizaron sensores de humedad del suelo BGT SEC (Z1), una tarjeta Arduino Mega2560 como unidad principal de control, un módulo de reloj en tiempo real DS1302, una pantalla táctil Thincol de 3.5 pulgadas para la interacción con el usuario, un módulo de almacenamiento microSD con una memoria de 128 GB para el registro de datos y un módulo de cuatro relevadores para el accionamiento de los dispositivos eléctricos. Asimismo, se emplearon conectores de 2.5 mm, 3.5 mm y RJ45, cableado para protoboard, cable calibre 16 AWG, una válvula motorizada de tres cables (US Solids, 9–24 V), además de diversos elementos de fijación y una carcasa fabricada mediante impresión 3D con filamento PLA de 1.75 mm para proteger los componentes electrónicos de las condiciones ambientales. En la Figura 1 se muestra el sistema completamente ensamblado.



Figura 1. Dispositivo para detectar humedad de suelo elaborado.

El programa desarrollado para la tarjeta Arduino Mega2560 fue diseñado para monitorear continuamente el contenido volumétrico de agua del suelo mediante un sensor de humedad. El usuario establecía un umbral mínimo de humedad desde la pantalla táctil y, cuando el valor medido descendía por debajo de dicho nivel, el sistema activaba automáticamente la válvula de riego durante un tiempo previamente programado. Durante el funcionamiento del sistema, las lecturas de humedad del suelo, la fecha y hora de cada medición, así como los eventos de riego, fueron almacenados automáticamente en una memoria microSD para su posterior análisis.

Establecimiento del experimento. El experimento se desarrolló en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México. Con el propósito de evaluar el funcionamiento del sistema automático de monitoreo y riego bajo distintas condiciones de cultivo, se establecieron dos sistemas independientes: uno dentro de un invernadero y otro a cielo abierto (Figura 2).



Figura 2. Establecimiento del sistema de riego a cielo abierto (izquierda) y en invernadero (derecha).

Durante el primer periodo experimental, el cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) se sembró el 24 de abril de 2026 y se cosechó el 26 de mayo de 2026. En ambos sitios se utilizaron macetas con un volumen de 5.225 dm^3 (0.1845 ft^3), las cuales fueron llenadas con suelo franco proveniente de una parcela del Colegio de Postgraduados ubicada en las coordenadas 19.460249° N y -98.903254° O. La textura del suelo fue determinada mediante el método del tacto propuesto por la USDA (2005). En cada sistema se instalaron cuatro macetas, cada una equipada con dos estacas de riego alimentadas por un gotero.

Posteriormente, se realizó un segundo periodo experimental comprendido del 4 de junio al 6 de julio de 2026. En este caso se mantuvo la misma configuración experimental tanto dentro del invernadero como a cielo abierto; sin embargo, el suelo franco fue sustituido por arena con el propósito de evaluar el desempeño del sistema en un sustrato con características hidráulicas diferentes.

La humedad del suelo fue monitoreada mediante un sensor analógico BGT SEC (Z1), el cual se instaló a una profundidad aproximada de 0–5 cm. Debido a las dimensiones del cable del sensor, éste fue colocado con una ligera inclinación para permitir su instalación en la zona central de la maceta sin afectar el desarrollo del cultivo. Los valores analógicos registrados fueron convertidos a contenido volumétrico de agua (% V/V) utilizando la ecuación proporcionada por el fabricante (Shenzhen, 2025).

El sistema de riego de ambos sitios utilizó goteros autocompensados de 8 $L\ h^{-1}$ (modelo PC8, Wade Rain), cada uno alimentando dos estacas de riego. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, dichos goteros requieren una presión mínima de 0.5 bar para iniciar su funcionamiento. Sin embargo, debido a que ambos sistemas fueron abastecidos por gravedad, la altura máxima de la columna de agua fue de aproximadamente 1.1 m, equivalente a una presión cercana a 0.11 bar, insuficiente para activar el mecanismo autocompensado. Por esta razón, todos los goteros fueron desmontados y se retiró el diafragma interno encargado de la

compensación de presión, permitiendo así su operación bajo las condiciones hidráulicas del experimento.

Posteriormente se determinó experimentalmente el gasto real de cada sistema de riego. Para ello, durante un evento de riego con una duración de 165 s, el agua emitida por las ocho estacas (dos por maceta) fue colectada en un recipiente previamente pesado. En el sistema instalado dentro del invernadero se obtuvo un volumen equivalente a 827 mL de agua, mientras que en el sistema a cielo abierto se registraron 443 mL. La diferencia entre ambos sistemas se atribuyó a que únicamente el sistema del invernadero contó con una válvula de admisión-expulsión de aire, favoreciendo un flujo continuo desde el depósito de almacenamiento.

La duración de cada evento de riego se estableció mediante pruebas preliminares, observándose que un tiempo de aplicación de 165 s permitía humedecer más de la mitad de la superficie del sustrato alrededor de los emisores, sin evidenciar drenaje por la parte inferior de las macetas. Este tiempo fue programado como duración fija para todos los eventos de riego realizados durante ambos periodos experimentales.

Cultivo y adquisición de datos. Para el establecimiento del cultivo se utilizó semilla de rábano bola chica (Rancho Los Molinos), con un porcentaje de germinación superior al 96 %, pureza del 99 % y tratamiento fungicida con Thiram. En ambos sitios experimentales (invernadero y cielo abierto) se sembraron cuatro macetas empleando los mismos materiales y el mismo manejo agronómico, con la finalidad de evaluar el funcionamiento del sistema de monitoreo bajo ambas condiciones de cultivo.

En el experimento desarrollado a cielo abierto también se registró la precipitación mediante un pluviómetro de balancín (tipping-bucket rain gauge, modelo WH-SP-RG™, MISOL). Cada evento de basculación (tip), correspondiente a una secuencia encendido-apagado-encendido del interruptor magnético, se interpretó como una precipitación de 0.2794 mm, de acuerdo con las especificaciones del fabricante (Shenzhen Fine Offset Electronics, 2025).

El sistema de adquisición de datos almacenó automáticamente la información en archivos de texto independientes para lluvia y riego. En el archivo de precipitación se registró la fecha, hora y cada evento de basculación detectado por el pluviómetro.

Por otra parte, durante cada evento de riego el sistema registró automáticamente la hora y fecha de inicio y fin del riego, la duración del evento (s), la humedad volumétrica del suelo (%) y la temperatura del suelo (°C). Posteriormente, los registros fueron filtrados para conservar únicamente el instante de inicio de cada riego, ya que éste representa el momento en que el sistema detectó que la humedad del suelo descendió por debajo del umbral establecido por el usuario y activó automáticamente el suministro de agua.

Con la información almacenada fue posible determinar el número de eventos de riego ocurridos durante el ciclo del cultivo y estimar el volumen total de agua aplicado en cada tratamiento.

Tratamiento de los datos. Los archivos generados automáticamente por el sistema fueron procesados en Microsoft Excel®. Las fechas y horas registradas se convirtieron a su representación numérica utilizando el formato interno del programa, obteniendo una variable continua correspondiente al tiempo transcurrido desde el inicio del experimento. Para el primer periodo experimental, desarrollado del 24 de abril al 26 de mayo de 2026, al valor numérico correspondiente a la suma de la fecha y la hora se le restó el valor 46136, correspondiente al 24 de abril de 2026, con lo cual el inicio del experimento quedó definido como el día cero y el final del experimento correspondió al día 32. De manera similar, para el segundo periodo

experimental, realizado del 4 de junio al 6 de julio de 2026, se utilizó como referencia el valor 46177, correspondiente al 4 de junio de 2026, definiendo nuevamente el inicio del experimento como el día cero y el final como el día 32.

La humedad del suelo registrada por la tarjeta Arduino correspondió inicialmente a valores digitales comprendidos entre 0 y 1023. Estos valores fueron convertidos a voltaje considerando un rango de medición de 0 a 5 V y posteriormente transformados a contenido volumétrico de agua (% V/V) utilizando la ecuación propuesta por el fabricante del sensor (Shenzhen, 2025), la cual indica que se tiene que multiplicar el valor que devuelve el sensor el mV por la cantidad de 50. Con esta información se construyeron las gráficas de humedad del suelo a lo largo del ciclo del cultivo para ambos periodos experimentales.

En el experimento desarrollado a cielo abierto, los registros de precipitación también fueron procesados utilizando el valor numérico de la fecha y la hora. Para ello se aplicó el mismo procedimiento empleado en los datos de humedad, definiendo el día cero de acuerdo con la fecha de inicio de cada experimento. Posteriormente, los registros del pluviómetro fueron agrupados en eventos independientes de lluvia considerando una separación mínima de 30 minutos entre registros consecutivos. Cuando el intervalo entre dos registros superó dicho tiempo, se consideró el inicio de un nuevo evento de precipitación. Una vez identificados los eventos, se determinó la precipitación acumulada y el instante de inicio de cada uno de ellos, información que posteriormente fue utilizada para representar gráficamente la ocurrencia y magnitud de las lluvias durante el ciclo del cultivo.

Los registros correspondientes al sistema de riego fueron procesados de manera independiente. Cada evento almacenado por el dispositivo contenía la fecha, hora, duración del riego, humedad del suelo y temperatura del suelo tanto al inicio como al final del riego. Para el análisis únicamente se conservaron los registros correspondientes al inicio de cada evento, ya que éstos representan el momento en que el sistema detectó que la humedad del suelo descendió por debajo del umbral establecido por el usuario y activó automáticamente el suministro de agua. Posteriormente, estos eventos fueron representados gráficamente junto con la evolución de la humedad del suelo para visualizar la respuesta del sistema de riego durante el desarrollo del cultivo.

Durante el primer periodo experimental desarrollado a cielo abierto se presentó infiltración de agua al compartimiento electrónico del sensor de humedad del suelo, ocasionando interrupciones temporales en el registro de información. Como consecuencia, en las gráficas correspondientes se observan algunos intervalos sin datos, los cuales se atribuyen exclusivamente a esta falla del sensor y no a la ausencia de mediciones del sistema. Para el segundo periodo, se selló mejor la parte electrónica del sensor y no se presentaron datos faltantes de humedad del suelo.

Resultados y discusión

La Figura 3 muestra la evolución temporal del contenido volumétrico de agua del suelo (HS), la precipitación registrada y los eventos de riego ocurridos durante el primer periodo experimental desarrollado a cielo abierto utilizando suelo franco. Durante el experimento, el sistema de riego se activó automáticamente cuando la humedad del suelo descendió por debajo

del umbral establecido (26% de humedad), observándose incrementos inmediatos en el contenido de agua después de cada evento de riego.

Asimismo, los eventos de precipitación también ocasionaron incrementos en la humedad del suelo. Sin embargo, la magnitud y duración de dichos incrementos dependieron de la cantidad de lluvia registrada. Los eventos de mayor intensidad, ocurridos aproximadamente entre los días 24 y 27 del experimento, produjeron los mayores incrementos en la humedad del suelo, alcanzando valores cercanos al 36 % V/V y reduciendo temporalmente la frecuencia de activación del sistema de riego.

En condiciones normales, la humedad del suelo presentó un comportamiento cíclico, caracterizado por disminuciones graduales debidas al requerimiento de agua por el cultivo y aumentos asociados a los eventos de riego o precipitación. Este comportamiento indica que el sistema fue capaz de mantener la humedad del suelo dentro de un intervalo relativamente estable durante la mayor parte del ciclo del cultivo.

Cabe mencionar que durante el primer periodo experimental se presentaron algunas interrupciones en el registro de humedad del suelo, atribuibles a la infiltración de agua en el compartimiento electrónico del sensor instalado a cielo abierto, situación que se refleja como intervalos sin información en la Figura 3.

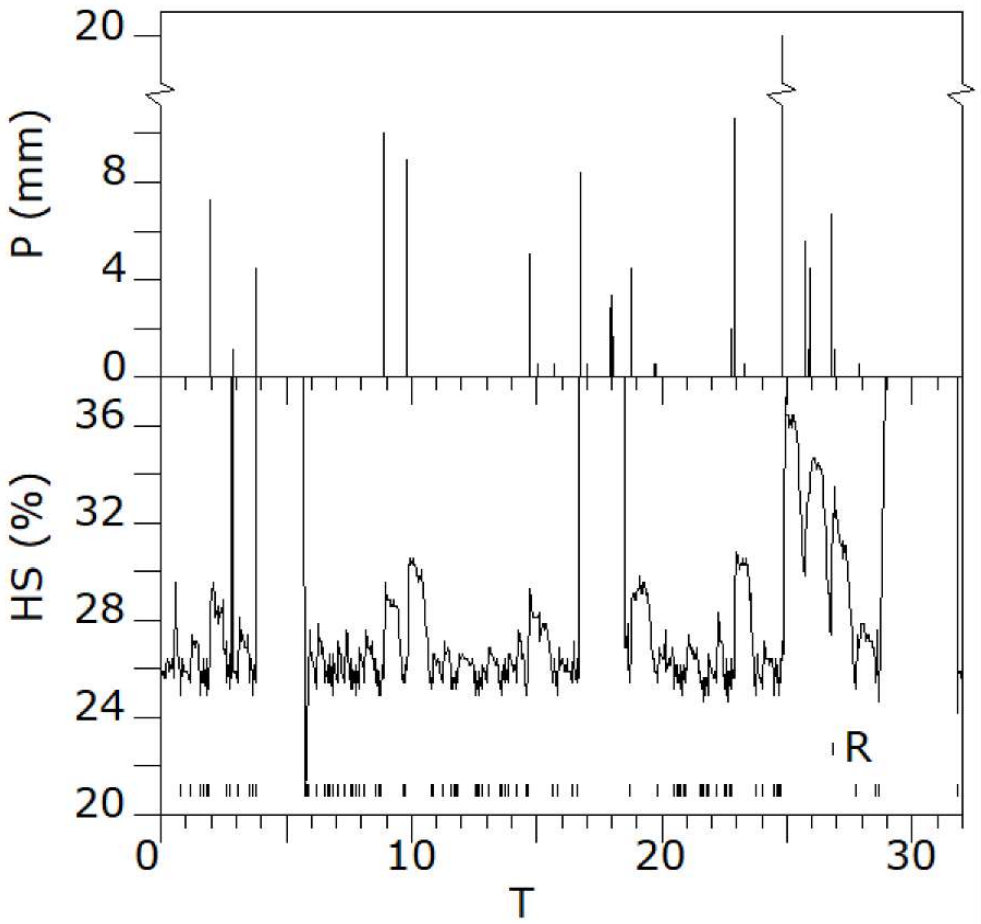


Figura 3. Humedad de suelo (HS) expresada en porcentaje V/V, con indicador de momento del riego (R) y precipitación (P) expresada en milímetros, ocurrida en los días (T) del experimento de crecimiento del rábano a cielo abierto en suelo franco en el primer periodo del 24 de abril al 26 de mayo de 2026.

La Figura 4 muestra la evolución temporal del contenido volumétrico de agua del suelo (HS) y los eventos de riego registrados durante el primer periodo experimental en condiciones de invernadero utilizando suelo franco. A diferencia del experimento desarrollado a cielo abierto, en este caso no existió la influencia directa de la precipitación, por lo que la variación de la humedad del suelo estuvo determinada principalmente por el requerimiento de agua del cultivo y la activación automática del sistema de riego.

Durante los primeros cinco días del experimento, el sistema operó con un umbral de humedad del suelo de 26 % V/V, observándose ciclos de disminución gradual de la humedad, seguidos por incrementos asociados a la activación del riego. Posteriormente, el umbral de activación fue ajustado a 28 % V/V, con el propósito de mantener una mayor disponibilidad de agua en el sustrato. Como consecuencia, los eventos de riego comenzaron a ocurrir con mayor frecuencia y las oscilaciones de humedad se concentraron alrededor de este nuevo valor de referencia.

En general, el comportamiento observado indica que el sistema respondió de manera consistente al contenido de humedad del suelo, activando automáticamente el riego cuando la humedad descendía por debajo del umbral establecido y restableciendo posteriormente el contenido de agua del suelo. La ausencia de incrementos abruptos ocasionados por lluvia permitió observar con mayor claridad el funcionamiento del algoritmo de control implementado en la tarjeta Arduino.

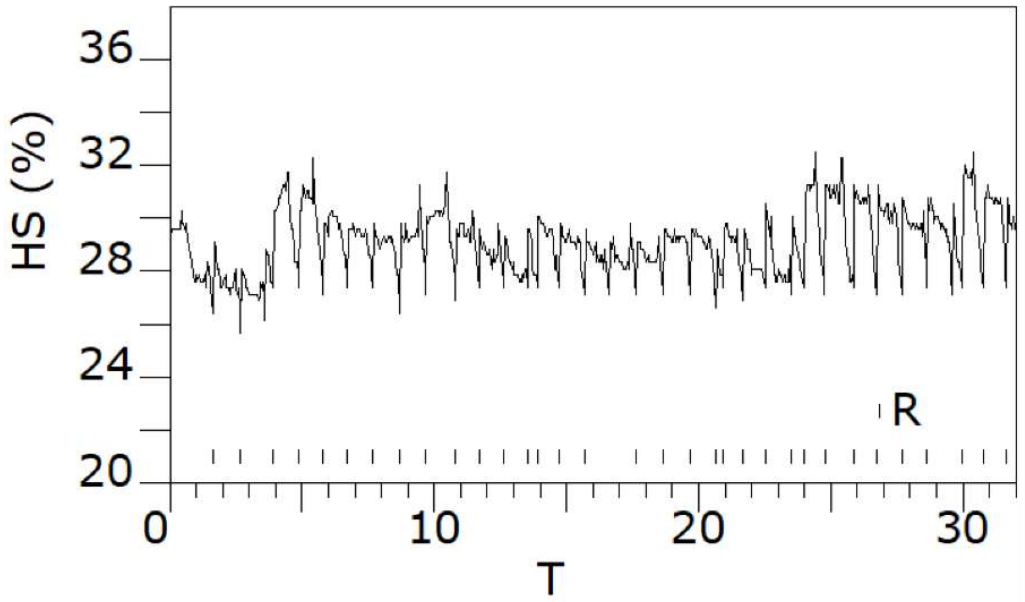


Figura 4. Humedad de suelo (HS) expresada en porcentaje V/V, con indicador de momento del riego (R), ocurrida en los días (T) del experimento de crecimiento del rábano con suelo franco en el primer periodo del 24 de abril al 26 de mayo de 2026.

Adicionalmente, es necesario indicar que, en el primer periodo del 24 de abril al 26 de mayo de 2026, llovieron en total 124.33mm en 33 eventos de lluvia.

La Figura 5 muestra la evolución temporal del contenido volumétrico de agua del suelo (HS), la precipitación registrada y los eventos de riego durante el segundo periodo experimental desarrollado a cielo abierto utilizando suelo areno-terroso. En este periodo, el sistema automático de riego se programó con un umbral de activación de 23 % V/V, por lo que los

eventos de riego ocurrieron únicamente cuando la humedad del suelo descendió por debajo de dicho valor.

A lo largo del experimento se observó un comportamiento cíclico del contenido de humedad del suelo. Después de cada evento de precipitación o riego, la humedad aumentó rápidamente, alcanzando en algunos casos valores superiores al 35 % V/V. Posteriormente, conforme avanzó el desarrollo del cultivo, la humedad disminuyó gradualmente como consecuencia del requerimiento de agua por las plantas y de las pérdidas por evaporación, hasta aproximarse nuevamente al umbral de activación del sistema.

Los eventos de precipitación de mayor magnitud ocasionaron incrementos importantes en el contenido de agua del suelo y retrasaron temporalmente la activación del sistema de riego, mientras que durante los periodos con poca o nula lluvia la humedad descendió de manera continua hasta alcanzar el valor umbral programado. Este comportamiento evidencia que la ocurrencia de la precipitación modificó directamente la frecuencia de los riegos automáticos durante el ciclo del cultivo.

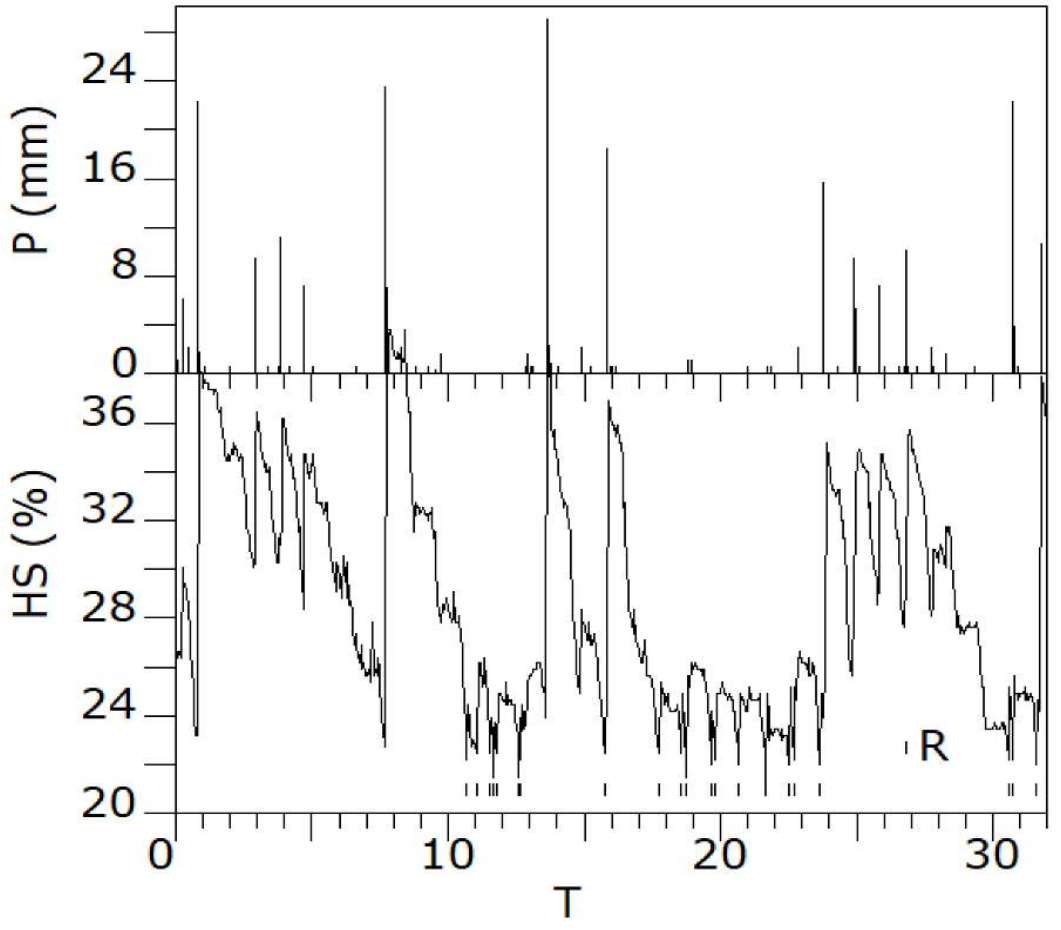


Figura 5. Humedad de suelo (HS) expresada en porcentaje V/V, con indicador de momento del riego (R) y precipitación (P) expresada en milímetros, ocurrida en los días (T) del experimento de crecimiento del rábano a cielo abierto en suelo areno-terroso en el segundo periodo del 4 de junio al 6 de julio de 2026.

En general, el sistema respondió adecuadamente a las variaciones del contenido de humedad del suelo, activando el riego únicamente cuando la humedad descendió por debajo del valor

establecido y permitiendo que la precipitación complementara el suministro de agua cuando ésta ocurrió.

La Figura 6 muestra la evolución temporal del contenido volumétrico de agua del suelo (HS) y los eventos de riego registrados durante el segundo periodo experimental desarrollado en condiciones de invernadero utilizando suelo areno-terroso. Al igual que en el experimento realizado a cielo abierto, el sistema automático de riego se programó con un umbral de activación de 23 % V/V, por lo que el suministro de agua ocurrió únicamente cuando la humedad del suelo descendió por debajo de dicho valor.

Durante los primeros días del experimento se observó una disminución gradual del contenido de humedad del suelo, hasta que el sistema comenzó a operar de manera periódica alrededor del umbral establecido. Posteriormente, el contenido de agua presentó un comportamiento cíclico, caracterizado por disminuciones graduales ocasionadas por el requerimiento de agua del cultivo y aumentos inmediatos después de cada evento de riego.

A diferencia del experimento realizado a cielo abierto (Figura 5), en este caso no se presentaron incrementos abruptos de humedad asociados a eventos de precipitación, por lo que las variaciones observadas fueron consecuencia exclusivamente de la interacción entre el requerimiento de agua del cultivo y la activación automática del sistema de riego. En consecuencia, las oscilaciones del contenido de humedad fueron más uniformes durante la mayor parte del ciclo del cultivo.

Con el propósito de facilitar la comparación entre tratamientos, en todas las figuras se utilizó la misma escala para representar el contenido volumétrico de agua del suelo. Esto permite apreciar visualmente las diferencias en la amplitud de las oscilaciones de humedad entre los experimentos desarrollados a cielo abierto y dentro del invernadero.

En general, el comportamiento observado confirma que el sistema mantuvo el contenido de humedad del suelo cercano al umbral programado, activando el riego de forma automática únicamente cuando las condiciones del suelo así lo requirieron.

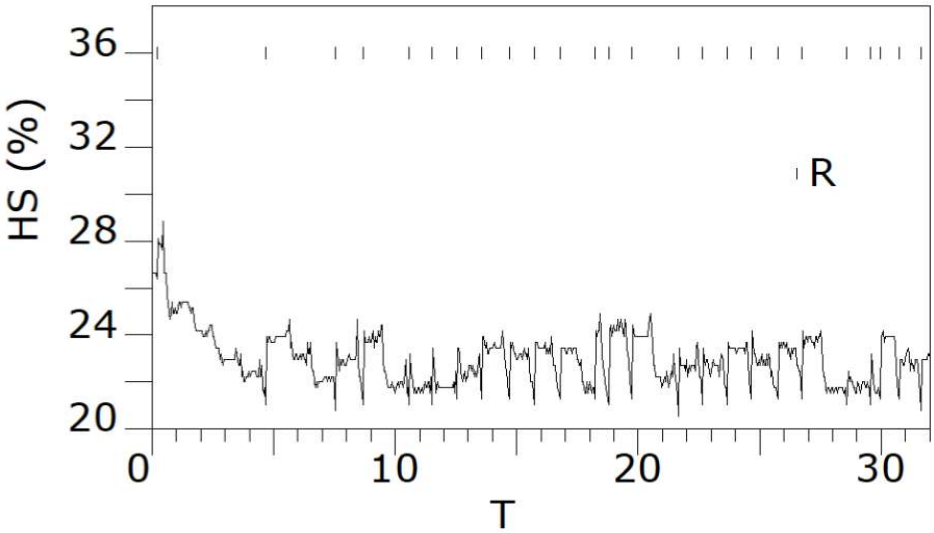


Figura 6. Humedad de suelo (HS) expresada en porcentaje V/V, con indicador de momento del riego (R), ocurrida en los días (T) del experimento de crecimiento del rábano dentro del invernadero, en suelo areno-terroso en el segundo periodo del 4 de junio al 6 de julio de 2026.

Es necesario indicar que en el segundo periodo del 4 de junio al 6 de julio de 2026, llovieron en total 252.857mm en 62 eventos de lluvia.

Requerimiento de agua durante el ciclo del cultivo. Durante el primer periodo experimental, desarrollado en suelo franco, el sistema de riego instalado a cielo abierto realizó un total de 89 eventos de riego. Considerando que en cada evento se aplicaron 443 mL de agua al sistema completo, el volumen total suministrado fue de 39.427 L durante el ciclo del cultivo. Debido a que el sistema abasteció simultáneamente cuatro macetas, el requerimiento de agua promedio fue de 9.86 L por maceta durante todo el periodo experimental.

En contraste, el sistema instalado en condiciones de invernadero realizó 37 eventos de riego durante el mismo periodo. Considerando un volumen aplicado de 827 mL por evento de riego, el requerimiento de agua total de agua fue de 30.599 L. Al distribuirse este volumen entre las cuatro macetas del experimento, el requerimiento de agua promedio correspondió a 7.65 L por maceta durante el ciclo del cultivo.

Por otra parte, durante el segundo periodo experimental, desarrollado utilizando arena como sustrato, el sistema instalado a cielo abierto registró 22 eventos de riego. Considerando el mismo volumen de aplicación por evento (443 mL), el volumen total suministrado durante el ciclo fue de 9.746 L, equivalente a un requerimiento de agua promedio de 2.44 L por maceta.

Finalmente, en el sistema instalado dentro del invernadero se registraron 26 eventos de riego. Debido a que cada evento aportó 827 mL al sistema, el volumen total aplicado fue de 21.502 L, lo que corresponde a un requerimiento de agua promedio de 5.38 L por maceta durante el segundo periodo experimental.

Los resultados obtenidos muestran que el sistema fue capaz de mantener el contenido de humedad del suelo cercano al umbral establecido por el usuario, activando automáticamente el riego únicamente cuando las condiciones del suelo así lo requirieron. Esto permitió cuantificar el volumen de agua aplicado durante todo el ciclo del cultivo bajo diferentes condiciones de ambiente y sustrato, obteniéndose requerimientos promedio de 9.86 y 7.65 L maceta^{-1} durante el primer periodo experimental (suelo franco) en condiciones de cielo abierto e invernadero, respectivamente, mientras que en el segundo periodo experimental (suelo areno-terroso) los valores fueron de 2.44 y 5.38 L maceta^{-1}. Durante el primer periodo experimental se registraron 124.33 mm de precipitación distribuidos en 33 eventos, mientras que en el segundo periodo ocurrieron 252.86 mm en 62 eventos de lluvia, lo que probablemente contribuyó a reducir el volumen de agua aplicado por el sistema en las macetas establecidas a cielo abierto. Aunque el presente trabajo no tuvo como objetivo realizar una comparación estadística entre tratamientos, los resultados evidencian que el requerimiento de agua estuvo influenciado por las condiciones ambientales, la precipitación y las características del sustrato. En este sentido, Flores et al. (2007) señalan que la programación del riego suele realizarse de manera empírica debido a la escasa información sobre los requerimientos hídricos de los cultivos. Por ello, la metodología propuesta permite obtener de manera automática información sobre el requerimiento de agua durante el ciclo del cultivo, proporcionando valores de referencia que pueden contribuir a una mejor planeación del suministro de agua y al manejo más eficiente del riego. Asimismo, el sistema desarrollado constituye una plataforma de bajo costo que puede adaptarse fácilmente a otros cultivos de ciclo corto, facilitando la generación de información específica sobre sus requerimientos hídricos y apoyando el desarrollo de estrategias orientadas a incrementar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura.

Conclusiones

El sistema automático de monitoreo y riego desarrollado fue capaz de mantener el contenido de humedad del suelo cercano al umbral establecido por el usuario tanto en condiciones de invernadero como a cielo abierto, registrando de manera automática los eventos de riego, la humedad del suelo y, en el caso del experimento a cielo abierto, la precipitación.
La información registrada por el sistema permitió cuantificar el volumen de agua aplicado durante el ciclo del cultivo de rábano en diferentes condiciones de ambiente y sustrato, generando valores de referencia sobre el requerimiento de agua del cultivo que pueden servir como apoyo para la planeación del suministro de agua y la programación del riego.
Finalmente, la metodología propuesta constituye una alternativa de bajo costo para el monitoreo continuo del contenido de humedad del suelo y la estimación del agua aplicada durante el ciclo de cultivo, pudiendo adaptarse fácilmente a otros cultivos de ciclo corto para generar información específica sobre sus requerimientos hídricos.

Literatura citada

Flores, J., Ojeda-Bustamante, W., López, I., Rojano, A., & Salazar, I. (2007). Water requirements for greenhouse tomato. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 127–134.

Ruelas-Islas, J. D. R., Rubiños-Panta, J. E., Peinado-Fuentes, L. A., Mendoza-Pérez, C., Martínez-Ruiz, A., & Escobosa-García, I. (2022). Consumo de agua de tomate en invernadero en función del número de tallos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(SPE28), 137–147.

Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & López-Cruz, I. L. (2014). Water use efficiency in controlled agriculture. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(2), 177–183.

CONAGUA. (2023). *Estadísticas del agua en México*. Sitio web, [Documento electrónico], Ciudad de México, México. Disponible en: https://www.gob.mx/conagua [Consulta: 2 de julio de 2026].

Shenzhen Fine Offset Electronics. (2025). *Datasheet for wind vane, cup anemometer, and tipping-bucket rain gauge*. Sitio web, [Documento electrónico], Shenzhen, China. Disponible en: https://www.hestore.eu/en/prod_getfile.php?id=13323 [Consulta: 2 de julio de 2026].

United States Department of Agriculture (USDA). (2005). *Cálculo de la humedad del suelo por tacto y apariencia*. Sitio web, [Documento electrónico], Washington, D.C., Estados Unidos. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-01/Calculo-De-La-Humedad-Del%20Suelo-Por-Tacto-Y-Apariencia.pdf [Consulta: 2 de julio de 2026].

Arduino. (2025). *Arduino Mega 2560 Rev3*. Sitio web, [Documento electrónico], Ivrea, Italia. Disponible en: https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560 [Consulta: 2 de julio de 2026].

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas 15 y 16 de octubre de 2026, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Detección Inteligente de Riesgos Microclimáticos en Invernaderos

Irlesa Indira Sánchez Medina[1], Marlio Bedoya Cardoso[2], Jorge Eliecer Martínez Gaitán[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Las variaciones microclimáticas y las fallas de los sensores pueden afectar la producción en los invernaderos antes de que el operador advierta el riesgo. Por ello, esta investigación evaluó internamente, mediante un banco de pruebas simulado, una arquitectura de alerta temprana basada en inteligencia artificial para identificar cambios atípicos en la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar. Se generó un conjunto reproducible de 1.440 registros horarios, correspondientes a 60 días, que incorporó ciclos diarios, ruido estocástico y 100 anomalías controladas relacionadas con estrés térmico, condensación, errores en la medición de la radiación y riesgos combinados. A partir de los valores de temperatura y humedad, se calculó el déficit de presión de vapor y se comparó el desempeño de Isolation Forest, Local Outlier Factor (LOF) y DBSCAN. Posteriormente, se desarrolló un motor híbrido de evaluación que integró los puntajes de anomalía con reglas agronómicas. El rendimiento se valoró mediante exactitud, precisión, sensibilidad y F1. LOF presentó el mejor equilibrio general, con una exactitud de 0,8986, una precisión de 0,3777, una sensibilidad de 0,71 y un F1 de 0,4931. El motor híbrido alcanzó una sensibilidad de 0,63 y organizó las detecciones en estados de normalidad, vigilancia y alerta mediante un tablero operativo. Los hallazgos muestran que combinar análisis no supervisado, criterios agronómicos y visualización contextual puede apoyar la identificación y priorización de eventos relevantes. Sin embargo, al utilizar datos sintéticos, la arquitectura deberá validarse en campo con sensores reales, cultivos específicos y diversas condiciones productivas.

Palabras clave: agricultura protegida, aprendizaje no supervisado, déficit de presión de vapor, detección de anomalías, invernadero inteligente.

Abstract

Microclimatic variations and sensor failures can impact greenhouse production before an operator becomes aware of the risk. Therefore, this study evaluated using a simulated testbed an artificial intelligence-based early warning architecture designed to identify atypical changes in temperature, relative humidity, and solar radiation. A reproducible dataset of 1,440 hourly records (spanning 60 days) was generated, incorporating daily cycles, stochastic noise, and 100 controlled anomalies related to heat stress, condensation, radiation measurement errors, and combined risks. Vapor pressure deficit was calculated from temperature and humidity values, and the performance of Isolation Forest, Local Outlier Factor (LOF), and DBSCAN was compared.

[1]Universidad de Santander. jorgeeliecer.martinez@usco.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1454-4087, irlesa.sanchez@mail.udes.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8840-0708
[1]Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana, Avenida Pastrana Borrero- Carrera 1, Neiva Huila; Colombia. irlesa.sanchez@usco.edu.co; marlio.bedoya@usco.edu.co; jorgeeliecer.martinez@usco.edu.co

Subsequently, a hybrid evaluation engine was developed that integrated anomaly scores with agronomic rules. Performance was assessed using accuracy, precision, sensitivity, and F1-score. LOF demonstrated the best overall balance, achieving an accuracy of 0.8986, precision of 0.3777, sensitivity of 0.71, and an F1-score of 0.4931. The hybrid engine achieved a sensitivity of 0.63 and categorized detections into normal, monitoring, and alert states via an operational dashboard. The findings indicate that combining unsupervised analysis, agronomic criteria, and contextual visualization can support the identification and prioritization of relevant events. However, given the use of synthetic data, the architecture requires validation in the field using real sensors, specific crops, and diverse production conditions.
Keywords: anomaly detection, protected agriculture, smart greenhouse, unsupervised learning, vapor pressure deficit.

Introducción

La agricultura protegida comprende sistemas de producción en los que los cultivos se establecen dentro de estructuras diseñadas para reducir su exposición a condiciones climáticas adversas, plagas y enfermedades. Los invernaderos, las casas de malla, los túneles y las cubiertas plásticas permiten controlar la temperatura, la humedad, la radiación solar y el suministro de agua, siendo necesario identificar los cambios del microclima que puedan afectar el desempeño productivo. La temperatura del aire, la humedad relativa y la radiación intervienen en procesos como la fotosíntesis, la transpiración y el equilibrio energético, como variables involucradas fuera de los intervalos adecuados, y favorecen la condensación, el estrés fisiológico y la aparición de enfermedades, reduciendo la calidad de la producción (Baudoin et al., 2013; Shamshiri et al., 2018a; Soussi et al., 2022).

La interpretación conjunta de temperatura y humedad puede fortalecerse mediante el déficit de presión de vapor (DPV), indicador de la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión real del aire. El DPV representa la demanda atmosférica de agua y permite distinguir condiciones que una lectura aislada de humedad relativa no refleja. Su utilidad para el control de invernaderos ha sido documentada en tomate y otros sistemas de ambiente controlado, aunque los intervalos de manejo deben adaptarse a la especie, etapa fenológica, radiación y estrategia de ventilación (Allen et al., 1998; Lu et al., 2015; Shamshiri et al., 2018b; Zhang et al., 2015).

Al utilizar sensores, redes de comunicación y plataformas de Internet de las cosas se conocerá en tiempo real lo que sucede en los cultivos, con información útil para la toma de decisiones oportunas y fortalecimiento de la producción agrícola. Sin embargo, un sistema de monitoreo que solo despliega series o valores instantáneos obliga al usuario a interpretar grandes volúmenes de información y puede ocultar eventos incipientes. La inteligencia artificial y el aprendizaje automático ofrecen métodos para reconocer patrones, priorizar observaciones inusuales y convertir datos de sensores en apoyo a la decisión (Ayaz et al., 2019; Benos et al., 2021; Liakos et al., 2018).

La detección de anomalías es útil cuando eventos críticos ocurren con poca frecuencia y presentan características diversas, siendo necesario reconocer estos comportamientos inusuales utilizando diferentes métodos como Isolation Forest que identifica registros separados con facilidad mediante divisiones aleatorias; Local Outlier Factor (LOF) destaca qué tan extraño es

un dato al comparar su densidad con la de los registros cercanos; y DBSCAN agrupa observaciones con características similares, mientras reconoce como ruido aquellas que permanecen aisladas (Breunig et al., 2000; Ester et al., 1996; Liu et al., 2008, 2012). Al trabajar con información proveniente de sensores agrícolas, es necesario considerar las variaciones propias de cada hora del día, la relación entre las variables y los cambios que se presentan a lo largo del tiempo, porque un dato estadísticamente inusual no siempre representa una amenaza real para el cultivo (Schmidl et al., 2022; Yang et al., 2022).

Se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo integrar variables microclimáticas, algoritmos no supervisados y criterios agronómicos en un sistema de alerta temprana útil para los responsables de la operación de un invernadero?, como objetivo: evaluar internamente, mediante un banco de prueba simulado, una arquitectura con registros horarios, el cálculo del déficit de presión de vapor (DPV), la comparación de tres algoritmos y un motor híbrido IA riesgo, con un tablero tecnológico que reporte resultados, planteando que la combinación del puntaje de anomalía con reglas agronómicas permitiría una sensibilidad y generación de alertas interpretables que el uso aislado de un algoritmo no supervisado.

Materiales y Métodos

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo basado en simulación computacional para diseñar y evaluar internamente un prototipo tecnológico, y unidad de análisis estuvo conformada por los registros horarios de un invernadero virtual durante 60 días consecutivos. El estudio no involucró seres humanos, animales ni datos personales, ya que su propósito fue comprobar la coherencia técnica de la arquitectura antes de implementarla en condiciones reales. Por esta razón, los resultados describen el funcionamiento del banco de pruebas y no la efectividad del sistema sobre la producción agrícola. El proceso comprendió la definición del escenario microclimático, la generación de datos, el cálculo de indicadores agronómicos, la comparación de modelos no supervisados y el diseño de un tablero de alertas. Para ello, se integraron mediciones de temperatura, humedad relativa y radiación solar, mecanismos de validación temporal, almacenamiento en formato CSV, detección de anomalías, un motor híbrido de inteligencia artificial y evaluación del riesgo, y una interfaz destinada a visualizar las alertas.

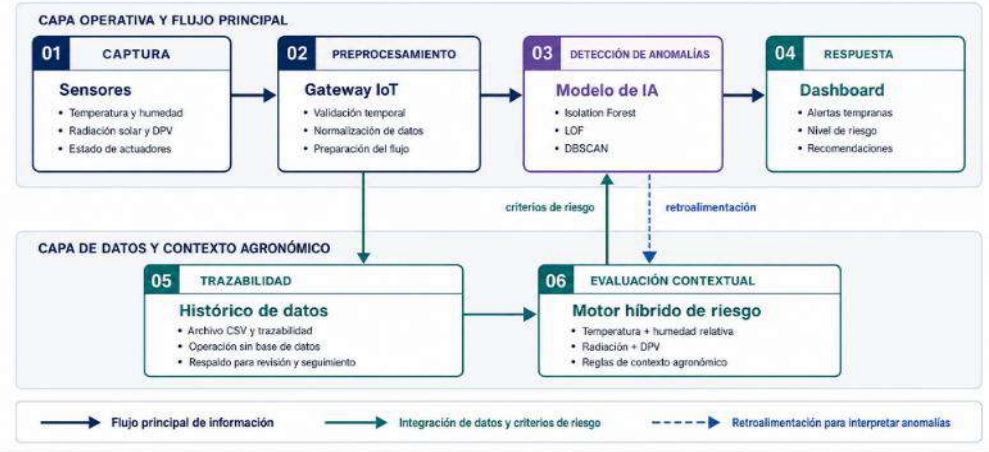


Figura 1. Arquitectura funcional del sistema de alerta temprana para invernaderos. Fuente: elaboración propia.

La Figura 1, destaca una arquitectura funcional con sensores para una implementación en campo registrando temperatura, humedad y radiación; luego, la capa de procesamiento calcula el DPV. En el banco de prueba, la función del Gateway IoT se emuló mediante la lectura, validación y normalización de archivos CSV; los modelos Isolation Forest, LOF y DBSCAN identifican comportamientos inusuales. El historial conserva la trazabilidad de los registros y alimenta el motor híbrido IA riesgo, que relaciona las anomalías con criterios agronómicos, donde el tablero comunica el nivel de riesgo y las recomendaciones para apoyo en la decisión del responsable del invernadero.

Construcción de los datos

El conjunto fue de 1440 observaciones horarias, con series base generadas mediante ciclos diarios coherentes con el comportamiento esperado de un invernadero como aumento de la temperatura y la radiación durante el día, reducción nocturna y variación inversa parcial de la humedad. Se fijó la semilla aleatoria en 42 y se añadió ruido estocástico para evitar trayectorias deterministas, luego incorporaron 100 registros horarios anómalos conocidos, equivalentes al 6,94 % del conjunto de datos, con el fin de disponer de una referencia para comparar los modelos.

Los registros anómalos se distribuyeron en cuatro categorías con 25 observaciones cada una: incremento térmico acompañado de reducción de humedad; humedad elevada durante periodos de radiación baja, asociada con riesgo de condensación; caída anómala de radiación en horas de alta luminosidad esperada; y riesgo compuesto por desviaciones moderadas simultáneas, con etiquetas reservadas para la evaluación y no se suministraron a los algoritmos durante el ajuste.

Cuadro 1. Variables consideradas en el sistema de alerta temprana

Variable	**Unidad o escala**	**Función en el Sistema**
Temperatura del aire	°C	Identificación de estrés térmico y relación con ventilación.
Humedad relativa	%	Evaluación de condensación, transpiración y riesgo sanitario.
Radiación solar	W m^{-2}	Representación del ciclo lumínico y detección de fallas o sombreo.
Déficit de presión de vapor	kPa	Integración de temperatura y humedad para estimar demanda evaporativa.
Hora del día	0–23	Contextualización del patrón circadiano.
Puntaje de anomalía	0–1	Priorización de registros según su rareza estadística.

Fuente: elaboración propia.

Cálculo del déficit de presión de vapor y del índice agronómico

La presión de vapor de saturación se calculó con la expresión recomendada en FAO-56; la presión real se obtuvo a partir de la humedad relativa, para una temperatura T en grados Celsius y una humedad relativa HR en porcentaje, se emplearon las siguientes expresiones (Allen et al., 1998):

$$\begin{aligned} e_s(T) &= 0.6108 \cdot exp[(17.27T)/(T + 237.3)] \\ e_a &= (HR/100) \cdot e_s(T) \\ DPV &= e_s(T) - e_a \end{aligned} \quad (1)$$

El índice agronómico de riesgo se definió como una combinación normalizada de las desviaciones térmica, de humedad, de DPV y de radiación; y cada componente se calculó como la distancia normalizada respecto del intervalo operativo; los valores inferiores a 0 se fijaron en 0 y los superiores a 1 se truncaron en 1. Las ponderaciones como parámetros exploratorios del prototipo suman 1 y deberán recalibrarse con datos reales y conocimiento específico del cultivo; por ello, no se presentan como umbrales agronómicos universales.

$$IR_t = 0.32A_t + 0.25A_h + 0.23A_{DPV} + 0.20A_r \quad (2)$$

El término IR_t representa el nivel de riesgo en el tiempo t, mientras que cada componente A corresponde a una desviación normalizada en una escala de 0 a 1. El puntaje híbrido se obtuvo al combinar, con la misma ponderación, el valor normalizado de anomalía y el IR_t. Los resultados inferiores a 0,40 se clasificaron como estado normal; los valores entre 0,40 y 0,69, como vigilancia; y aquellos iguales o superiores a 0,70, como alerta. Las recomendaciones se establecieron de acuerdo con las condiciones identificadas e incluyeron acciones como revisar la ventilación, comprobar el funcionamiento del sensor de radiación o reforzar el seguimiento nocturno ante posibles eventos de condensación.

Modelos y evaluación

Antes de ajustar los modelos, las variables continuas se estandarizaron para evitar que las diferencias de escala influyeran en los resultados. El vector de características estuvo compuesto por la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar, el DPV y dos transformaciones cíclicas de la hora: seno(2πh/24) y coseno(2πh/24). Estas transformaciones permitieron conservar la continuidad temporal entre las 23:00 y las 00:00. Posteriormente, se compararon los algoritmos Isolation Forest, Local Outlier Factor (LOF) y DBSCAN, seleccionados porque aplican enfoques complementarios para detectar anomalías: aislamiento aleatorio, densidad local y agrupamiento basado en densidad, respectivamente.

Configuración de los modelos

LOF se configuró con 20 vecinos, distancia euclidiana y una contaminación esperada de 0,0694, el Isolation Forest empleó 200 árboles, semilla aleatoria 42 y la misma proporción de contaminación. En DBSCAN, la distancia euclidiana se aplicó sobre las variables estandarizadas, y la selección de hiperparámetros se efectuó en los primeros 40 días y el desempeño se evaluó en los 20 días restantes, sin utilizar información futura durante el ajuste.

Cuadro 2. Modelos comparados y función operativa

Modelo	**Principio**	**Uso previsto**
Isolation Forest	Aislamiento de observaciones mediante particiones aleatorias.	Generación eficiente de un puntaje global de rareza.
Local Outlier Factor	Comparación de la densidad local de cada registro con sus vecinos.	Detección de cambios locales en patrones horarios.
DBSCAN	Formación de grupos densos y clasificación de puntos aislados como ruido.	Exploración de conglomerados y registros fuera de patrón.
Motor híbrido IA–Riesgo	Combinación del puntaje estadístico con el índice agronómico.	Conversión de detecciones en alertas y recomendaciones interpretables.

Fuente: elaboración propia.

El desempeño de los modelos se evaluó mediante exactitud, precisión, sensibilidad, especificidad, tasa de falsas alertas y F1. Debido al desequilibrio entre los 100 registros anómalos y los 1.340 registros normales, la exactitud se analizó junto con las métricas correspondientes a la clase anómala. En un sistema de alerta temprana, una sensibilidad alta ayuda a reducir la cantidad de eventos no detectados, mientras que una precisión baja puede generar demasiadas falsas alertas y disminuir la atención del operador. Por esta razón, el F1 se empleó como una medida de equilibrio entre la precisión y la sensibilidad (Schmidl et al., 2022).

$$\text{Exactitud} = (\text{VP} + \text{VN})/(\text{VP} + \text{VN} + \text{FP} + \text{FN}) \quad (3)$$

$$\text{Precisión} = \text{VP}/(\text{VP} + \text{FP}) \quad (4)$$

$$\text{Sensibilidad} = \text{VP}/(\text{VP} + \text{FN}) \quad (5)$$

$$\text{Especificidad} = \text{VN}/(\text{VN} + \text{FP}) \quad (6)$$

$$\text{Tasa de falsas alertas} = \text{FP}/(\text{FP} + \text{VN}) \quad (7)$$

$$\text{F1} = 2 \cdot (\text{Precisión} \cdot \text{Sensibilidad})/(\text{Precisión} + \text{Sensibilidad}) \quad (8)$$

Resultados

Comportamiento temporal y distribución de los eventos

Las series generadas reprodujeron los cambios habituales del microclima a lo largo del día, con variaciones diferenciadas en la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar. Dentro de este comportamiento se identificaron registros anómalos caracterizados por aumentos de temperatura acompañados de una disminución de la humedad, lo que permitió representar condiciones asociadas con estrés térmico. También se incluyeron periodos de humedad elevada y baja radiación, especialmente durante las horas de menor intensidad solar, para simular

posibles escenarios de condensación. Por otra parte, las fallas en la medición de la radiación se reconocieron por caídas abruptas o valores inusualmente bajos en momentos en los que, según el ciclo diario esperado, la intensidad debía ser mayor. Estos patrones permitieron diferenciar las variaciones normales del ambiente de aquellas situaciones que podrían requerir la revisión de las condiciones internas del invernadero o del funcionamiento de los sensores.

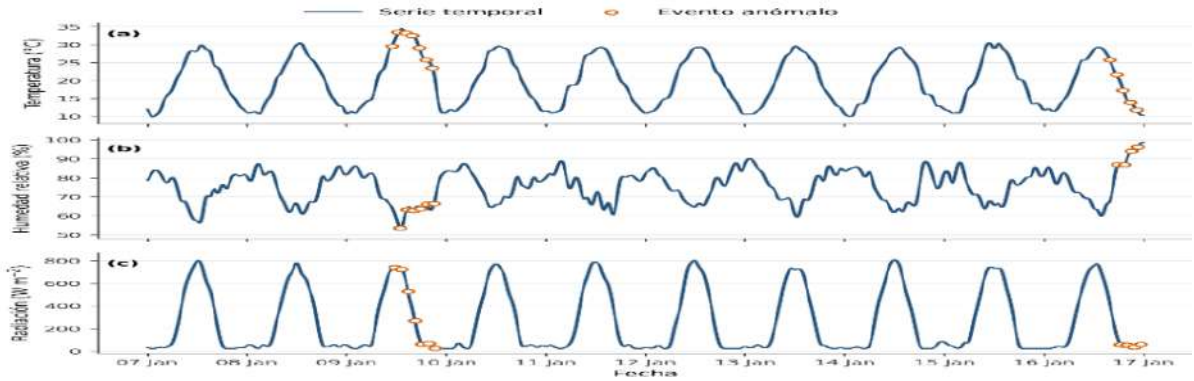


Figura 2. Series temporales de temperatura, humedad relativa y radiación registradas durante el periodo de evaluación. Fuente: elaboración propia. Los círculos representan registros anómalos inyectados en el banco de prueba.

La Figura 2 presenta una parte del periodo evaluado mediante tres paneles que muestran los ciclos diarios de temperatura, humedad relativa y radiación solar. Esta representación permite identificar variaciones simultáneas que requieren revisión. Los círculos señalan los registros anómalos incorporados de forma controlada en el banco de pruebas, por lo que no corresponden a eventos observados en un invernadero real. El conjunto completo de datos comprendió un periodo de 60 días.

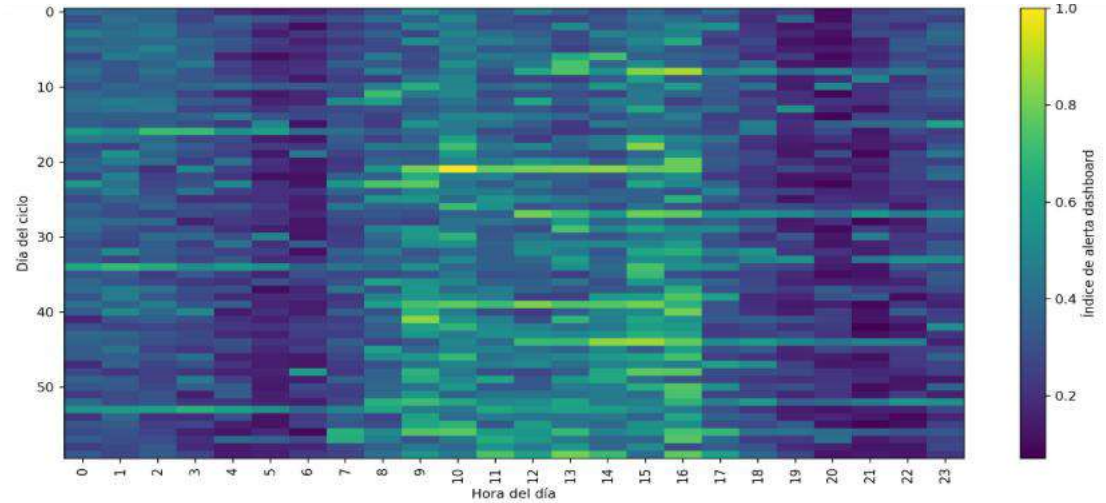


Figura 3. Mapa de calor del índice de alerta temprana por día y hora. Fuente: elaboración propia.

La Figura 3 presenta, mediante un mapa de calor, la distribución del puntaje híbrido de riesgo para cada hora y día del periodo evaluado. Los valores se expresan en una escala de 0 a 1: los puntajes cercanos a 0 corresponden a condiciones normales, mientras que aquellos próximos a 1 indican situaciones que requieren atención. La ubicación y la intensidad del color permiten

reconocer las horas en las que se concentran los niveles más altos de riesgo, así como diferenciar eventos aislados de comportamientos que se repiten durante varios días o permanecen por periodos prolongados. Esta forma de visualizar los resultados facilita la identificación de franjas críticas y ayuda al operador a decidir cuándo revisar la ventilación, el riego, los sensores o las condiciones generales del invernadero. De este modo, es posible interpretar el comportamiento del sistema de manera rápida y ordenada, sin tener que examinar individualmente cada uno de los registros.

Desempeño comparativo

Cuadro 3. Desempeño de los modelos de detección de anomalías

Modelo	Exactitud	Precisión	Sensibilidad	F1	Alertas
Isolation Forest	**0,8417**	**0,2241**	**0,52**	**0,3133**	**232**
Local Outlier Factor	**0,8986**	**0,3777**	**0,71**	**0,4931**	**188**
DBSCAN	**0,8368**	**0,1707**	**0,35**	**0,2295**	**205**
Motor híbrido IA–riesgo	**0,8507**	**0,2614**	**0,63**	**0,3695**	**241**

Nota. Las matrices de confusión fueron: Isolation Forest, VP = 52, FP = 180, FN = 48 y VN = 1 160; LOF, VP = 71, FP = 117, FN = 29 y VN = 1 223; DBSCAN, VP = 35, FP = 170, FN = 65 y VN = 1 170; y motor híbrido IA–riesgo, VP = 63, FP = 178, FN = 37 y VN = 1 162. Fuente: elaboración propia.

LOF alcanzó el mejor desempeño entre los modelos evaluados, con un valor F1 de 0,4931 y una sensibilidad de 0,71. Esto significa que identificó correctamente 71 de los 100 registros anómalos incluidos en el banco de pruebas. El resultado muestra que este método logró reconocer con mayor precisión los cambios locales presentes en los patrones diurnos y nocturnos. Por su parte, Isolation Forest detectó 52 registros anómalos y generó un total de 232 alertas. DBSCAN obtuvo la sensibilidad más baja, comportamiento que puede estar relacionado con su dependencia de los parámetros de densidad y con la dificultad para agrupar registros cuyas características varían según la hora del día.

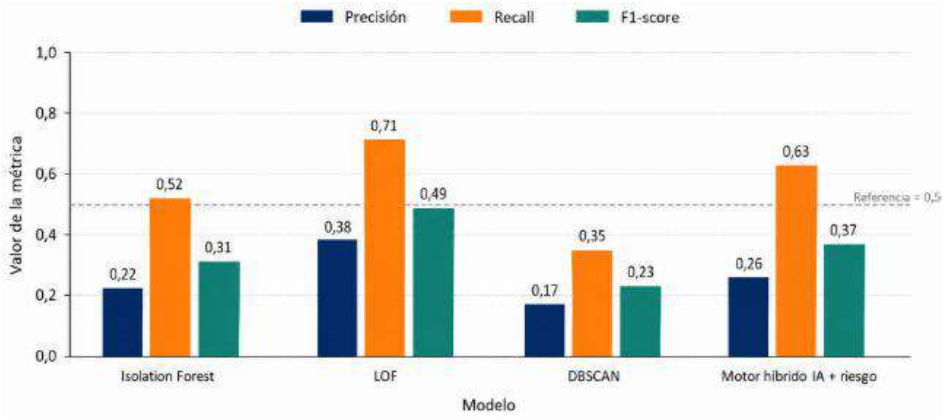


Figura 4. Comparación de precisión, sensibilidad y F1 entre los modelos evaluados. Fuente: elaboración propia.

La Figura 4 compara la precisión, la sensibilidad y el valor F1 de los cuatro métodos evaluados y LOF alcanzó los mejores resultados en las tres métricas, seguido por el motor híbrido de inteligencia artificial y riesgo, mientras que DBSCAN presentó el desempeño más bajo. El motor híbrido identificó correctamente 63 de los 100 registros anómalos y dio mayor importancia a la detección de posibles riesgos que a la reducción de falsas alertas. Su sensibilidad de 0,63 fue inferior a la alcanzada por LOF, que obtuvo un valor de 0,71, aunque no superó el desempeño de este último, su principal aporte consistió en combinar los resultados del análisis algorítmico con criterios agronómicos. Esta integración permitió clasificar las anomalías según su nivel de riesgo y convertirlas en alertas operativas más claras para apoyar la revisión de las condiciones del invernadero.

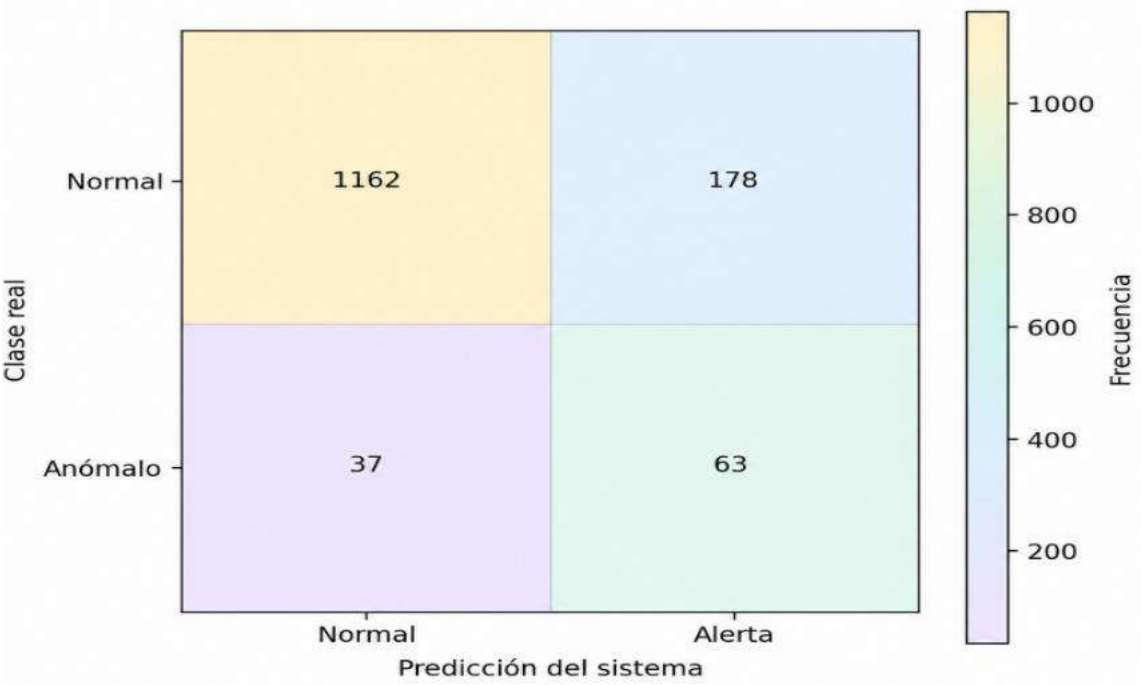


Figura 5. Matriz de confusión del motor híbrido de inteligencia artificial y riesgo. Fuente: elaboración propia.

La matriz de confusión del motor híbrido IA riesgo registró 1, 162 verdaderos negativos, 178 falsos positivos, 37 falsos negativos y 63 verdaderos positivos. Su exactitud fue de 0,8507. La proporción de falsos positivos evidencia que el umbral debe ajustarse según el costo de una alerta innecesaria y el costo de omitir un evento real.

Salida tecnológica

La información se presentó en un tablero con indicadores de temperatura, humedad, radiación y nivel de alerta, acompañado de un estado general, un mapa de calor reciente y recomendaciones automáticas. Esta organización permitió consultar condiciones actuales y observar su evolución facilitando la diferencia entre un cambio momentáneo y una situación que se mantiene.

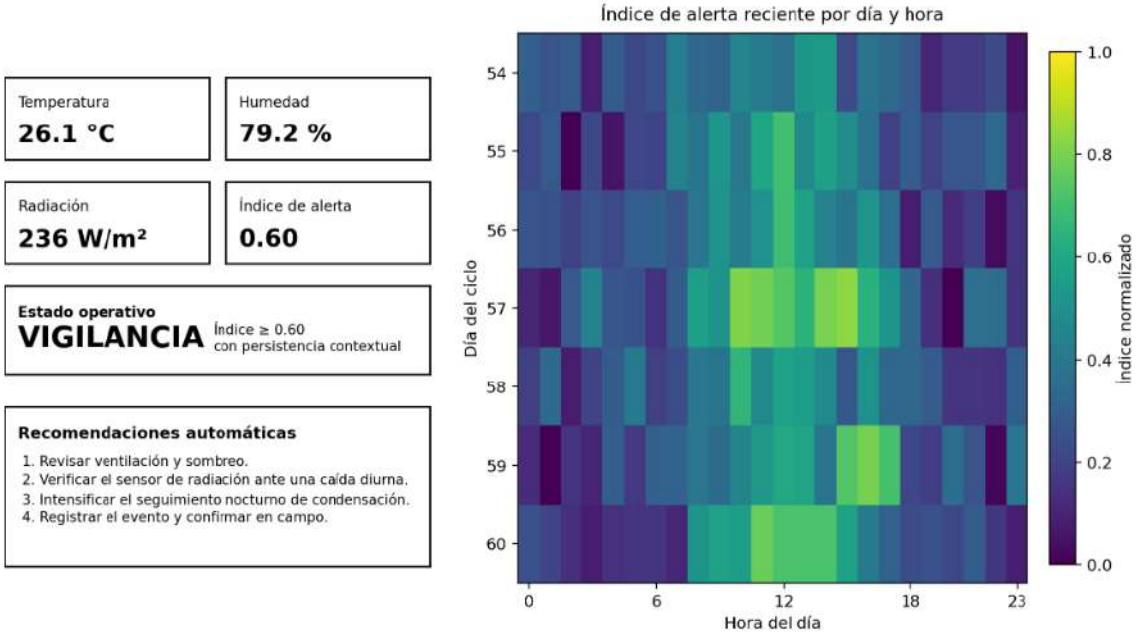


Figura 6. Prototipo visual del tablero tecnológico de alerta temprana. Fuente: elaboración propia.

Cuadro 4. Interpretación operativa de los estados del tablero

Estado	Criterio general	Acción sugerida
Normalidad	Variables dentro del patrón esperado y puntaje bajo.	Mantener monitoreo rutinario y registrar el historial.
Vigilancia	Desviación moderada o coincidencia parcial entre anomalía e índice agronómico.	Verificar ventilación, sombreo, sensores y evolución durante las horas siguientes.
Alerta	Desviación alta, combinación persistente de condiciones de riesgo.	Inspeccionar el invernadero, validar el sensor y aplicar el protocolo agronómico definido para el cultivo.

Fuente: elaboración propia.

Discusión

Los resultados permiten analizar las alertas en invernaderos desde una perspectiva agrocomputacional, y las variables ambientales presentan ciclos diarios y mantienen relaciones entre sí; por esta razón, una condición inusual debe interpretarse según la hora y las circunstancias en las que ocurre. Por ejemplo, una baja radiación es normal durante la noche, pero al mediodía podría indicar sombreado, alguna obstrucción o una falla en el sensor. De igual manera, la humedad elevada adquiere mayor importancia cuando coincide con baja radiación y un déficit de presión de vapor reducido, debido a que esta combinación puede favorecer la condensación. En este sentido, la literatura destaca la importancia de integrar el monitoreo ambiental, el control de las condiciones internas y el apoyo a la toma de decisiones en una misma arquitectura funcional (Shamshiri et al., 2018a; Soussi et al., 2022).

El desempeño alcanzado por LOF sugiere que el análisis de la densidad local es adecuado para estudiar datos con patrones que cambian según la hora del día. Sin embargo, su valor F1 de 0,4931 también refleja la dificultad del problema. De las 188 alertas generadas por el modelo, 117 correspondieron a falsos positivos, es decir, el 62,2 %. Este resultado indica que el modelo todavía requiere ajustes y nuevas validaciones antes de emplearse de manera autónoma en un entorno productivo. Los estudios sobre detección de anomalías en series temporales señalan que el rendimiento puede variar de acuerdo con la forma en que se define el evento anómalo, la calidad del etiquetado y las métricas utilizadas. Por lo tanto, la selección del algoritmo debe considerar las necesidades reales de operación y no depender únicamente de una medida general de desempeño (Schmidl et al., 2022).

El motor híbrido de inteligencia artificial y riesgo ayudó a relacionar los resultados matemáticos con decisiones de carácter agronómico. Aunque su sensibilidad de 0,63 fue inferior a la obtenida por LOF, cada alerta pudo vincularse con una explicación y una posible acción de respuesta. En consecuencia, la hipótesis planteada recibió un respaldo parcial: el motor híbrido facilitó la interpretación operativa de las detecciones, pero no superó a LOF en precisión, sensibilidad ni F1. Aun así, esta capacidad de explicar y contextualizar las alertas resulta importante para la adopción de la tecnología, ya que las aplicaciones agrícolas basadas en aprendizaje automático generan mayor valor cuando combinan el registro automatizado de datos, el conocimiento del área y los procesos de toma de decisiones (Benos et al., 2021; Liakos et al., 2018).

El uso de archivos CSV y de una arquitectura modular permite desarrollar un prototipo accesible, con posibilidad de migrar posteriormente hacia plataformas IoT y sistemas de procesamiento en el borde. Para su aplicación en entornos reales, se requiere mecanismos de control de calidad, sincronización temporal, identificación de sensores congelados, tratamiento de datos faltantes, seguimiento de la deriva de concepto y actualización periódica del modelo. Yang et al. (2022) evidenciaron que los flujos de sensores en invernaderos presentan correlaciones y cambios de distribución que reducen la eficacia de los métodos estáticos, por esta razón, una evaluación prospectiva deberá comprobar la estabilidad del desempeño durante varios ciclos productivos.

La principal limitación del estudio radica en el origen sintético de los datos, con eventos incorporados de manera controlada y su proporción era conocida, condición que facilitó la comparación entre modelos, aunque representó parcialmente la complejidad de un invernadero comercial. Además, quedaron fuera del análisis de variables como la temperatura foliar, la humedad del sustrato, la concentración de CO_2, la apertura de ventanas, el estado fenológico y la verificación de daños en las plantas. Debido a que los rangos de déficit de presión de vapor y temperatura cambian según la especie y su etapa de desarrollo, el índice agronómico y los niveles de alerta deberán ajustarse con datos locales y el acompañamiento de especialistas (Lu et al., 2015; Shamshiri et al., 2018b; Zhang et al., 2015).

En la siguiente fase se incorporarán sensores instalados en varios invernaderos y se establecerá un periodo inicial de estabilización para definir una línea base en cada entorno. También será necesario contar con el criterio independiente de técnicos para etiquetar los eventos, separar los datos de entrenamiento y prueba según su orden temporal, y analizar las alertas como episodios completos y no únicamente como registros aislados. Además, se deberá evaluar la experiencia de los productores durante el uso del sistema. En cuanto a los modelos, se recomienda comparar LOF con métodos desarrollados para procesar flujos continuos de datos y con modelos

temporales multivariados. Estas mejoras deberán mantener una arquitectura clara y comprensible, acompañada de supervisión humana para revisar las alertas y respaldar las decisiones finales.

Conclusiones

El estudio permitió estructurar un sistema de alerta temprana que reúne información sobre temperatura, humedad relativa, radiación solar y déficit de presión de vapor, también incorpora un método de detección no supervisada y un tablero para apoyar la toma de decisiones. De esta manera, el sistema organiza el proceso en varias etapas: captura de datos, interpretación de las condiciones ambientales, identificación de comportamientos atípicos, valoración del riesgo agronómico y formulación de recomendaciones.

En el banco de pruebas simulado, Local Outlier Factor (LOF) mostró el mejor equilibrio entre precisión y sensibilidad. El modelo obtuvo un F1 de 0,4931 e identificó correctamente 71 de los 100 registros anómalos. Por su parte, el motor híbrido de inteligencia artificial y riesgo alcanzó una sensibilidad de 0,63 y ayudó a interpretar las detecciones mediante criterios agronómicos, aunque produjo una cantidad considerable de falsos positivos. A partir de estos resultados, LOF se presenta como el método de detección más prometedor para el escenario evaluado, mientras que el motor híbrido puede mantenerse como una herramienta para explicar y priorizar las alertas.

El principal aporte del estudio es una arquitectura que puede adaptarse y evaluarse en otros contextos, y su reproducción computacional requiere disponer del código, los datos y los parámetros empleados. Las siguientes fases deberán definir umbrales según el tipo de cultivo, analizar la estabilidad de los modelos frente a cambios en el comportamiento de los datos y estimar las consecuencias de las falsas alertas y de los eventos no detectados. También será necesario comprobar si el tablero permite al responsable del invernadero tomar decisiones más oportunas y fundamentadas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Surcolombiana por el apoyo académico e institucional a los procesos de investigación aplicada, innovación tecnológica e inteligencia artificial orientada al sector agropecuario.

Disponibilidad de datos

Los datos sintéticos utilizados en el estudio, el código empleado para su generación y los parámetros de configuración de los modelos podrán solicitarse al autor de correspondencia, siempre que exista una petición académica debidamente justificada.

Todos los autores participaron en la revisión del manuscrito y aprobaron su versión final. Irlesa Indira Sánchez Medina contribuyó al diseño metodológico, el análisis formal y la revisión del texto; Marlio Bedoya Cardoso estuvo a cargo de la validación, la supervisión y la interpretación agronómica de los resultados; y Jorge Eliecer Martínez Gaitán participó en la conceptualización del estudio, el desarrollo metodológico y la redacción del manuscrito.

Declaración de conflicto de intereses
Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Literatura Citada

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E.-H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. IEEE Access, 7, 129551–129583. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609

Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Lutaladio, N., Hodder, A., Castilla, N., Leonardi, C., De Pascale, S., Qaryouti, M., & Duffy, R. (Eds.). (2013). Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas (FAO Plant Production and Protection Paper No. 217). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/i3284e/i3284e.pdf

Benos, L., Tagarakis, A. C., Dolias, G., Berruto, R., Kateris, D., & Bochtis, D. (2021). Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. Sensors, 21(11), Article 3758. https://doi.org/10.3390/s21113758

Breunig, M. M., Kriegel, H.-P., Ng, R. T., & Sander, J. (2000). LOF: Identifying density-based local outliers. In Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (pp. 93–104). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/335191.335388

Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., & Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In E. Simoudis, J. Han, & U. Fayyad (Eds.), Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp. 226–231). AAAI Press. https://aaai.org/papers/kdd96-037-a-density-based-algorithm-for-discovering-clusters-in-large-spatial-databases-with-noise/

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. Sensors, 18(8), Article 2674. https://doi.org/10.3390/s18082674

Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z.-H. (2008). Isolation forest. In 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining (pp. 413–422). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17

Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z.-H. (2012). Isolation-based anomaly detection. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data, 6(1), Article 3. https://doi.org/10.1145/2133360.2133363

Lu, N., Nukaya, T., Kamimura, T., Zhang, D., Kurimoto, I., Takagaki, M., Maruo, T., Kozai, T., & Yamori, W. (2015). Control of vapor pressure deficit (VPD) in greenhouse enhanced tomato growth and productivity during the winter season. Scientia Horticulturae, 197, 17–23. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.001

Schmidl, S., Wenig, P., & Papenbrock, T. (2022). Anomaly detection in time series: A comprehensive evaluation. Proceedings of the VLDB Endowment, 15(9), 1779–1797. https://doi.org/10.14778/3538598.3538602

Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Che Man, H., & Taheri, S. (2018a). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. International Agrophysics, 32(2), 287–302. https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005

Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2018b). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(1), 1–22. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210

Soussi, M., Chaibi, M. T., Buchholz, M., & Saghrouni, Z. (2022). Comprehensive review on climate control and cooling systems in greenhouses under hot and arid conditions. Agronomy, 12(3), Article 626. https://doi.org/10.3390/agronomy12030626

Yang, Y., Ding, S., Liu, Y., Meng, S., Chi, X., Ma, R., & Yan, C. (2022). Fast wireless sensor for anomaly detection based on data stream in an edge-computing-enabled smart greenhouse. Digital Communications and Networks, 8(4), 498–507. https://doi.org/10.1016/j.dcan.2021.11.004

Zhang, D., Zhang, Z., Li, J., Chang, Y., Du, Q., & Pan, T. (2015). Regulation of vapor pressure deficit by greenhouse micro-fog systems improved growth and productivity of tomato via enhancing photosynthesis during summer season. PLOS ONE, 10(7), Article e0133919. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133919

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas 15 y 16 de octubre de 2026, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Tendencias científicas y convergencia tecnológica en la agricultura en ambiente controlado (CEA) y sistemas de fábricas de plantas (PFAL)

Iván Alejandro García Lemus[1], Raquel Salazar Moreno[1], Irineo López Cruz[1], Jorge Flores Velázquez[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La Agricultura en Ambiente Controlado (Controlled Environment Agriculture, CEA) integra diversas tecnologías digitales para optimizar la producción agrícola; sin embargo, su nivel de convergencia tecnológica aún es poco conocido. El objetivo de este estudio fue analizar las tendencias científicas e identificar oportunidades de integración mediante una revisión bibliométrica de 19,729 publicaciones indexadas en Scopus y Web of Science (2016–2026). El análisis, realizado con Bibliometrix en R, evaluó la producción científica, la estructura conceptual y la convergencia entre cuatro dominios tecnológicos: CEA/*Plant Factory*, Internet de las Cosas, inteligencia artificial y estrategias inteligentes de control. Los resultados muestran un crecimiento sostenido de la investigación y la consolidación de líneas principales de investigación. Sin embargo, solo nueve publicaciones integran simultáneamente los cuatro dominios analizados, evidenciando una limitada convergencia tecnológica. Estos hallazgos identifican una oportunidad para desarrollar sistemas agrícolas inteligentes con arquitecturas tecnológicas más integradas.

Palabras clave: bibliometría; agricultura vertical; Internet de las Cosas; aprendizaje automático; análisis de redes científicas.

Abstract

Controlled environment agriculture (CEA) integrates multiple digital technologies to optimize crop production; however, its level of technological convergence remains unclear. This study analyzed scientific trends and identified integration opportunities through a bibliometric review of 19,729 publications indexed in Scopus and Web of Science between 2016 and 2026. Using Bibliometrix in R, scientific production, conceptual structure, and convergence across four technological domains—controlled environment agriculture/plant factory systems, the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, and intelligent control strategies—were evaluated. The results reveal sustained scientific growth and the consolidation of major research domains. Nevertheless, only nine publications addressed all four domains simultaneously, indicating limited technological convergence. These findings highlight the need for more integrated intelligent architectures in future controlled environment agriculture systems.

[1]Universidad Autónoma Chapingo Km 38.5 carretera México Texcoco. Chapingo México. ivan15081@outlook.com; raquels60@hotmail.com; ilopez@correo.chapingo.mx;
[2]Colegio de Posgraduados Campus Montecillos, Km 36.5, Montecillo Texcoco México. jorgelv@colpos.mx

Keywords: bibliometrics; vertical farming; Internet of Things (IoT); machine learning; scientific network analysis.

Introducción

La creciente demanda mundial de alimentos, la disminución de la disponibilidad de suelo cultivable y los efectos del cambio climático han impulsado el desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes y sostenibles (Kalantari *et al.*, 2018). En este contexto, la Agricultura en Ambiente Controlado (Controlled Environment Agriculture, CEA) ha surgido como una alternativa capaz de optimizar el uso del agua, la energía y el espacio mediante el control de variables ambientales como la temperatura, la humedad, la concentración de CO_2 y la iluminación (Benke & Tomkins, 2017; Shamshiri *et al.*, 2018). Dentro de este enfoque, las fábricas de plantas con iluminación artificial (Plant Factory with Artificial Lighting, PFAL) representan el nivel más avanzado de automatización, al integrar estructuras cerradas, iluminación artificial y control preciso del ambiente para maximizar la productividad y la calidad de los cultivos (Kozai, 2013; Kozai *et al.*, 2015; Graamans *et al.*, 2018).

El desarrollo de los sistemas CEA y PFAL ha estado acompañado por la incorporación de tecnologías digitales que permiten mejorar el monitoreo, la automatización y la toma de decisiones. Entre las más relevantes destacan el Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT), que facilita la adquisición y transmisión de datos mediante redes de sensores (Verdouw *et al.*, 2016; Elijah *et al.*, 2018; Wolfert *et al.*, 2017); la Inteligencia Artificial (Artificial Intelligence, AI) y el Aprendizaje Automático (Machine Learning, ML), empleados para el análisis predictivo, la detección de patrones y la optimización de procesos agrícolas (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; Liakos *et al.*, 2018; Priya Shaikh *et al.*, 2022); y las estrategias inteligentes de control, como el control difuso, adaptativo y predictivo, orientadas a regular automáticamente las condiciones ambientales de producción (Kim *et al.*, 2023). En conjunto, estas tecnologías constituyen la base de los sistemas agrícolas inteligentes y favorecen la evolución de CEA hacia esquemas de mayor autonomía, eficiencia y sostenibilidad.

A pesar del rápido crecimiento de estas líneas de investigación, la literatura científica se ha desarrollado principalmente desde enfoques tecnológicos específicos, persistiendo desafíos relacionados con la implementación y el escalamiento de sistemas integrados de producción vertical (Van Delden *et al.*, 2021). Existen revisiones centradas en CEA, PFAL, IoT, AI, ML o las estrategias inteligentes de control, consideradas de manera independiente; sin embargo, son escasos los estudios que analizan la interacción y la convergencia entre estos dominios tecnológicos dentro de un mismo marco de investigación. Desde la perspectiva de la convergencia tecnológica, entendida como la integración de tecnologías previamente independientes para generar nuevas capacidades y soluciones innovadoras (Hwang, 2020), resulta relevante conocer el grado de articulación alcanzado por estas tecnologías en la investigación sobre CEA y PFAL.

Las revisiones bibliométricas constituyen una herramienta ampliamente utilizada para analizar la evolución de un campo científico, identificar tendencias de investigación y caracterizar la estructura del conocimiento mediante indicadores cuantitativos y técnicas de mapeo científico (Cobo *et al.*, 2011; Zupic & Čater, 2015; Donthu *et al.*, 2021). Este tipo de análisis permite

identificar áreas emergentes, relaciones entre disciplinas y oportunidades de integración tecnológica, proporcionando una visión estructurada del desarrollo científico de un campo de investigación.

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue identificar las tendencias científicas, evaluar la convergencia tecnológica y reconocer oportunidades de integración en la investigación sobre CEA y los sistemas PFAL mediante un análisis bibliométrico de publicaciones indexadas en Scopus y Web of Science durante el periodo 2016–2026. Para ello, se analizaron cuatro dominios tecnológicos: CEA/PFAL, IoT, AI/ML y las estrategias inteligentes de control, con el propósito de determinar el nivel de integración existente e identificar las principales oportunidades para futuras investigaciones.

Materiales y Métodos

Diseño del estudio

Se realizó una revisión bibliométrica de carácter descriptivo y exploratorio con el propósito de analizar la evolución científica, la estructura conceptual y la convergencia tecnológica de la investigación en CEA y PFAL. La metodología bibliométrica permite evaluar cuantitativamente la dinámica de un campo científico mediante indicadores de producción, colaboración y estructura temática, facilitando la identificación de tendencias y oportunidades de investigación (Donthu et al., 2021; Zupic & Čater, 2015).

La información bibliográfica se recuperó de las bases de datos Scopus y Web of Science Core Collection, seleccionadas por su amplia cobertura y reconocimiento en estudios bibliométricos (Elsevier, s.f.; Clarivate, s.f.). Se consideraron artículos científicos y artículos de revisión publicados entre 2016 y 2026, excluyendo capítulos de libro, actas de congresos y otros tipos documentales.

La estrategia de búsqueda se estructuró en cuatro dominios tecnológicos: (i) CEA/PFAL; (ii) IoT; (iii) AI/ML; y (iv) estrategias inteligentes de control. Para cada dominio se diseñaron ecuaciones de búsqueda específicas adaptadas a la sintaxis de ambas bases de datos, utilizando operadores booleanos y consultas sobre el título, el resumen y las palabras clave. Las ecuaciones completas se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Ecuaciones de búsqueda empleadas para la recuperación del corpus bibliográfico en Scopus y Web of Science.

Dominio de búsqueda	**Scopus**	**Web of Science**
CEA/PFAL	TITLE-ABS-KEY(("plant factory" OR "plant factories" OR "controlled environment agriculture" OR "vertical farm*" OR "indoor farm*")) AND PUBYEAR > 2015 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO(DOCTYPE,"re"))	TS=("plant factory" OR "plant factories" OR "controlled environment agriculture" OR "vertical farm*" OR "indoor farm*") AND PY=(2016-2026)

IoT	TITLE-ABS-KEY(("internet of things" OR IoT OR "wireless sensor network*" OR "smart sensor*") AND (agriculture OR farming OR greenhouse OR crop* OR irrigation OR horticulture OR "plant factory" OR "controlled environment agriculture" OR "vertical farm*")) AND PUBYEAR > 2015 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO(DOCTYPE,"re"))	TS=(("internet of things" OR IoT OR "wireless sensor network*" OR "smart sensor*") AND (agriculture OR farming OR greenhouse OR crop* OR irrigation OR horticulture OR "plant factory" OR "controlled environment agriculture" OR "vertical farm*")) AND PY=(2016-2026)
AI/ML	TITLE-ABS-KEY(("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "artificial neural network*" OR "neural network*") AND ("plant factory" OR "controlled environment agriculture" OR greenhouse OR "vertical farm*" OR "indoor farm*")) AND PUBYEAR > 2015 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO(DOCTYPE,"re"))	TS=(("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "artificial neural network*" OR "neural network*") AND ("plant factory" OR "controlled environment agriculture" OR greenhouse OR "vertical farm*" OR "indoor farm*")) AND PY=(2016-2026)
Estrategias inteligentes de control	TITLE-ABS-KEY(("intelligent control" OR "smart control" OR "adaptive control" OR "fuzzy control" OR "model predictive control" OR MPC) AND ("plant factory" OR "controlled environment agriculture" OR greenhouse OR "vertical farm*" OR "indoor farm*")) AND PUBYEAR > 2015 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO(DOCTYPE,"re"))	TS=(("intelligent control" OR "smart control" OR "adaptive control" OR "fuzzy control" OR "model predictive control" OR MPC) AND ("plant factory" OR "controlled environment agriculture" OR greenhouse OR "vertical farm*" OR "indoor farm*")) AND PY=(2016-2026)

Fuente: Elaboración propia

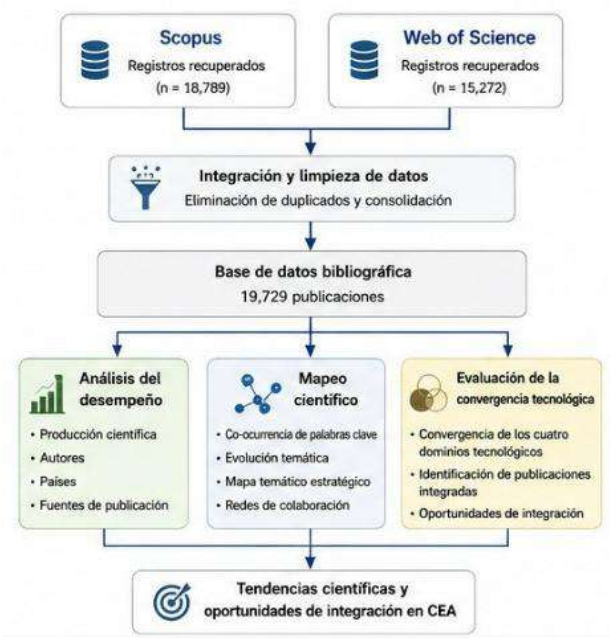


Figura 1. Marco metodológico de la investigación

Los registros recuperados fueron exportados en formato BibTeX, integrados y depurados mediante la función mergeDbSources del paquete Bibliometrix, obteniéndose un corpus consolidado de 19,729 publicaciones. Durante la depuración se conservaron algunos registros con fechas posteriores al periodo de estudio debido a procesos de indexación anticipada, dado que su incidencia sobre los resultados globales fue mínima.

Procesamiento y análisis bibliométrico

El procesamiento bibliográfico se realizó en R (versión 4.5.2) mediante el paquete Bibliometrix (versión 5.4.0) y su interfaz Biblioshiny (Aria & Cuccurullo, 2017). Los registros fueron integrados, depurados y normalizados para construir un corpus bibliográfico homogéneo, sobre el cual se calcularon indicadores de desempeño científico y se generaron mapas de estructura conceptual.

El análisis bibliométrico se desarrolló siguiendo los enfoques de análisis del desempeño científico (*performance analysis*) y mapeo científico (*science mapping*) propuestos por Donthu *et al.* (2021). El primero permitió evaluar la evolución anual de la producción científica, la productividad de autores y países; el segundo comprendió el análisis de coocurrencia de palabras clave, mapas temáticos estratégicos y evolución temática. Para los mapas temáticos se emplearon las palabras clave de autor, considerando los cien términos más frecuentes con un mínimo de diez ocurrencias.

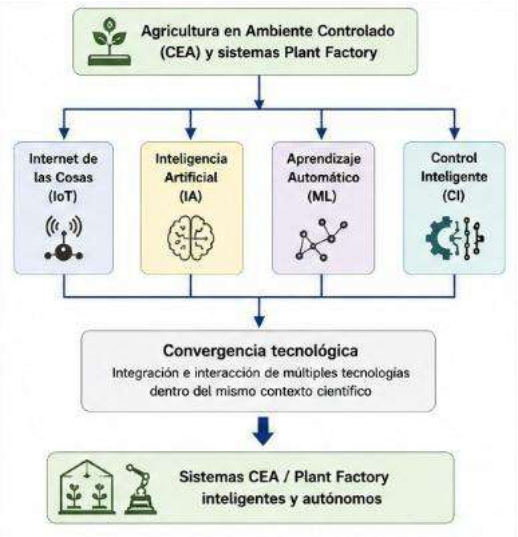


Figura 2. Flujo del procesamiento bibliométrico

Evaluación de la convergencia tecnológica

La principal aportación metodológica del estudio consistió en evaluar la convergencia entre los cuatro dominios tecnológicos analizados. La **convergencia tecnológica** se entiende como el proceso mediante el cual tecnologías previamente independientes interactúan e integran capacidades para generar soluciones innovadoras (Hwang, 2020).

Con base en este enfoque, el corpus bibliográfico se analizó mediante una estrategia de integración implementada en **R**, identificando la coocurrencia de términos representativos de cada dominio en los campos de **título, resumen y palabras clave**. Las publicaciones que incorporaron simultáneamente los cuatro dominios tecnológicos (**CEA/PFAL, IoT, AI/ML y estrategias inteligentes de control**) fueron consideradas evidencia de convergencia tecnológica y constituyeron la base para identificar oportunidades de integración en sistemas **CEA/PFAL**.



Figura 3. Marco conceptual de la convergencia tecnológica

Resultados y discusión

Crecimiento y consolidación del campo científico

La evolución de la producción científica evidencia la rápida consolidación de la investigación en CEA/PFAL como un campo estratégico durante el periodo 2016–2026 (Figura 4). El corpus bibliográfico aumentó de 347 publicaciones en 2016 a 4,271 en 2025, lo que refleja un crecimiento sostenido del interés científico por el desarrollo e integración de tecnologías digitales aplicadas a la producción agrícola en ambientes controlados.

Este crecimiento refleja la expansión de las investigaciones orientadas al diseño, automatización y optimización de sistemas de producción agrícola que integran ambientes controlados, producción vertical, iluminación artificial y tecnologías digitales. En este contexto, la incorporación progresiva de IoT, AI/ML y estrategias inteligentes de control ha favorecido el desarrollo de nuevas aproximaciones para mejorar el monitoreo, la gestión de recursos y la toma de decisiones en sistemas CEA/PFAL.

Este comportamiento refleja la transición de investigaciones centradas inicialmente en infraestructura para agricultura inteligente —como redes de sensores, plataformas de monitoreo y sistemas de adquisición de datos— hacia enfoques que incorporan AI/ML y herramientas avanzadas para el análisis, la predicción y la optimización de procesos agrícolas.

El descenso registrado en 2026 no representa una disminución de la actividad científica, sino un efecto asociado al momento de la recuperación bibliográfica, ya que corresponde a un año aún incompleto. En consecuencia, este comportamiento no modifica la tendencia general de crecimiento observada durante todo el periodo de estudio.

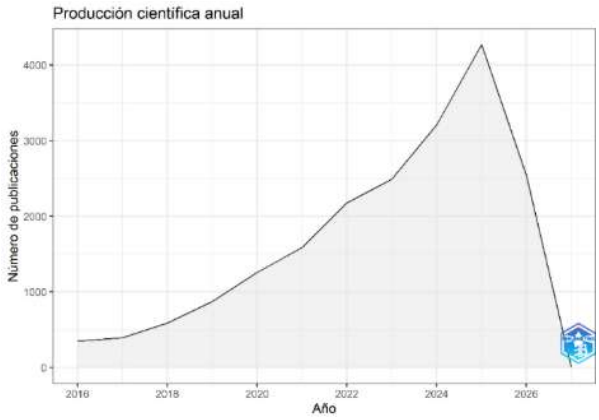


Figura 4. Producción científica anual del corpus bibliográfico sobre CEA/PFAL (2016–2026).

La distribución de la producción científica por autores y países confirma, además, la consolidación internacional del campo (Figuras 5 y 6). Los investigadores más productivos se concentran principalmente en países con un fuerte desarrollo en agricultura tecnificada y tecnologías digitales. Esta distribución geográfica pone de manifiesto que el liderazgo científico en CEA/PFAL se encuentra estrechamente vinculado con regiones que han impulsado políticas

de innovación en automatización, digitalización agrícola y producción intensiva bajo ambientes controlados.

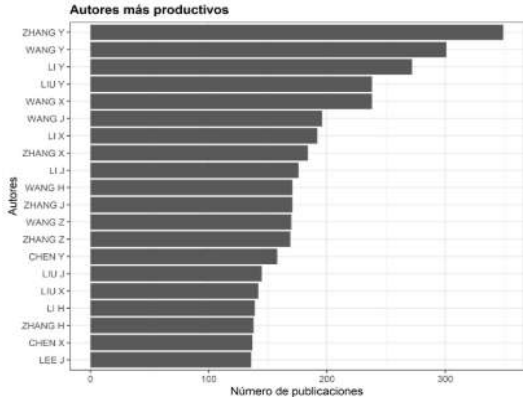


Figura 5. Producción científica por autor del corpus bibliográfico sobre CEA/PFAL.

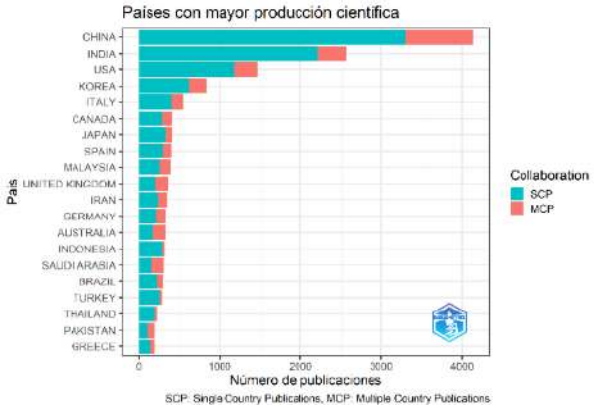


Figura 6. Distribución de la producción científica por país del corpus bibliográfico sobre CEA/PFAL.

En conjunto, estos resultados muestran que la investigación en CEA/PFAL ha alcanzado una etapa de consolidación científica caracterizada por un crecimiento sostenido y una progresiva incorporación de tecnologías digitales. No obstante, el incremento de la producción científica no implica necesariamente una mayor integración entre dichas tecnologías, aspecto que se analiza en las siguientes secciones mediante el estudio de la estructura conceptual y la convergencia tecnológica.

Estructura conceptual del conocimiento

El análisis de la estructura conceptual permitió identificar los principales dominios temáticos que conforman la investigación en CEA/PFAL, así como evaluar la relación entre las tecnologías digitales que sustentan este campo.

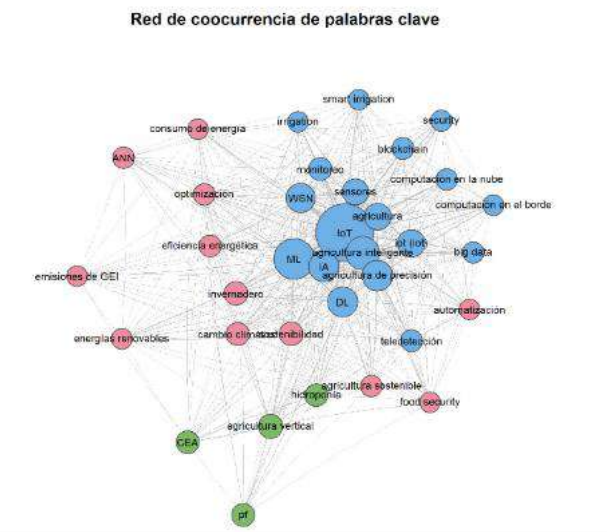


Figura 7. Red de coocurrencia de palabras clave

Los resultados muestran que la agricultura constituye el eje central de la investigación, articulando líneas relacionadas con la optimización, el uso de IoT y la aplicación de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático (IA/ML). Asimismo, se identifican agrupaciones temáticas asociadas con tecnologías de monitoreo, sensores, redes de sensores inalámbricos y automatización, así como con sistemas de agricultura en ambiente controlado (CEA), agricultura vertical e hidroponía. En paralelo, se observa un grupo relacionado con la optimización, las redes neuronales artificiales (ANN) y la eficiencia energética. Aunque estos temas mantienen diversos vínculos dentro de la red, la estructura conceptual evidencia una integración todavía limitada entre los sistemas CEA/PF y las tecnologías de IoT, IA/ML y las estrategias de control inteligente.

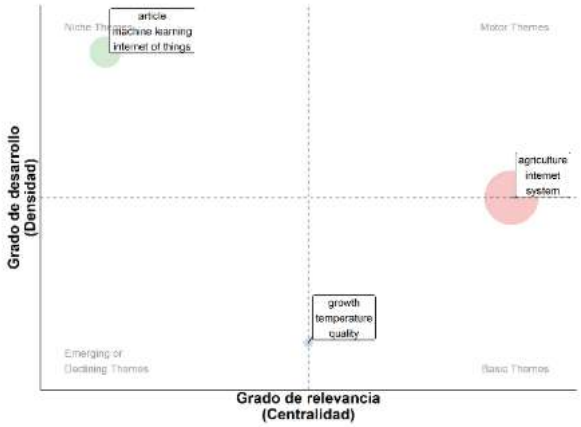


Figura 8. Mapa temático estratégico

El mapa temático evidencia que agriculture, los sistemas inteligentes e IoT ocupan una posición central dentro del campo de estudio, lo que refleja su papel como elementos clave para la

conectividad, el monitoreo y la digitalización de sistemas agrícolas inteligentes. En contraste, los temas relacionados con ML e AI se ubican como áreas altamente desarrolladas a nivel interno, pero con menor conexión con el resto de las líneas de investigación, mostrando características propias de temas de nicho: cuentan con una base científica sólida y especializada.

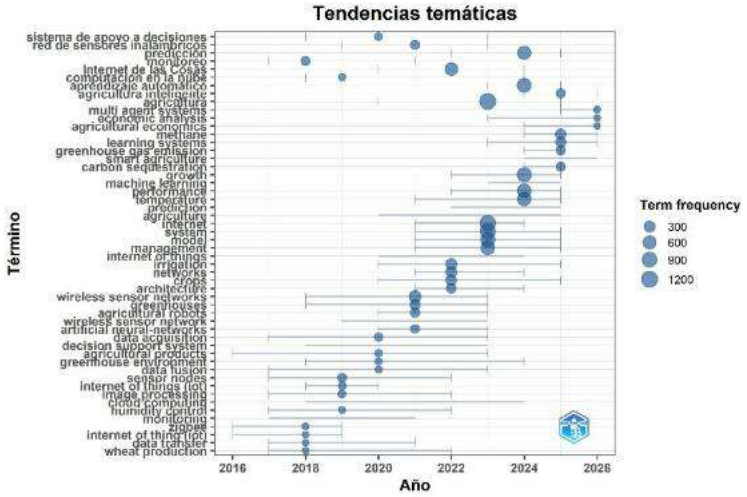


Figura 9. Evolución temporal de los principales términos de investigación

Las tendencias identificadas muestran una evolución desde tecnologías orientadas principalmente al monitoreo y la adquisición de datos hacia enfoques que incorporan ML, modelado predictivo y herramientas de apoyo a la toma de decisiones. Este comportamiento es consistente con los resultados obtenidos mediante el mapa temático y confirma que la digitalización y el uso de técnicas avanzadas de análisis continúan consolidándose como líneas de investigación relevantes dentro del campo.

En conjunto, estos resultados muestran que la investigación ha evolucionado desde la digitalización de los procesos productivos en CEA/PFAL hacia el desarrollo de capacidades avanzadas de análisis y automatización. Sin embargo, la estructura conceptual continúa organizada en dominios tecnológicos parcialmente independientes, lo que sugiere que la integración entre IoT, AI/ML y estrategias inteligentes de control aún no constituye una línea de investigación consolidada. Esta observación se analiza con mayor detalle en la siguiente sección mediante la evaluación de la convergencia tecnológica.

Convergencia tecnológica entre los dominios analizados

La evaluación de la convergencia tecnológica permitió determinar el grado de integración entre los cuatro dominios analizados: CEA/PFAL, IoT, AI/ML y estrategias inteligentes de control. A diferencia de los análisis bibliométricos tradicionales, centrados en la evolución de áreas de investigación independientes, este estudio examinó la presencia simultánea de estos dominios dentro de un mismo documento científico con el fin de identificar evidencia de convergencia tecnológica.

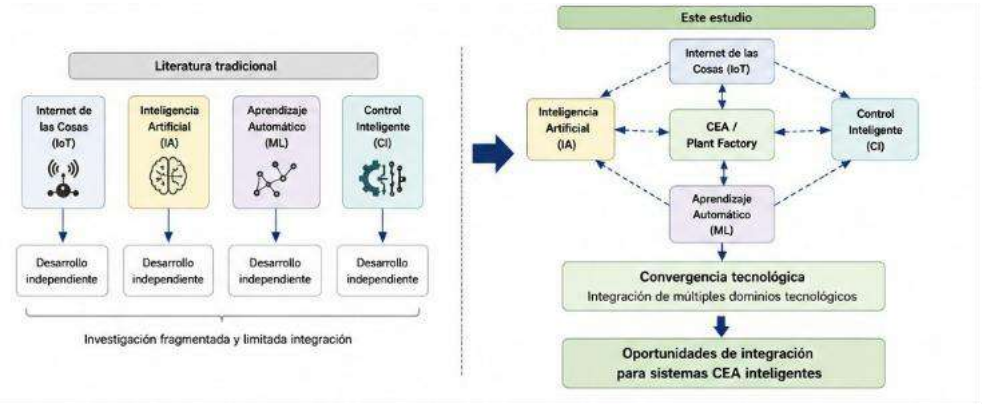


Figura 10. Convergencia tecnológica entre los cuatro dominios analizados

Los resultados muestran que, aunque cada dominio presenta un crecimiento sostenido y una producción científica considerable durante el periodo analizado, solo nueve publicaciones integran simultáneamente los cuatro dominios tecnológicos. Este resultado evidencia que la investigación continúa desarrollándose principalmente desde enfoques especializados, donde predominan estudios centrados en uno o dos dominios tecnológicos, mientras que los trabajos que proponen arquitecturas integradas siguen siendo escasos.

La limitada convergencia observada coincide con la estructura conceptual identificada en las secciones anteriores. La investigación sobre IoT se concentra principalmente en el monitoreo y la adquisición de datos; AI/ML se orienta al análisis predictivo y al apoyo a la toma de decisiones; mientras que las estrategias inteligentes de control se enfocan en la regulación de variables ambientales específicas. Aunque estas tecnologías son complementarias desde el punto de vista funcional, su integración dentro de una misma arquitectura aún representa una línea de investigación incipiente.

Desde la perspectiva de la convergencia tecnológica propuesta por Hwang (2020), estos resultados indican que el proceso de integración entre tecnologías digitales aplicadas a CEA/PFAL todavía se encuentra en una etapa temprana. La evolución del campo ha favorecido el desarrollo individual de capacidades tecnológicas, pero aún existen pocas investigaciones que articulen el monitoreo en tiempo real, el análisis inteligente y el control automático dentro de un mismo sistema de producción.

Esta situación representa una oportunidad para el desarrollo de plataformas agrícolas inteligentes capaces de integrar IoT, AI/ML y estrategias inteligentes de control dentro de arquitecturas unificadas para CEA/PFAL. La consolidación de este enfoque permitiría avanzar hacia sistemas con mayores niveles de autonomía, eficiencia operativa y capacidad de adaptación a condiciones dinámicas de producción.

En conjunto, los resultados confirman que el principal desafío científico ya no consiste únicamente en desarrollar nuevas tecnologías para CEA/PFAL, sino en integrarlas de manera coordinada para construir sistemas inteligentes capaces de optimizar simultáneamente el monitoreo, la toma de decisiones y el control de los procesos productivos.

Conclusiones

El análisis bibliométrico realizado sobre 19,729 publicaciones permitió caracterizar la evolución científica y la estructura conceptual de la investigación en CEA/PFAL durante el periodo 2016–2026. Los resultados evidencian un crecimiento sostenido de la producción científica y la consolidación de los principales dominios tecnológicos asociados a este campo de investigación.

El principal aporte de este estudio consiste en demostrar que, a pesar del desarrollo alcanzado por estos dominios tecnológicos, su integración continúa siendo limitada. La identificación de únicamente nueve publicaciones que incorporan simultáneamente CEA/PFAL, IoT, AI/ML y estrategias inteligentes de control confirma que la convergencia tecnológica aún representa un área emergente de investigación. Este hallazgo pone de manifiesto que el desafío actual no radica en el desarrollo de tecnologías individuales, sino en su integración dentro de arquitecturas inteligentes capaces de combinar monitoreo, análisis, toma de decisiones y control automatizado.

Finalmente, los resultados identifican una oportunidad para orientar futuras investigaciones hacia el diseño de plataformas integradas para CEA/PFAL, incorporando IoT, AI/ML y estrategias inteligentes de control dentro de arquitecturas unificadas. Desde esta perspectiva, el presente trabajo proporciona una visión global del estado del conocimiento y un marco de referencia para el desarrollo de sistemas agrícolas inteligentes con mayores niveles de automatización, eficiencia y sostenibilidad.

Literatura citada

Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (eds.) (2015). Plant factory: An indoor vertical farminsystem for efficient quality food production. 2.ª ed. San Diego, Estados Unidos: Academic Press.

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. Journal of Informetrics, 11(4), 959–975. https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007

Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. Sustainability: Science, Practice and Policy, 13(1), 13–26. https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054

Clarivate. (s. f.). Web of Science Core Collection. Clarivate. [En línea]. Disponible en: https://clarivate.com/academia-government/scientific-andacademicresearch/research-discovery-and-referencing/web-of-science/web-of-science-core-collection/ [Fecha de consulta: 01 de julio de 2026].

Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2011). Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 62(7), 1382–1402. https://doi.org/10.1002/asi.21525

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. Journal of Business Research, 133, 285–296. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070

Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. N. (2018). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. IEEE Internet of Things Journal, 5(5), 3758–3773. https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2844296

Elsevier. (2020). Scopus Content Coverage Guide. Elsevier. [En línea]. Disponible en: https://www.elsevier.com/__data/assets/pdf_file/0007/69451/Scopus_ContentCoverae_Guide_WEB.pdf [Fecha de consulta: 01 de julio de 2026].

Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. Agricultural Systems, 160, 31–43. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003

Hwang, I. (2020). The effect of collaborative innovation on ICT-based technological convergence: A patent-based analysis. PLoS ONE, 15(2), e0228616. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228616

Kalantari, F., Tahir, O. M., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2018). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. Journal of Landscape Ecology, 11(1), 35–60. https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0013

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. Computers and Electronics in Agriculture, 147, 70–90. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016

Kim, T. H., Lee, K. Y., Ali, M. R., Reza, M. N., Chung, S. O., & Kang, N. R. (2023). PID control for greenhouse climate regulation: A review. Precision Agriculture Science and Technology, 5(2), 93–106. https://doi.org/10.12972/pastj.20230008

Kozai, T. (2013). Plant factory in Japan: Current situation and perspectives. Chronica Horticulturae, 53(2), 8–11.

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. Sensors, 18(8), 2674. https://doi.org/10.3390/s18082674

Shaikh, T. A., Rasool, T., & Lone, F. R. (2022). Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming. Computers and Electronics in Agriculture, 198, 107119. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107119

Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(1), 1–22. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210

van Delden, S. H., Malleshaiah, S., Butturini, M., Graamans, L. J. A., Heuvelink, E., Kacira, M., Kaiser, E., Klamer, R. S., Klerkx, L., Loeber, A., Kootstra, G., Schouten, R. E., Stanghellini, C., van Ieperen, W., Verdonk, J. C., Vialet-Chabrand, S., Woltering, E. J., van de Zedde, R., Zhang, Y., & Marcelis, L. F. M. (2021). Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems. Nature Food, 2(12), 944–956. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00402-w

Verdouw, C. N., Wolfert, J., Beulens, A. J. M., & Rialland, A. (2016). Virtualization of food supply chains with the Internet of Things. Journal of Food Engineering, 176, 128–136. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.009

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in smart farming: A review. Agricultural Systems, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric methods in management and organization. Organizational Research Methods, 18(3), 429–472. https://doi.org/10.1177/1094428114562629

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas 15 y 16 de octubre de 2026, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Automatización de la generación de modelos hidráulicos EPANET a partir de datos geoespaciales abiertos: una herramienta de apoyo para la enseñanza del diseño de redes de distribución de agua potable

Jair Del Valle Morales[1], Erika Hernández Vivar[1], Claudia Rojas Serna[1], José Antonio Quevedo Tiznado[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

El diseño de redes de distribución de agua potable exige que el estudiante de ingeniería hidráulica recorra de forma manual operaciones repetitivas con el uso de Sistema de Información Geográfica antes de concentrarse en el análisis hidráulico: digitalización de puntos de entrega, llenado de campos obligatorios y exportación mediante complementos hacia EPANET. Este artículo documenta un flujo de trabajo automatizado en Python, con fines didácticos, desarrollado en un curso de hidráulica de la Universidad Autónoma Metropolitana. A partir de coordenadas límite (caja o box) por manzana, el script consulta Overture Maps para obtener direcciones reales o, en su defecto, huellas de edificaciones y vialidades, generando nodos de entrega exportados a KML para revisión visual en Google Earth Pro. Tras la corrección manual, el script numera de nueva cuenta y de manera consecutiva los nodos y, con wntr, construye el modelo de red y lo exporta como archivo .inp para EPANET. Los resultados muestran una reducción sustancial de pasos manuales sin eliminar la revisión humana indispensable.

Palabras clave: modelación hidráulica, automatización geoespacial, EPANET, Overture Maps, enseñanza de la ingeniería hidráulica.

Abstract

The design of drinking water distribution networks requires hydraulic engineering students to manually perform repetitive operations using Geographic Information Systems before focusing on the hydraulic analysis itself: digitizing delivery points, filling in mandatory fields, and exporting through plug-ins into EPANET. This article documents an automated Python workflow, developed for teaching purposes, within a hydraulics course at Universidad Autónoma Metropolitana. Starting from boundary coordinates (bounding box) per city block, the script queries Overture Maps to obtain real address points or, alternatively, building footprints and street segments, generating delivery nodes exported to KML for visual review in Google Earth Pro. After manual correction, the script assigns new, consecutive numbers to the nodes and, using wntr, builds the network model and exports it as an .inp file for EPANET.

[1]Universidad Autónoma Metropolitana. jdelvallem@xanum.uam.mx; heverika@xanum.uam.mx; crojas@xanum.uam.mx; aquevedo@xanum.uam.mx

Results show a substantial reduction in manual steps without removing indispensable human review.

Keywords: hydraulic modeling, geospatial automation, EPANET, Overture Maps, hydraulic engineering education.

Introducción

En los cursos de hidráulica aplicada al diseño de redes de distribución de agua potable, una parte importante del trabajo práctico consiste en construir, a partir de una zona urbana o rural real, el modelo de red que posteriormente se analiza en un programa como es EPANET (Rossman et al., 2020). Actualmente este proceso se enseña de manera manual: se digitaliza una capa de puntos en Google Earth Pro (Google, 2026a), para posteriormente visualizarlos en un Sistema de Información Geográfica, se organiza en un grupo de capas, se completan a mano los campos obligatorios de la tabla de atributos de estas capas (por ejemplo campos con nombres específicos: elevation, desc, length) y, finalmente, se emplea un plugin o complemento de QGIS (Dawson et al., 2026), en este caso para los cursos de ingeniería hidráulica es ImportEpanetInpFiles (Kyriakou, 2022) para generar o exportar el archivo .inp que EPANET puede interpretar. Este procedimiento, aunque pedagógicamente valioso porque expone al estudiante el paso a paso para llegar a la estructura interna de un modelo de red, es también repetitivo, sensible a errores de captura y consume una proporción considerable del tiempo de clase que podría dedicarse al análisis hidráulico propiamente dicho (selección de diámetros, verificación de presiones, interpretación de pérdidas de carga, entre otros).

El problema se agudiza cuando el ejercicio deja de limitarse a una sola manzana o bloque y se busca representar un sector urbano completo, integrado por varias manzanas conectadas entre sí: la captura manual de decenas o cientos de nodos y tramos de tubería, así como la identificación de los puntos de conexión entre manzanas vecinas, se vuelve poco viable dentro del tiempo disponible de un curso.

En los últimos años se han vuelto accesibles conjuntos de datos geoespaciales abiertos de cobertura global, como Overture Maps (Overture Maps Foundation, s.f.), así como bibliotecas de Python orientadas específicamente al modelado de redes de agua, como wntr (Water Network Tool for Resilience) (Klise et al., 2023), desarrollada por la U.S. Environmental Protection Agency y Sandia National Laboratories, compatible con el formato .inp de EPANET. Estas herramientas abren la posibilidad de automatizar la fase mecánica y repetitiva del proceso —obtención de puntos de entrega, asignación de coordenadas, elevación y construcción topológica de la red— sin renunciar a la revisión y el criterio del usuario en las decisiones que sí lo requieren.

El objetivo de este trabajo es documentar el diseño, la lógica y el funcionamiento de un flujo de trabajo automatizado, desarrollado en Python (Python Software Foundation, 2026), que va desde la delimitación geográfica (mediante una caja/box) de una o varias manzanas de estudio hasta la generación de un archivo .inp de EPANET, manteniendo como punto de partida conceptual el procedimiento manual en Google Earth Pro – QGIS – EPANET que actualmente se emplea con los estudiantes. Se presenta un pipeline o flujo de trabajo como una herramienta de apoyo educativo que complementa —y no sustituye— la comprensión del flujo manual,

conservando deliberadamente y con una importancia crucial un punto de revisión humana entre sus etapas.

Materiales y Métodos

El flujo de trabajo se desarrolló en Python 3, dentro de un entorno Anaconda, es decir, se creó un ambiente específico albergando ciertas librerías o bibliotecas para el buen funcionamiento de este proyecto. Algunas de estas librerías son: *overturemaps* (Overture Maps Foundation, 2026), *geopandas* (Van den Bossche et al., 2026), *shapely* (Gillies et al., 2025), *simplekml* (Eisoldt, 2021) y *wntr* (Klise et al., 2023), entre otras. El código se organiza en un único script (por el momento así se tiene como una versión 1 este proyecto) estructurado mediante "banderas" de control que corresponden a las distintas etapas del proceso, lo que permite ejecutar o repetir de forma selectiva cada fase.

Punto de partida: el flujo de trabajo manual Google Earth Pro – QGIS – EPANET

Antes de automatizar cualquier etapa, se documentó y sistematizó el procedimiento manual que actualmente se realiza con los estudiantes siguiendo la aplicación en serie de los programas siguientes de licencia libre: Google Earth Pro – QGIS – EPANET, todo esto fue lo que sirvió como referencia conceptual para el diseño del pipeline mejorado que se discute más adelante. En dicho procedimiento, se plantea como punto de partida la definición básica de puntos, los cuales fungen como nodos de entrega de agua dentro del software EPANET. Estos puntos son la base de todo el proceso para llegar a formar el modelo de red que requiere el programa. Entonces, se plantea dentro del curso el uso por ejemplo de Google Earth Pro, un programa completamente abierto sin restricciones en su uso y con una interfaz con opciones o menús bastantes sencillos y amigables para que cualquier persona, o en este caso para que cualquier estudiante use sin mayor complicación. Entonces, a partir de la definición de puntos que se asignan manualmente a los domicilios que se pueden ver en la información visual o en el mapa de Google Earth Pro, se forma un circuito o red por bloque o manzana. Se parte de una condición sencilla de definir estos puntos para una sola manzana y poder avanzar hasta el modelo con EPANET para posteriormente discutir los resultados de las variables hidráulicas que arroja el programa, que es el objetivo principal de todo esto, pero se insiste que se hace esto para una sola manzana, porque, aunque no lo parezca, el tiempo que demanda para realizar este paso para los jóvenes resulta ser muy grande. Ahora bien, entre Google Earth Pro y EPANET existen una serie de pasos intermedios que tienen un carácter repetitivo, pero que son necesarios porque sin ellos no se podría formar el circuito de tubos y nodos que se modelarán en EPANET. En términos generales, es pasar la información de Google Earth Pro a QGIS, para ahí trabajar esta información de tal manera que en lugar de hacer todo completamente manual dentro de EPANET, en QGIS se pueda “automatizar ” un poco el proceso; aquí es donde se adecua la información, se ingresan ciertos datos, se arman las capas vectoriales necesarias para luego echar mano de algún complemento disponible que nos permita trasladar esa información en QGIS a EPANET, es decir, generar el archivo .inp. Esta explicación sobre el recorrido manual, útil para que el estudiante comprenda qué información necesita EPANET y de dónde proviene, fue el punto de partida para decidir qué pasos convenía automatizar y cuáles debían conservarse de manera obligada bajo control humano.

Fuente de datos geoespaciales: Overture Maps

Como fuente de datos geoespaciales se utilizó Overture Maps, un conjunto de datos abiertos que combina automáticamente información de OpenStreetMap con Microsoft Building Footprints (huellas de edificaciones detectadas mediante inteligencia artificial sobre imágenes satelitales), entre otras fuentes, ya depurada y sin duplicados. Se prefirió sobre el uso exclusivo de OpenStreetMap porque ofrece mejor cobertura en zonas periurbanas o recientemente urbanizadas de México, que con frecuencia no están mapeadas de forma detallada a mano. El acceso a los datos se realiza mediante la biblioteca overturemaps para Python, consultando los temas "address" (direcciones), "building" (edificaciones) y "segment" (vialidades), siempre delimitando la consulta a la zona de interés mediante un índice espacial (STAC) que evita descargar el catálogo global completo, porque se detectó que hacerlo así de manera total o completa implicaría mucho tiempo de espera en la respuesta que se pide a los servidores o lugares virtuales donde se encuentra almacenada esta información.

Delimitación de la zona de estudio y escalamiento a sector

Cada manzana o circuito de estudio se delimita mediante una caja envolvente (bbox) definida por sus coordenadas geográficas límite —norte, sur, este y oeste, en grados decimales—, obtenidas ubicando la esquina superior derecha y la esquina inferior izquierda de la zona en Google Earth Pro o Google Maps (Google, 2026b). Para permitir el escalamiento del ejercicio de una sola manzana a un sector completo, el script utiliza un registro maestro llamado CIRCUITOS: una lista en la que cada elemento es un diccionario con un número de manzana, su bbox correspondiente y un indicador booleano para cerrar o no el circuito de tuberías. Cada manzana se identifica con un número de tres dígitos con relleno de ceros (por ejemplo, 001), lo que permite procesar en teoría hasta 999 manzanas dentro de un mismo sector, y cada nodo generado se prefija con dicho número (por ejemplo, M001_N1). Un filtro opcional, NUMEROS_A_PROCESAR, permite repetir el procesamiento de solo algunas manzanas específicas —por ejemplo, cuando se agrega una manzana nueva a un sector ya trabajado—, aplicable únicamente a las etapas de generación y reajuste numérico de nodos, esto último es porque al realizar la inspección de forma obligada y manual en los primeros archivos kml que se generan, existe la posibilidad de remover nodos, lo que afecta la numeración consecutiva perfecta que se tenía originalmente, lo que conlleva a realizar este reajuste numérico de los nodos, y esto es así simplemente por la facilidad y cuestiones de practicidad a la hora de revisar el modelo del circuito o red de tuberías dentro de EPANET, es decir, que exista una numeración consecutiva de nodos y tuberías; la etapa final de exportación del archivo .inp para ser interpretada por EPANET siempre procesa el registro CIRCUITOS completo, de manera que el archivo de sector resultante sea siempre consistente con la totalidad de las manzanas incorporadas.

Generación automática de nodos de entrega (Bandera 1)

La generación automática de nodos de entrega sigue dos estrategias, aplicadas en cascada. Como Plan A, el script intenta obtener puntos de dirección reales (tema "address" de Overture Maps); si la zona cuenta con cobertura suficiente, estos puntos se emplean directamente como nodos de entrega. Como Plan B, cuando no se encuentran direcciones (el tema de direcciones

de Overture Maps se encuentra todavía en fase "alpha", con cobertura desigual), el script descarga las huellas de las edificaciones y las vialidades de la zona, calcula el centroide de cada edificación y lo desplaza hacia el punto de su fachada más cercano a la calle más próxima, siempre que exista una vialidad dentro de un radio razonable (60 metros); en caso contrario, el nodo se conserva en el centroide original. Cada nodo generado se exporta, por manzana, a los formatos KML y GeoPackage, con un código de colores que facilita su revisión posterior: amarillo para direcciones reales, verde para puntos ajustados automáticamente al frente de una calle, rojo para puntos que deben revisarse a mano por no tener una calle cercana identificada, y naranja para puntos agregados manualmente en etapas posteriores. Este Plan B requiere demasiado trabajo, incluso es poco viable porque realmente no se detectó ninguna ganancia entre realizar la definición de puntos uno a uno a mano y la implementación de este Plan B. Hasta el momento el Plan A ha dado excelentes resultados, lo cual implica que la revisión/adecuación manual que se hace cuando se genera la primera vez los archivos KML sea en general mucho menor con respecto al Plan B, pero ambos planes se encuentran implementados dentro del script por medio de opciones lógicas IF-ELSE.

Revisión y corrección manual en Google Earth Pro

El archivo KML generado para cada manzana se revisa visualmente en Google Earth Pro, apoyándose en la imagen satelital y en una guía escrita elaborada para este fin. En esta etapa se corrigen los puntos marcados en rojo (moviéndolos al frente real del domicilio), se eliminan duplicados o errores evidentes, y se agregan manualmente los puntos que el proceso automático no pudo generar. Esta etapa se mantiene deliberadamente fuera del alcance de la automatización: se considera un punto de control de calidad insustituible, en el que el criterio de quien conoce el terreno —el profesor o el estudiante— no puede ser replicado de manera confiable por un algoritmo.

Reajuste numérico de nodos (Bandera 2)

Una vez editado a mano el KML de cada manzana, el script vuelve a leerlo, reajusta la numeración de los nodos de forma consecutiva en sentido horario a partir de la esquina noroeste (N1, N2, N3…) y sobrescribe el KML y el GeoPackage original de esa manzana, ya con el prefijo correspondiente (por ejemplo, M002_N1). Este reajuste numérico asegura que el orden de los nodos sea consistente y predecible antes de construir la topología de tuberías en la siguiente etapa.

Construcción del modelo hidráulico y exportación a EPANET (Bandera 3)

A partir del GeoPackage corregido y con su ajuste numérico de los nodos de cada manzana, el script construye directamente el modelo hidráulico utilizando la biblioteca wntr (Water Network Tool for Resilience), sin pasar por QGIS ni por el complemento ImportEpanetInpFiles. Primero se calculan las coordenadas UTM de cada nodo, detectando automáticamente la zona UTM correspondiente a la ubicación de los datos. Después se obtiene la elevación real de cada nodo mediante consultas por lotes a la API pública Open-Elevation; en los nodos donde no fue posible obtener un valor, se utiliza un valor de referencia de 1000 metros como respaldo (valor bandera o *fillvalue*), que debe ajustarse posteriormente si es necesario. A continuación, se generan los tramos de tubería de forma secuencial entre nodos consecutivos de cada manzana,

con la posibilidad de cerrar o no el circuito (uniendo el último nodo con el primero) mediante el indicador **cerrar_circuito** de cada manzana, y se asigna a cada tubería un estado abierto ('O') (esta 'O' se refiere a un estado inicial "abierto" para cada tramo de tubo). Finalmente, se construye el objeto WaterNetworkModel de wntr y se exporta el archivo .inp, empleando la fórmula de pérdida de carga de Darcy-Weisbach (Sotelo Ávila, 2005) (esta fórmula es la sugerida dentro del curso para el cálculo de las pérdidas de energía por fricción, por eso a partir de este paso se asegura que el dato de rugosidad de las tuberías lleve las unidades correctas para el cálculo correcto del factor de fricción *f* que se utiliza en la ecuación de Darcy-Weisbach), en la que la rugosidad se expresa como rugosidad absoluta en milímetros (acero comercial, ε = 0.045 mm; acero galvanizado, ε = 0.15 mm; o un valor personalizado definido por el usuario), y un diámetro de tubería de 25.4 mm (1 pulgada) como valor de referencia editable posteriormente dentro de EPANET.

La pérdida de carga por fricción se calcula, para cada tramo de tubería, mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \tag{1}$$

donde $\boldsymbol{h_f}$ es la pérdida de carga por fricción, en m, $\boldsymbol{f}$ el factor de fricción de la ecuación de Darcy – Weisbach, adimensional, la cual es función de la rugosidad relativa y del número de Reynolds, $\boldsymbol{L}$ la longitud del tramo de tubo, en m, $\boldsymbol{D}$ el diámetro interno de la tubería, en m, $\boldsymbol{v}$ la velocidad media del flujo, en m/s, y $\boldsymbol{g}$ la aceleración de la gravedad, en m/s²; wntr calcula $\boldsymbol{f}$ internamente a partir de la rugosidad absoluta indicada, en lugar de emplear el coeficiente adimensional *C* de la fórmula de Hazen-Williams (Sotelo Ávila, 2005).

Cuando el sector de estudio está compuesto por varias manzanas, el script detecta automáticamente las conexiones físicas entre manzanas vecinas —las válvulas de sector— mediante una búsqueda espacial por vecino más cercano (estructura KDTree), considerando conectados los nodos de manzanas distintas que se encuentran dentro de un radio de 8 metros; estos nodos se identifican con la etiqueta desc = 'valvula_sector'. Todas las manzanas del registro CIRCUITOS se fusionan entonces en un único archivo, sector_completo.inp, dado que EPANET no permite cargar simultáneamente varios archivos .inp independientes. Como respaldo visual —no indispensable para llegar al .inp, pero útil para su revisión en QGIS— el script genera además un GeoPackage (sector_paraRevision.gpkg) con las capas de nodos y tuberías, y un proyecto QGIS (sector_paraRevision.qgz) con dichas capas ya agrupadas, replicando la misma estructura de capas que se arma a mano en el trabajo manual.

Es importante señalar que el archivo .inp generado incluye únicamente nodos de tipo unión (junction) y tuberías (links): EPANET requiere, además, al menos un embalse o tanque como fuente de agua para poder ejecutar una simulación, elemento que debe agregarse posteriormente dentro de EPANET; esta etapa corresponde a lo que en el flujo manual se completaba directamente en el programa, ya con el modelo topológico importado.

Depuración del pipeline durante el escalamiento a múltiples manzanas

Durante el escalamiento del pipeline de una sola manzana a un sector de varias manzanas se detectó un error relevante para la validación del proceso: los identificadores de tubería (Tubo_01, Tubo_02, …) no estaban prefijados por manzana, a diferencia de los identificadores de nodo. Como consecuencia, cuando dos o más manzanas generaban tuberías con el mismo identificador, wntr sobrescribía silenciosamente las tuberías duplicadas al construir el modelo de red, sin producir ningún mensaje de error. Al comparar el número de tuberías esperado con el número real de tuberías presentes en el archivo .inp final, se identificó, a manera de ejemplo los números que a continuación se mencionan, que 34 de 115 tuberías se habían perdido de esta manera. La corrección consistió en aplicar a los identificadores de tubería el mismo esquema de prefijo por manzana ya utilizado para los nodos (por ejemplo, M002_Tubo_01), garantizando que ningún identificador se repitiera entre manzanas distintas. Este hallazgo se documenta aquí de manera explícita porque ilustra, con un caso concreto, un riesgo general al automatizar procesos iterativos sobre múltiples objetos: las convenciones de nomenclatura compartidas deben delimitarse ("scoping") correctamente para evitar pérdidas de información silenciosas, riesgo que no siempre es evidente hasta que se contrasta el resultado contra un conteo esperado.

Resultados y discusión

Como ejemplo del funcionamiento del pipeline, se muestra el resultado obtenido para una de las manzanas procesadas durante el desarrollo de este trabajo. El Plan A tuvo éxito en esta zona: el script encontró cobertura suficiente de direcciones reales en Overture Maps y las utilizó directamente como nodos de entrega. Tras la revisión y corrección manual en Google Earth Pro, la manzana quedó integrada por 39 nodos de entrega en total, de los cuales 34 provienen directamente de direcciones reales de Overture Maps y 5 fueron agregados manualmente durante la etapa de revisión; de esos 5 nodos que se agregaron manualmente, 4 nodos se agregaron justo para darle forma real circuito o red de tuberías, que coinciden con las esquinas de la manzana (puntos N1, N10, N23 y N26) y además estos nodos fungirán como puntos en el cambio de dirección del flujo, pero no serán nodos de demanda o entrega del líquido; por otro lado, el nodo N24 se asignó para un domicilio donde la identificación automática no correspondía con el domicilio que existe de acuerdo con la información o imagen satelital (Figura 1). Para este caso de prueba o caso piloto, el Plan A cubre la mayoría de los nodos de forma automática, mientras que la intervención manual se concentra en la asignación de un número reducido de puntos, en lugar de asignar o definir la totalidad de los puntos como ocurriría en un levantamiento o diseño completamente manual.



Figura 1. Definición de los nodos finales una vez ejecutada la Bandera 2 en el script de Python. En este mapa, se observa claramente identificados con los marcadores de color naranja los nodos que se asignaron manualmente, mientras que, en color amarillo, se muestran aquellos nodos donde el script logró posicionar de manera exitosa frente a cada domicilio un punto o nodo (imagen tomada a partir del archivo KML generado y modificado con el script de Python).

En términos cualitativos, la comparación entre el flujo manual documentado (digitalización punto por punto, llenado manual de los campos elevation, desc y length, entre otros tantos campos o atributos, generación de topología con "Puntos a ruta" y "Explotar líneas" —comandos o herramientas internas de trabajo de QGIS—, y exportación mediante el complemento ImportEpanetInpFiles) y el flujo automatizado muestra que la mayor parte de las operaciones mecánicas y repetitivas —obtención de coordenadas, asignación de elevación real, construcción de la topología de tuberías y exportación al formato .inp— pueden resolverse en una sola ejecución del script, sin que ello elimine la etapa de revisión visual obligada, que se conserva intencionalmente como responsabilidad del usuario. El beneficio es más notorio al escalar de una manzana a un sector completo: la identificación de los puntos de conexión entre manzanas vecinas, que en el flujo manual implicaría comparar visualmente varias capas para encontrar coincidencias, se resuelve automáticamente mediante la búsqueda espacial por vecino más cercano, y la fusión de todas las manzanas en un único archivo sector_completo.inp evita tener que ensamblar manualmente la topología completa del sector. Este nuevo ejemplo se probó, generando la información de tres bloques. En la Figura 2 se muestran el ejemplo de tres manzanas una vez depurados manualmente los archivos KML y ejecutando la Bandera 2 del script, así en este orden. El tiempo de trabajo para hacer este ejemplo de tres manzanas fue de aproximadamente entre 5 y 10 minutos (quitar nodos, asignar nuevos nodos, posicionar algunos de ellos de forma manual). Cabe mencionar que la ejecución de las operaciones que hace la Bandera 2 es de apenas unos cuantos segundos, y el resultado es lo que se observa en la Figura 2.



Figura 2. Definición final de los puntos o nodos de tres manzanas (imagen tomada a partir de los 3 archivos KML generados con el script de Python).

Desde el punto de vista educativo, esta reducción del trabajo mecánico permite reorientar el tiempo de clase hacia la interpretación hidráulica de los modelos ya construidos —selección de diámetros, revisión de presiones y velocidades del flujo, análisis de pérdidas de carga— en lugar de agotarlo en la captura de datos. Adicionalmente, dado que los parámetros del proceso (bbox de cada manzana, tipo de rugosidad, diámetro de tubería, apertura o cierre de circuito) quedan expuestos como variables simples y explícitas al inicio del script, los estudiantes pueden explorar distintos escenarios de red sin necesidad de modificar la lógica interna del programa.

Además, como complemento y con esta visión educativa, con base en la experiencia adquirida en los cursos impartidos donde se les pidió a los jóvenes que realizaran un proyecto con todas las características que se han señalado en este artículo, a continuación, se muestra en el Cuadro 1 algunos hallazgos en el proceso enseñanza-aprendizaje que se discuten enseguida.

Cuadro 1. Hallazgos encontrados durante la elaboración de un proyecto del diseño de una red de tuberías para abastecimiento de agua potable solicitados a jóvenes en algunos cursos de ingeniería hidráulica en la Universidad Autónoma Metropolitana.

Número de equipo	**Éxito en la ejecución total del proyecto de tuberías**
1	0%, sin éxito
2	5%, sin éxito
3	0%, sin éxito
4	0%, sin éxito
5	5%, sin éxito

6	5%, sin éxito
7	20% de éxito
8	100%, éxito total

Fuente: datos propios medidos y obtenidos a partir de la revisión hecha a los trabajos realizados por parte de los estudiantes.

En el Cuadro 1, la columna 1 identifica a cada uno de los equipos formados durante uno de los cursos de ingeniería hidráulica, mientras que la columna 2 muestra, en porcentaje, el logro alcanzado en la conclusión del proyecto por cada equipo. En el Cuadro 1 se observan porcentajes de éxito de 20% o menores en la mayoría de los equipos. Esta situación pudiera deberse principalmente a una falta de seguimiento constante en la ejecución del proyecto. Podrían plantearse muchas explicaciones, pero, con base en el número reducido de solicitudes de asesoría recibidas, lo que sí se puede afirmar es que los equipos percibieron el proceso paso a paso —formar su circuito o red de tuberías y alcanzar un nivel de competencia para automatizar procesos repetitivos— como una tarea sencilla. En términos generales lo es, pero al parecer las dificultades reales aparecen cuando los estudiantes deben comenzar a diseñar directamente a partir del uso del software, etapa en la que su desempeño decae de forma notable. En contraste, en el Cuadro 1 se observa que un equipo alcanzó un nivel de éxito del 100% en la ejecución del proyecto. Este resultado se debe a que dicho equipo dio seguimiento constante a la tarea y solicitó asesoría en reiteradas ocasiones, lo que le permitió lograr el correcto funcionamiento del flujo QGIS–EPANET. Esta experiencia, obtenida durante el proceso de enseñanza-aprendizaje, sentó las bases para desarrollar un proceso que en cursos posteriores pudiera implementarse con los estudiantes, donde se espera una mejoría sustancial cuando se les solicite elaborar un proyecto de estas características, enfocado principalmente en los temas propios de la ingeniería hidráulica, dejando los procesos repetitivos como un segundo objetivo. Esta es, justamente, la esencia primordial de este artículo.

Como punto último dentro de este trabajo, el pipeline o ruta de trabajo presenta, sin embargo, una limitación identificada durante su desarrollo y documentada de manera independiente para atenderse en trabajos futuros: el trazado de tuberías, al construirse de forma secuencial entre nodos consecutivos, funciona adecuadamente para manzanas cuyo perímetro se aproxima a una cadena lineal de domicilios, pero no representa correctamente la topología de manzanas con calles interiores ramificadas, entronques en "T" o formas irregulares, casos que aún no se han presentado en las manzanas trabajadas hasta ahora. De manera similar, la simulación hidráulica propiamente dicha dentro de EPANET —que en el flujo de trabajo corresponde a un tercer paso, posterior a la generación del archivo .inp— no forma parte del alcance de este trabajo y se plantea como la siguiente etapa de desarrollo. Para finalizar esta discusión de resultados, a continuación, se muestra el modelo de tuberías y nodos generado por medio de esta herramienta para el ejemplo donde se trabajó con tres manzanas o bloques (Figura 3).

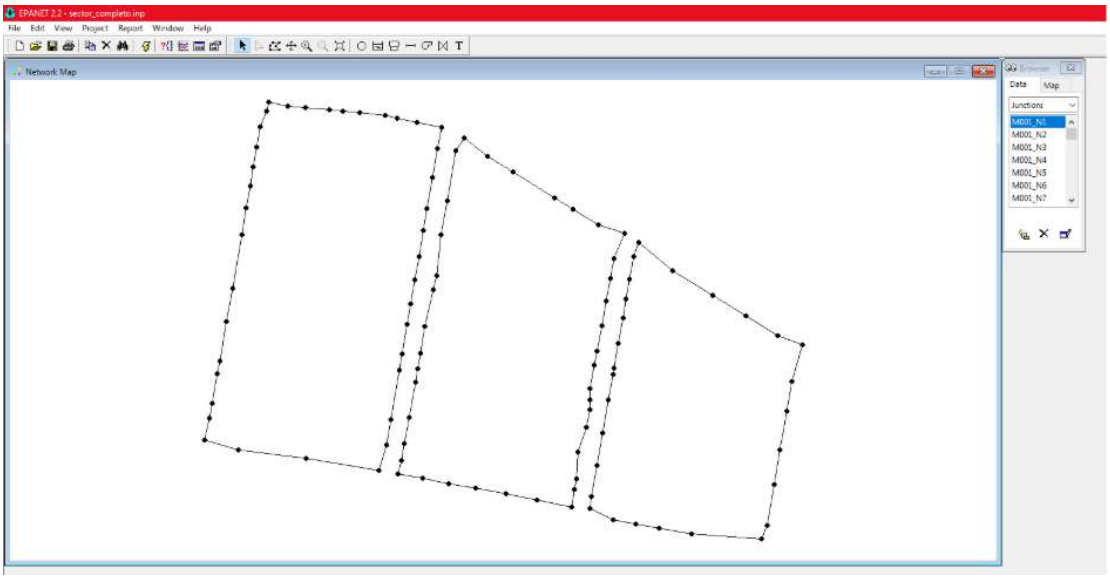


Figura 3. Modelo de la red de tuberías y nodos obtenido con el script de Python listo para su acondicionamiento final para la simulación dentro del software EPANET.

Conclusiones

Se documentó el diseño e implementación de un flujo de trabajo automatizado en Python que, a partir de la delimitación geográfica de una o varias manzanas de estudio, genera de forma directa un archivo .inp válido para EPANET, sustituyendo la parte mecánica y repetitiva del flujo manual en QGIS —digitalización, llenado de atributos y exportación mediante complemento— sin eliminar la revisión humana en la etapa donde resulta indispensable: la verificación visual de los nodos de entrega generados.

El pipeline demostró ser escalable de una sola manzana a un sector urbano completo, integrando automáticamente las conexiones entre manzanas vecinas y consolidando el modelo en un único archivo de red, y quedó documentado un error concreto de escalamiento (pérdida silenciosa de tuberías por duplicidad de identificadores) junto con su corrección, como ejemplo aplicado de validación de resultados frente a lo esperado.

Como herramienta educativa, el flujo automatizado no busca sustituir la comprensión del procedimiento manual en QGIS —que se conserva como referencia conceptual y se sigue enseñando—, sino liberar tiempo de clase para el análisis hidráulico de los modelos generados. También, con esta herramienta se pretende incentivar a los estudiantes para que, cuando se les solicite la elaboración de un proyecto educativo de ingeniería hidráulica, logren un mayor éxito en su desarrollo. Queda pendiente, como trabajo futuro, resolver el trazado de tuberías para manzanas con topología de calles ramificada y desarrollar la etapa de simulación hidráulica propiamente dicha dentro de EPANET.

Literatura Citada

Libros

Sotelo Ávila, G. (2005). *Hidráulica general I: Fundamentos.* México: Limusa. 564 p. ISBN 968-18-0503-8.

Referencias electrónicas y software

Dawson, N., Fischer, J., Kuhn, M., Pasotti, A., Rouzaud, D., mhugent, Bruy, A., Sutton, T., Dobias, M., Pellerin, M., Rouault, E., Olaya, V., Blottiere, P., Macho, W., Blazek, R., Bartoletti, L., Sherman, G., Cabieces, J., Sant-anna, H., … Jurgiel, B. (2026). *qgis/QGIS: 3.44.11* (Versions final-3_44_11) [Computer software]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.20444851 [Fecha de acceso: 30 de julio de 2026].

Eisoldt, P. (2021). *simplekml* (Versión 1.3.6) [Biblioteca de Python]. https://simplekml.readthedocs.io [Fecha de acceso: 30 de julio de 2026].

Gillies, S., van der Wel, C., Van den Bossche, J., Taves, M. W., Arnott, J., Ward, B. C., … others. (2025). *Shapely* (Versión 2.1.2) [Computer software]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.17193310 [Fecha de acceso: 30 de julio de 2026].

Google. (2026a). *Google Earth Pro* (Versión 7.3.7.1155 (64-bit)) [Software]. https://www.google.com/earth/versions/#earth-pro [Fecha de acceso: 30 de julio de 2026].

Google. (2026b). *Google Maps* [Mapa]. https://www.google.com/maps [Fecha de acceso: 30 de julio de 2026].

Klise, K., Hart, D., Bynum, M., Hogge, J., Haxton, T., Murray, R., & Burkhardt, J. (2023). Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual, Version 1.0. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/B-23/098, Washington, D.C. Disponible en: https://github.com/USEPA/WNTR [Fecha de acceso: 29 de julio de 2026].

Kyriakou, M. S. (2022). *ImportEpanetInpFiles* (Versión 1.6.6) [Complemento de QGIS]. KIOS Research and Innovation Center of Excellence. https://github.com/KIOS-Research/ImportEpanetInpFiles [Fecha de acceso: 30 de julio de 2026].

Overture Maps Foundation. (2026). *overturemaps* (Versión 1.0.1) [Biblioteca de Python]. https://github.com/OvertureMaps/overturemaps-py [Fecha de acceso: 30 de julio de 2026].

Overture Maps Foundation. (s.f.). Overture Maps [conjunto de datos geoespaciales abiertos]. Disponible en: https://overturemaps.org [Fecha de acceso: 29 de julio de 2026].

Python Software Foundation. (2026). *Python* (Versión 3.11.15) [Lenguaje de programación]. https://www.python.org [Fecha de acceso: 30 de julio de 2026].

Rossman, L., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R., & Haxton, T. (2020). EPANET 2.2 User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-20/133, Washington, D.C. Disponible en: https://www.epa.gov/water-research/epanet [Fecha de acceso: 29 de julio de 2026].

Van den Bossche, J., Jordahl, K., Fleischmann, M., Richards, M., McBride, J., Wasserman, J., Garcia Badaracco, A., Snow, A. D., Roggemans, P., Ward, B., Tratner, J., Gerard, J., Taves, M., Perry, M., carsonfarmer, Hjelle, G. A., Tan, N. Y. S., Bell, R., rraymondgh, Cochran, M. D., Caria, G., ter Hoeven, E., Chai, C. P., Culbertson, L., Bartos, M., Eubank, N., sangarshanan, Flavin, J., & Rey, S. (2026). *geopandas/geopandas: Version 1.1.4* [Computer software].

Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.20938197 [Fecha de acceso: 30 de julio de 2026].

Desarrollo e implementación de dispositivos de energía solar térmica para aplicaciones agrícolas

Jonás Torres Montealbán[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la agricultura sostenible

Resumen

El presente trabajo analiza la implementación de tecnologías de energía solar térmica en contextos rurales como una estrategia para reconfigurar las relaciones entre los sistemas humanos y naturales. Desarrollado en la Casa Solar Campesina de la Universidad Autónoma Chapingo (UACh), el proyecto propone el diseño, construcción y uso de dispositivos como cocinas y deshidratadores solares, orientados a procesos agrícolas sustentables. Desde una perspectiva socioambiental, la iniciativa parte del reconocimiento de que los modelos energéticos convencionales han generado una desvinculación entre las prácticas productivas y los ciclos naturales, promoviendo dependencia de combustibles fósiles. En contraste, el aprovechamiento de la radiación solar permite restablecer una relación más equilibrada, al integrar el uso de recursos naturales renovables con prácticas productivas locales. La metodología se basa en un enfoque de investigación–acción participativa, donde productores, estudiantes y docentes colaboran en la construcción y apropiación de estas tecnologías. Este proceso fomenta no solo la transferencia técnica, sino también la generación de conocimiento colectivo y el fortalecimiento del vínculo entre comunidad y entorno. Los resultados obtenidos muestran una reducción de costos energéticos, la disminución del impacto ambiental y la mejora en la conservación de productos agrícolas, con base en resultados medidos como: 1) pérdida de masa de agua en frutas utilizando los deshidratadores solares manufacturados y 2) Temperaturas cercanas al punto de ebullición del agua necesaria para la cocción de alimentos en las cocinas solares manufacturadas. Finalmente, el proyecto contribuye a la construcción de alternativas de desarrollo rural que articulan sostenibilidad, autonomía energética, con base en los resultados de la eficiencia energética de los dispositivos propuestos: 10.2 % de cocinas solares y 19.6 % para los deshidratadores.

Palabras clave: Ciencia aplicada, energía solar y sostenibilidad.

Abstract

This work analyzes the implementation of solar energy technologies in a rural context as a strategy for reconfiguring the relationship between human and natural systems. Developed at the Casa Solar Campesina of the Universidad Autónoma Chapingo (UACh), the project focuses on the design, construction, and use of technologies such as solar cookers and solar dehydration systems, aimed at supporting sustainable agricultural activities. This socio-environmental perspective serves as a starting point for recognizing that conventional energy models have generated negative impacts on productive practices and natural cycles due to their dependence on fossil fuels. In contrast, the use of solar radiation contributes to restoring a more balanced relationship between society and the environment by integrating natural and renewable energy sources into local productive activities.

[1]Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México Texcoco Km. 38.5 CP 56230, e-mail: jtorresm@chapingo.mx

The methodology is based on a participatory research and community engagement approach, in which technology developers, students, and teachers collaborate in the design, implementation, and appropriation of these technologies. This process involves not only technology transfer but also the generation of collective knowledge and the strengthening of the relationship between the community and its environment. The results include reductions in energy costs and environmental impacts, as well as improved preservation of agricultural products. These outcomes are evaluated through parameters such as: 1) water and energy consumption associated with the use of solar dehydration systems, and 2) the temperatures required to boil water and cook food using solar cookers. Finally, the project contributes to the development of sustainable and energy-independent alternatives for rural communities, supported by the energy-efficiency results of the systems: 10.2% for solar energy systems and 19.6% for dehydration systems.

Keywords: Applied science, solar energy and sustainability.

INTRODUCCIÓN

La energía solar térmica constituye una alternativa tecnológica sustentable para satisfacer los requerimientos de calor en el sector agrícola y agroindustrial. Su implementación permite aprovechar la abundante radiación solar disponible en México para aplicaciones como el secado de productos agrícolas, calentamiento de agua para procesos productivos, calefacción de invernaderos y apoyo a la elaboración de alimentos y bebidas. El uso de esta tecnología contribuye a disminuir la dependencia de combustibles fósiles, reducir costos operativos, mitigar emisiones contaminantes y promover sistemas productivos más sostenibles. Debido a que gran parte de los procesos agrícolas, como en la **figura-01**, demandan calor de baja y media temperatura, la energía solar térmica presenta un elevado potencial de adopción en unidades de producción rurales y pequeñas agroindustrias (Agudelo, 2002).

(A) **(B)** **(C)**



Figura 1. Ejemplos de la aplicación de la energía solar térmica**:** Deshidratación, cocción y procesos de fermentación, ***Fuente:*** *elaboración propia*.

Importancia de la energía solar térmica en el sector agrícola

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la radiación solar para generar calor útil mediante concentradores y deshidratadores solares. En el sector agrícola, donde una parte

importante de la energía consumida se destina a procesos térmicos de baja y media temperatura (30 a 120 °C), esta tecnología representa una alternativa viable para sustituir combustibles fósiles como gas LP, diésel o leña, **figura 02**.



Figura-02. Estudiantes de Preparatoria Agrícola, explicando la fabricación: (A) cocinas solares y (B) deshidratadores solares en la exposición en la Semana de Preparatoria Agrícola 2026, ***Fuente:*** *elaboración propia.*

Entre sus principales beneficios destacan:

- Reducción de los costos de operación en actividades agrícolas y agroindustriales.
- Disminución de las emisiones de CO_2 y otros contaminantes.
- Aprovechamiento de una fuente de energía renovable abundante, especialmente en regiones con alta irradiación solar como México.
- Mayor autonomía energética para comunidades rurales y pequeños productores.
- Incremento de la sostenibilidad y competitividad de las unidades de producción.
- Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible y mitigación del cambio climático

Situación y potencial en México

México posee uno de los mayores potenciales solares del mundo, con irradiaciones promedio de entre 4.5 y 6.5 kWh/m²·día en gran parte del territorio. Esta condición favorece la implementación de tecnologías solares térmicas en actividades agrícolas y agroindustriales, particularmente en estados con alta actividad agrícola como Morelos, Puebla, Jalisco, Guanajuato y Sonora. Las tecnologías concernientes al aprovechamiento de la energía solar térmica, permite mas que el simple calentamiento de agua aplicaciones en varios requerimientos agrícolas, el secado de frutas y hortalizas, la cocción de alimentos y la fermentación de bebidas, permiten darles un valor agregado a los productos agrícolas con tecnologías de bajos costo y bajo impacto ambiental, (**Ding,** 2021).

Objetivo

Desarrollar e implementar dispositivos de energía **solar térmica** para aplicaciones agrícolas sustentables en la Casa Solar Campesina de la UACh, mediante un modelo de innovación social que incluya la capacitación y apropiación tecnológica por parte de productores rurales, contribuyendo al fortalecimiento de la soberanía alimentaria y al desarrollo rural sostenible.

Metodología

El proyecto se desarrolló bajo un enfoque de **investigación–acción participativa**, integrando el desarrollo tecnológico experimental, la validación técnica mediante la adquisición sistemática de datos, la transferencia de tecnología a partir de prototipos previamente diseñados, la evaluación de impacto económico y el seguimiento del uso de los dispositivos solares por parte de los participantes, como se muestra n las figuras 03 y 04. Este enfoque permite no solo generar soluciones técnicas, sino también evaluar su pertinencia, funcionalidad e impacto en contextos productivos reales, (Freire, 2024).



Figura 3. Cocinas solares en la Casa Solar de la UACh ***Fuente:*** *elaboración propia.*



Figura 4. Participantes en los talleres de construcción de una cocina solar con antenas parabólicas en desuso. ***Fuente:*** *elaboración propia.*

Este trabajo analiza la implementación de tecnologías de energía solar térmica en contextos rurales como una estrategia para reconfigurar la relación entre los sistemas humanos y naturales. Desarrollado en la Casa Solar Campesina de la Universidad Autónoma Chapingo (UACh), propone el diseño y uso de dispositivos solares y deshidratadores solares para impulsar procesos agrícolas sustentables, como se muestra en las figuras 04 y 05. En estos contextos, la persistente dependencia de energías convencionales, principalmente fósiles, genera altos costos, impactos ambientales y una desconexión con los ciclos naturales, (Rincón, 2008).

Desde una perspectiva socio ambiental, el presente trabajo desarrolla e implementa alternativas energéticas sustentables, accesibles y apropiadas al contexto rural, que reduzcan la dependencia de combustibles fósiles y fortalezcan la relación entre producción agrícola y recursos naturales, reutilizando materiales como antenas parabólicas en desuso y materiales accesibles. Se parte del reconocimiento de que los modelos energéticos convencionales han generado una desvinculación entre las prácticas productivas y los ciclos naturales, promoviendo dependencia de combustibles fósiles y presiones sobre los ecosistemas.

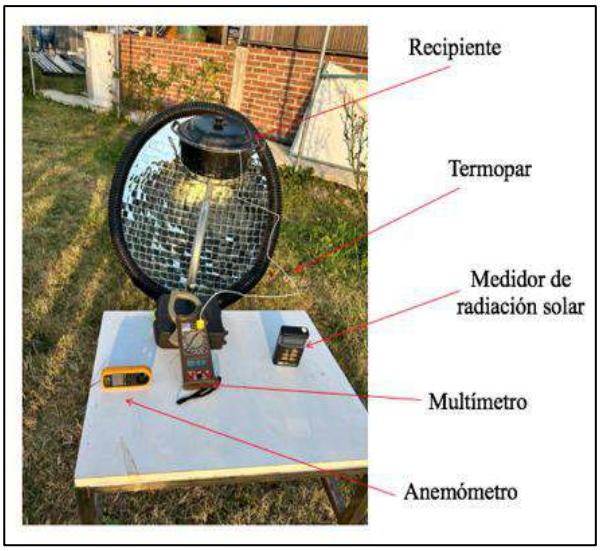


Figura 5. Medición de variables física en la cocina solar para cálculo eficiencia.
Fuente: *elaboración propia.*

En contraste, el aprovechamiento de la radiación solar permite restablecer una relación más equilibrada, al integrar el uso de recursos naturales renovables con prácticas productivas locales mediante la identificación de variables físicas (Figura 5). Este trabajo contribuye de manera directa, medible y verificable, (Monk, 2012).



Figura-06. Construcción de deshidratadores solares comunidades aledañas a la UACh.
Fuente: *elaboración propia.*



Figura-07. Construcción de deshidratadores solares comunidad universitaria de la UACh.
Fuente: *elaboración propia.*

1) Solución tecnológica concreta:

a) Implementación de cocinas y deshidratadores solares,
b) Uso de una fuente renovable: radiación solar,
c) Tecnologías de bajo costo y fácilmente replicable.

2) Enfoque metodológico participativo:

a) Uso de investigación–acción participativa
b) Involucra productores, estudiantes y docentes
c) Promueve apropiación tecnológica y conocimiento colectivo

3) Evidencia verificable:

a) Deshidratadores solares: Medición de la pérdida de masa de agua en frutas y evidencia del proceso de conservación de alimentos, figura**-06 y 07**.
b) Cocinas solares: registro de temperaturas cercanas al punto de ebullición del agua (~100 °C), verificación de su funcionalidad para cocción real con base en el calentamiento de agua.
c) Impactos adicionales: reducción de costos energéticos (comparación con gas/leña) disminución del impacto ambiental (uso de energía limpia).

La metodología se basa en un enfoque de investigación–acción participativa, donde productores, estudiantes y docentes colaboran en la construcción y apropiación de estas tecnologías. Este proceso fomenta no solo la transferencia técnica, sino también la generación de conocimiento colectivo y el fortalecimiento del vínculo entre comunidad y entorno, (Hernández *et al,* 2014).

Los resultados obtenidos muestran una reducción de costos energéticos, la disminución del impacto ambiental y la mejora en la conservación de productos agrícolas, con base en resultados medidos como:

1. Pérdida de masa de agua en frutas utilizando los deshidratadores solares manufacturados.
2. Las temperaturas cercanas al punto de ebullición del agua necesaria para la cocción de alimentos en las cocinas solares manufacturadas.

En la **primera etapa (diagnóstico y diseño tecnológico)** se identificaron las necesidades energéticas en procesos agrícolas locales y se definieron las aplicaciones prioritarias de la energía solar térmica, particularmente la cocción de alimentos y el deshidratado de productos agrícolas. Con base en este diagnóstico, se elaboró el diseño técnico preliminar de los dispositivos, incluyendo memorias de cálculo energético, planos constructivos, diagramas funcionales, especificaciones técnicas y manuales de operación, que sirvieron como base para su construcción y posterior transferencia a pequeños productores, como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Manufactura de deshidratadores solares para campesinas de Xochimilco.
Fuente: *elaboración propia.*

La **segunda etapa (construcción y validación experimental)** consistió en la fabricación de cocinas, **figuras-9 y 10**; y deshidratadores solares, instrumentados con sensores de temperatura, radiación solar, humedad y velocidad del viento, conectados a microcontroladores reprogramables tipo Arduino para el monitoreo y registro de datos (ASAE, 2023). Se realizó un seguimiento sistemático de variables físicas como radiación solar incidente, temperatura interna de operación, tiempo de procesamiento y eficiencia energética del sistema. El análisis de rendimiento permitió estimar indicadores técnicos como la eficiencia térmica (%), el ahorro energético (expresado en kWh o kilogramos equivalentes de gas LP) y la reducción en el consumo de combustibles convencionales (Reyes, 2015).



Figura 9. Proceso de manufactura de cocinas solares.
Fuente: *elaboración propia.*



Figura 10. Diferentes tamaños de las cocinas solares de acuerdo con la antena en desuso que se recuperó. ***Fuente:*** *elaboración propia.*

En la **tercera etapa (transferencia tecnológica y capacitación)** se llevaron a cabo talleres teórico-prácticos en la Casa Solar Campesina, en los que los participantes construyeron los dispositivos, adquirieron conocimientos sobre su uso y mantenimiento, y recibieron orientación para su replicabilidad en sus comunidades y en espacios académicos de la UACh. Asimismo, se elaboraron manuales técnicos ilustrados para facilitar la apropiación tecnológica, **figuras 11a y 11b**. Los indicadores sociales considerados incluyeron el número de productores capacitados, la cantidad de dispositivos replicados y el nivel de apropiación tecnológica, evaluado mediante encuestas y seguimiento posterior.



Figura-11a. Recuperación de una antena parabólica en desuso. ***Fuente:*** *elaboración propia.*



Figura-11b. Recubrimiento y pintura de la antena parabólica. ***Fuente:*** *elaboración propia.*





Figura 12. Manufactura de deshidratadores solares para comunidad universitaria UACh. ***Fuente:*** *elaboración propia.*

Finalmente, en la **cuarta etapa (evaluación integral del impacto)** se analizaron la reducción de costos energéticos, la mejora en los procesos productivos y la contribución a la autosuficiencia alimentaria. Para ello, se emplearon encuestas estructuradas, análisis comparativos antes–después y estudios costo–beneficio que permitieron cuantificar los efectos económicos y productivos derivados de la implementación de los dispositivos solares.

El proyecto se desarrolló en un periodo de doce meses, integrando de manera progresiva las etapas de diagnóstico, diseño, validación, transferencia y evaluación, con el propósito de garantizar la coherencia entre el desarrollo tecnológico, su apropiación social y su impacto en el fortalecimiento de la sostenibilidad agrícola (Martínez, 1996).

Resultados y Conclusiones

Como resultado del proceso de desarrollo y transferencia tecnológica en energías solares térmicas, el proyecto generó los siguientes resultados,

Cálculo de la eficiencia de la cocina solar

Para evaluar el desempeño térmico de las cocinas solares construidas con antenas parabólicas en desuso, se determinó la potencia de cocción estándar como parámetro comparativo más representativos El rendimiento térmico de la cocina solar se determinó mediante tomando como base el calentamiento de 2 kg de agua, considerando las condiciones ambientales del sitio: radiación solar promedio, temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento (coordenadas de **Latitud:19.4886 y Longitud:-98.8880**).

La eficiencia térmica para una la cocina solar se calculó con la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{mC_p(T_f - T_i)}{A_a lt} \quad (1)$$

η =rendimiento térmico de la cocina solar (%)
m =masa de agua calentada (kg)
C_p = calor específico del agua, (4 186 $\frac{J}{kg℃}$)
$T_f = temperatura\ final\ del\ agua$ (℃)
$T_i = temperatura\ inicial\ del\ agu$ (℃)
$A_a = área\ de\ apertura\ del\ paraboloide\ (m^2)$
$I = radiación\ solar\ promedio\ durante\ la\ prueba, irradiancia\ (W/m^2)$
$t = tiempo\ de\ exposición\ solar\ (s)$

Para el paraboloide:

$$A_a = \pi r^2 \quad (2)$$

Ensayo-01. Cocina solar (parabólica): Se considerado una base de calculo de 2 litros de agua, para pruebas preliminares y el área de captación (área de apertura) fue de **1.54 m²** y la radiación solar promedio registrada fue de **750 W/m²**.

La temperatura inicial del agua fue de **25 °C** y la temperatura final alcanzada fue de **80 °C**. La eficiencia térmica para la **cocina solar parabólica** se calculó considerando al área de apertura, como lo muestra la **Ec-03**.

- **Diámetro de apertura:** 1.40 m
- **Radio:** 0.70 m
- **Radiación solar promedio:** 800 W/m²
- **Tiempo de prueba:** 1 hora = 3 600 s
- **Masa de agua:** 2 kg
- **Temperatura inicial:** 25 °C
- **Temperatura final:** 95 °C

Primero calculamos el área de apertura con la ecuación **Ec.-02**.

$$\boldsymbol{A_a = \pi(0.70)^2 = 1.54 m^2}$$

$$\eta = \frac{mC_p(T_f - T_i)}{A_a It} \quad (3)$$

η =rendimiento térmico de la cocina solar (%)

m =masa de agua o alimento calentados (kg)

C_p = calor específico del agua, $(4\,186\,\frac{J}{kg℃})$
$T_f = temperatura\ final\ del\ agua$ (℃)
$T_i = temperatura\ inicial\ del\ agu$ (℃)
A_a =área de apertura del paraboloide (m^2)
$I = radiación\ solar\ promedio\ durante\ la\ prueba, irradiancia\ (W/m^2)$
$t = tiempo\ de\ exposición\ solar\ (s)$

$$\eta = \frac{2(4186)(80-25)}{(1.54)(750)(7200)} \times 100$$

$$\eta = \frac{400460}{8316000} \times 100 \approx 5\%$$





Figura 13. Cálculo de la eficiencia de la cocina solar.

Por lo tanto, el rendimiento térmico aproximado de la cocina solar paraboloide fue de **5 %**, sin embargo, considerando una evaporación de agua de aproximadamente 200 g, **figura 14**, la eficiencia se eleva como se muestra a continuación**:**

Base del nuevo cálculo:
$Se\ evaporan: m_{evap} = 0.2\ kg$
$Calor\ latente: L_v = 2.26 \times 10^6\ J/kg$

Energía por evaporación

$$Q_{latente} = 0.2 \times 2.26 \times 10^6 = 452000\ J$$

Energía total útil

$$Q_{total} = 0.2 \times 2.26 \times 10^6 = 400460\ J + 452000\ J = 852460J$$

Nueva eficiencia

$$\eta = \frac{852460J}{8316000} \times 100 \approx 10.2\%$$

Las cocinas parabólicas entregan mucha potencia en el foco, pero tienen pérdidas ópticas y pérdidas por convección. Cuando hay evaporación: aparece un consumo energético fuerte → sube la eficiencia calculada.

Cálculo de la eficiencia del deshidratado solar

La eficiencia térmica para un deshidratador solar se calculó con la siguiente expresión (solo calor latente):

$$\eta = \frac{m_{agua}(L_v)}{AIt} \qquad (4)$$

η =rendimiento térmico del deshidratador (%)

m_{masa} =masa de agua evaporada (kg)

L_V = calor latende de vaporización ($L_v = 2.26 \times 10^6\ J/kg$)

$A = área\ de\ captación\ de\ la\ cocina\ (m^2)$

$I = radiación\ solar\ promedio\ durante\ la\ prueba, irradiancia\ (W/m^2)$

$t = tiempo\ de\ exposición\ solar\ (s)$

$$\eta = \frac{Q\ latente}{Q\ solar} \qquad (5)$$



Figura 15. Cálculo de la eficiencia del deshidratador solar.

Ensayo-02. Secador (solo evaporación): Se tiene un deshidratador solar (secador) de una superficie de captación A= 1.0 m^2, la radiación solar promedio fue I=**800 W/m** y un tiempo de exposición de t= 2.0 h=7200s.

Sustituyendo:

- *Masa de agua evaporada*: $m_{masa} = 0.5kg$
- *Calor latente del agua*: $L_v = 2.26 \times 10^6\ J/kg$

- *Área del colector* $A = 1.0m^2$
- *Irradiancia promedio* $I = 800\ W/m^2$
- $Tiempo$: $t = 7200\ s$

Energía útil (evaporación):

$Q_{útil} = m_{agua}\, L_v = 0.5 \times 2.26 \times 10^6 = 1.13 \times 10^6$Joules

Energía útil (evaporación):

$$Q_{solar} = AIt = 1.0 \times 800 \times 7200 = 5.76 \times 10^6 Joules$$

Eficiencia:

$$\eta = \frac{1.13 \times 10^6 \text{Joules}}{5.76 \times 10^6 Joules} = 0.196 \approx 19.6\%$$

Por lo tanto, el sistema convierte ~20% de la energía solar en eliminación de humedad.

Cuadro 1. Resolución anual y mensual de las variables meteorológicas de interés para el deshidratado solar y la cocción solar. a) Radiación, b) Humedad, c) Temperatura y d) Velocidad de viento. **Fuente:** (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/).

PARÁMETR	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Radiación	2019	5.1511	5.9556	6.5681	6.725	6.6506	5.6578	5.8622	6.3401	5.4722	4.7998	4.685	4.8922	5.7293
Radiación	2020	4.8302	5.7737	6.6749	6.557	6.5251	6.3562	5.9683	5.5548	4.6068	6.0478	5.3162	4.7196	5.7444
Radiación	2021	4.7496	6.2316	6.8352	6.6178	6.3665	4.8665	5.7497	5.4358	4.9524	5.1588	5.2015	5.1264	5.6047
Radiación	2022	4.8643	5.7485	6.8758	6.5098	6.8225	5.867	5.8306	5.5522	4.974	4.9438	4.9022	4.698	5.6321
Radiación	2023	5.3215	6.1253	6.4258	6.4634	5.8973	6.8981	5.7228	5.4427	6.3684	4.9073	4.794	4.0428	5.6926
Radiación	2024	4.7393	6.0461	6.9682	6.906	6.7171	5.7823	5.359	5.6081	4.4774	4.7513	5.2344	4.8559	5.6184
Humedad	2019	6.09	6.01	6.19	5.31	7.03	10.15	10.27	10.48	10.4	10.7	9.14	6.43	8.19
Humedad	2020	6.15	6.24	6.24	7.76	7.73	9.68	10.21	10.8	10.8	8.14	6.56	6.88	8.1
Humedad	2021	6.64	5.06	5.93	6.33	8.79	10.47	10.38	10.81	11.09	10.03	7.14	5.99	8.24
Humedad	2022	6.34	5.94	5.37	7.02	6.92	8.94	9.8	10.2	10.4	9.83	8.24	6.2	7.94
Humedad	2023	5.39	5.06	6.18	7.22	8.91	8.27	9.99	10.57	9.73	10.32	8.41	7.34	8.14
Humedad	2024	6.01	5.03	5.1	6.57	7.29	9.21	11.16	11.4	12.26	9.4	8.19	6.68	8.2
Temperatura	2019	15.64	17.13	18.22	18.72	17.67	13.03	11.35	12.05	11.73	10.94	12.92	15.3	14.54
Temperatura	2020	15.05	17.11	19.04	17.07	16.43	13.7	12.26	10.83	9.89	15.19	16.04	14.61	14.76
Temperatura	2021	14.76	18.66	18.88	17.76	14.77	10.31	11.57	10.9	9.96	11.98	14.25	15.8	14.11
Temperatura	2022	15.25	16.63	18.71	17.48	17.74	14.39	13.69	12.38	11.61	12.99	14.49	15.02	15.02
Temperatura	2023	16.61	18.75	17.92	16.67	14.14	16.26	13.15	12.62	14.26	12.63	14.46	12.73	14.98
Temperatura	2024	14.64	18	18.7	18.17	18.01	14.13	11.18	11.18	9.09	12.38	14.3	14.05	14.47
Vel. Viento	2019	1.35	1.46	1.48	1.65	1.62	1.55	1.09	1.18	1.28	1.38	1.16	1.16	1.36
Vel. Viento	2020	1.53	1.47	1.36	1.61	1.52	1.79	1.3	1.39	1.36	1.52	1.82	1.32	1.5
Vel. Viento	2021	1.44	1.74	1.38	1.59	1.57	1.55	1.32	1.49	1.28	1.39	1.25	1.07	1.42
Vel. Viento	2022	1.48	1.3	1.54	1.45	1.63	1.76	1.29	1.16	1.72	1.28	1.05	1.23	1.41
Vel. Viento	2023	1.32	1.46	1.27	1.55	1.24	1.78	1.49	1.48	1.38	1.6	1.35	1.2	1.43
Vel. Viento	2024	1.61	1.62	1.73	1.7	1.48	1.8	1.28	1.3	1.28	1.62	1.21	1.23	1.49

Los datos meteorológicos utilizados para el cálculo de la eficiencia solar tanto para la cocina y el deshidratador solar, fueron obtenidos de la plataforma NASA, específicamente del sistema NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources), el cual proporciona información climatológica y de radiación solar basada en datos satélite. La **Tabla-01**, muestra los datos para diferentes años.

Los datos meteorológicos del lugar de emplazamiento fueron los de la Casa Solar Campesina, (Latitud 19.4886, Longitud -98.8884). Dichos datos están referidos a cocinas y deshidratadores solares (radiación solar, temperatura promedio, velocidad de viento y humedad)

En la zona de Texcoco–Chapingo, irradiación típica:

$$H \approx 5.6 - 6.0(\frac{kWh}{m^2})/dí$$

El Promedio durante horas solares en Chapingo es: Pico al mediodía ≈ **800–860 W/m²**; esto confirma que: 7500–1000 W/m² es un rango realista para los cálculos de eficiencia térmica.

Finalmente, con el Cuadro 2, referida al consumo de energía en 2022 y 2023, el uso de leña como energía primaria en algunas comunidades en México (González, 2017). El uso de cocinas y deshidratadores solares, aun cuando operan con eficiencias térmicas moderadas, representa una alternativa energética altamente relevante en contextos rurales y periurbanos. Al aprovechar directamente la radiación solar, estos sistemas permiten sustituir el consumo de leña u otros combustibles fósiles tradicionalmente empleados para cocción y conservación de alimentos. Esta sustitución conlleva una reducción significativa en la emisión de gases de efecto invernadero, particularmente dióxido de carbono (CO_2), así como de contaminantes locales asociados a la quema de biomasa. En consecuencia, la implementación de estas tecnologías no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también promueve beneficios ambientales y sociales, como la disminución de la presión sobre los recursos forestales y la mejora en la calidad del aire en comunidades que dependen de métodos tradicionales de cocción y secado.

Cuadro 2. En México, se estima que el 30% de la población utilizan leña para cocinar sus alimentos y calentar sus hogares. La mayor parte de esta población se localiza en las áreas rurales. Con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) del año 2010. Para evaluar cocinas solares desde el punto de vista térmico, la potencia de cocción estándar es la que se calculó con base en datos medidos *in situ* y la ayuda de la estación meteorológicas de la NASA (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/).

	2022	2023	Estructura porcentual (%) 2023	Variación porcentual (%) 2023/2022
Total	**7,468.99**	**7,365.30**	**100.00**	**-1.39**
Carbón	137.59	129.37	1.76	-5.98
Hidrocarburos	6,028.50	6,045.84	82.09	0.29
Petróleo crudo	3,807.56	3,878.16	52.65	1.85
Condensados	563.00	570.37	7.74	1.31
Gas natural	1,657.94	1,597.31	21.69	-3.66
Nucleoenergía	152.77	175.70	2.39	15.01
Renovables	1,150.13	1,014.39	13.77	-11.71
Hidroenergía	315.29	190.49	2.59	-39.58
Geoenergía	98.16	93.51	1.27	-4.74
Solar[34]	196.66	205.50	2.79	4.50
Energía eólica	180.54	182.05	2.47	0.83
Biogás	2.40	2.15	0.03	-1.60
Biomasa	357.08	340.69	4.63	-4.32
Bagazo de caña	112.61	97.38	1.32	-12.74
Leña	244.47	243.31	3.30	-0.47

Una estimación proyectada de reducción de consumo de gas LP o leña. Cálculo preliminar de disminución potencial de emisiones de CO_2. Nos muestra la contribución a la soberanía

alimentaria y sostenibilidad productiva. La **Cuadro 3** es una tabla comparativa del uso de gas LP y leña, y cuánto CO^2 se podría dejar emitir a la atmósfera.

Cuadro 3. En México, se estima que el 30% de la población utilizan leña para cocinar sus alimentos y calentar sus hogares.

Combustible	kg material convencional	Emisiones de CO_2	Consumo diario	Consumo anual CO_2/año
Cocina con Leña	1 kg	1.8kg	(Consumo diario 3 kg de leña) CO_2=3 x 1.8= 5.4 kg de CO_2/día	5.4 x 365=1971 kg de CO_2/año
Cocina con Gas LP	1 kg	2.98 kg	(1 cilindro de 20 kg por mes) CO_2= 20 x 2.98=59.6 kg de CO_2/mes	59.6 x 12 = 715 kg de CO_2/año
Cocina con energía Solar	No se usa	0 kg	0 kg	0 kg

La sustitución del uso de leña y gas LP por tecnologías solares térmicas, como cocinas y deshidratadores solares, permite evitar emisiones significativas de dióxido de carbono. Considerando factores de emisión promedio de 1.8 kg CO_2 por kg de leña y 2.98 kg CO_2 por kg de gas LP, una familia típica puede evitar del orden de 0.7 a 2 toneladas de CO_2 al año, dependiendo del combustible sustituido. Estos valores evidencian el impacto ambiental positivo de estas tecnologías, incluso operando con eficiencias térmicas moderadas, (Veritas, 2020).

Cuadro 4. Comparación de energía útil y emisiones de CO_2 para diferentes tecnologías de cocción.

Sistema	**Energía consumida**	**Eficiencia térmica (%)**	**Energía útil (kWh/día)**	**Factor de emisión (kg CO_2/kWh útil)**	**Emisiones (kg CO_2/día)**	**Emisiones (kg CO_2/año**
Leña	15 kWh/día	15 %	2.25	0.80	0.80	657
Gas LP	12 kWh/día	55 %	6.60	0.45	2.97	1084
Cocina solar	10 kWh/día (solar)	30 %	3.00	~0	~0	~0
Deshidratador solar	8 kWh/día (solar)	25 %	2.00	~0	~0	~0

Conclusiones

1. Los resultados obtenidos confirman que la problemática energética identificada en el diagnóstico, relacionada con la cocción de alimentos y su conservación, mediante el uso intensivo de leña y gas LP, está sólidamente fundamentada tanto en términos técnicos como socioeconómicos. A partir de esta línea base, el diseño e implementación de cocinas y deshidratadores solares respondieron de manera pertinente a las necesidades energéticas detectadas, considerando parámetros adecuados de operación como temperaturas objetivo, tiempos de proceso y capacidad de carga.
2. La validación experimental constituye el núcleo de este estudio, evidenciando el desempeño funcional de ambas tecnologías bajo condiciones reales de operación. Los deshidratadores solares alcanzaron una eficiencia térmica promedio de **19.6%**, mientras que las cocinas solares registraron **10.2%**, valores que se encuentran dentro del rango reportado en la literatura para sistemas solares térmicos de bajo costo. Estos resultados, junto con los perfiles de temperatura, tiempos de procesamiento y porcentajes de remoción de humedad observados, demuestran que los dispositivos son técnicamente viables para cumplir con las funciones de secado y cocción, respectivamente.
3. Desde el punto de vista energético y ambiental, las tablas 04 y 05 nos permiten comparar parcialmente el consumo de combustibles convencionales, lo que se traduce en una reducción significativa en el uso de leña y gas LP, así como en las emisiones asociadas de gases de efecto invernadero. Aun cuando las eficiencias térmicas son moderadas, la naturaleza renovable de la fuente energética utilizada garantiza un impacto positivo en términos de sostenibilidad.
4. Adicionalmente, los resultados de transferencia y apropiación tecnológica indican que los usuarios no solo comprenden el funcionamiento de los dispositivos, sino que muestran disposición para su uso continuo y replicación, lo cual refuerza la viabilidad social del proyecto. Este aspecto es fundamental, ya que la adopción real de la tecnología determina su impacto a largo plazo.
5. En conjunto, la integración de los resultados demuestra que las tecnologías solares implementadas no solo son técnicamente funcionales, sino también económicamente viables y socialmente apropiadas. Por tanto, las cocinas y deshidratadores solares representan una estrategia efectiva para la transición hacia sistemas energéticos más sustentables en contextos rurales, contribuyendo simultáneamente a la reducción de costos, la mitigación ambiental y el fortalecimiento de capacidades locales.
6. Finalmente, el proyecto contribuye a la construcción de alternativas de desarrollo rural que articulan sostenibilidad, autonomía energética y revalorización de los saberes locales. La investigación responde a la necesidad de reducir la dependencia de sistemas energéticos convencionales en contextos rurales, mediante la implementación de tecnologías solares térmicas accesibles y sustentables. Su contribución es verificable a través de indicadores físicos (temperatura alcanzada y pérdida de humedad en alimentos), así como de impactos económicos y ambientales observables, demostrando que estas tecnologías no solo son funcionales, sino que también fortalecen la autonomía energética y la integración de las prácticas productivas con los ciclos naturales.

Literatura citada

Agudelo-Flórez, S., & Pineda-Ríos, A. (2016). Aplicaciones de la energía solar en diferentes procesos agrícolas e industriales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (27), 83–89.

Alianza Agrovoltaica Latinoamericana (2025) Perspectivas de la Agrovoltaica en América Latina. ADECO - IDEA – AAL.

Ding, D. (2021). Integration of active solar thermal technologies in greenhouses: A mini review. *Frontiers in Energy Research, 9*, 757553.

American Society of Agricultural Engineers (2003). Testing and reporting solar cooker performance (ASAE S580). En Autor (ed.), Standards of the American Society of Agricultural Engineers (pp. 824-826). Recuperado de http://solarcooking.org/asae_test_std.pdf.

Freire, P. (2024). Pedagogía de los sueños posibles: por qué docentes y alumnos necesitan reinventarse en cada momento, Siglo XXI Editores.

García, L. E., Mejía, M. F., Mejía, D. J., y Valencia, C. A. (2012). Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. AVANCES Investigación en Ingeniería, 9(2), 9-19.

González Avilés, M., López Sosa, L. B., Servín Campuzano, H., y González Pérez, D. (2013). Desarrollo, implementación y apropiación de cocinas solares para el medio rural en Michoacán: Una alternativa energética para la conservación de recursos forestales maderables. Revista de Energías Renovables, 17, 12-15.

González Avilés, M., López Sosa, L. B., Servín Campuzano, H., y González Pérez, D. (2017). Adopción tecnológica sustentable de cocinas solares en comunidades indígenas y rurales de Michoacán. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 16(1), 271-280.

Hernández Venegas, C., González Avilés, M., y López Sosa, L. B. (2014). Desarrollo de un deshidratador solar indirecto por convección forzada, con colector solar de concentración usando la óptica anidólica. Publicaciones de la Semana

Martínez M. y L. Rodríguez, (1996), Evaluación de tecnologías que usan energías renovables.

Monk, S. (2012). 30 proyectos con Arduino. Editorial Estribor, S.L. Madrid.

Pilatowsky I. y Vázquez B. J., (1997), Diseño preliminar de un sistema solar termohidrónico aplicado al secado de productos agrícolas IER-UNAM.

Reyes, F y Cid, J., (2015). Arduino, Aplicaciones en robótica, mecatrónica e ingeniería. Alfaomega, México, D.F.

Pat, A y Maytorena V. (2025). Agrovoltaica y Pirolisis solar: Sinergias para la circularidad en el nexo Agua-Energía-Alimentos. Revista de Energías Renovables, Vol. 12, Núm. 56, ANES.

Rincón Mejía, E. A. (2008). Cocinas solares, a la vanguardia en México. Revista Solar, 27(65), 2-10.

Toledo, V. (2019). Los civilizionarios, Repensar la modernidad desde la ecología política. UNAM. Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Juan Pablo Editor.

Torres, J. (2015). Integración didáctica con exploración aplicada en la enseñanza de la energía solar. Tesis de doctorado, CICATA-IPN, México.

Veritas, B. C. (2010). Energía solar térmica, tercera edición, FC Editorial, Madrid, España, páginas, 511

Modelo de inteligencia artificial para predecir la productividad agrícola según variables climáticas y del suelo

Jorge Eliecer Martínez Gaitán[1], Marlio Bedoya Cardoso[1], Irlesa Indira Sánchez Medina[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Este artículo de modelación aplicada presenta un marco reproducible de inteligencia artificial para predecir la productividad agrícola mediante variables climáticas y edáficas: temperatura, humedad relativa, pH del suelo, precipitación y rendimiento observado. Se adoptó un diseño cuantitativo predictivo apoyado en simulación agronómica, aprendizaje automático supervisado y análisis del error. Se generó un conjunto sintético, pero agronómicamente coherente, de 1.800 registros para cuatro cultivos, diferentes texturas de suelo y escenarios de estrés climático. Se compararon Regresión Ridge, Random Forest, Gradient Boosting y una red neuronal perceptrón multicapa. Gradient Boosting obtuvo el mejor desempeño, con MAE = 0.9473 t/ha, RMSE = 1.9075 t/ha y R^2 = 0.9855 en el conjunto de prueba. Los resultados indican que los modelos no lineales capturan con mayor eficacia las interacciones entre temperatura, precipitación, pH e índices de estrés que una línea base lineal. La propuesta aporta una ruta metodológica transparente para desarrollar herramientas agrícolas de apoyo a la decisión, aunque su implementación operativa requiere validación con mediciones de campo, sensores y análisis locales de suelo.

Palabras clave: agricultura climáticamente inteligente, aprendizaje automático, predicción de rendimiento, precipitación, productividad agrícola.

Abstract

This applied modeling article presents a reproducible artificial intelligence framework to predict agricultural productivity using climatic and soil variables: temperature, relative humidity, soil pH, precipitation and observed yield. The study follows a quantitative predictive design supported by agronomic simulation, supervised machine learning and error analysis. A synthetic but agronomically coherent dataset of 1,800 records was generated for four crops under different soil textures and climatic stress scenarios. Four models were compared: Ridge regression, Random Forest, Gradient Boosting and a multilayer perceptron neural network. The best predictive performance was obtained by Gradient Boosting, with MAE = 0.9473 t/ha, RMSE = 1.9075 t/ha and R^2 = 0.9855 on the test set. The results suggest that nonlinear machine learning models capture interactions among temperature, rainfall, pH and stress indices more effectively than a linear baseline. The article contributes a transparent methodological route for developing predictive agricultural decision-support tools, while recognizing that operational deployment requires validation with field measurements, sensor data and local soil analysis.

[1]Universidad Surcolombiana. jorgeeliecer.martinez@usco.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1454-4087 marlio.bedoya@usco.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8866-9830 irlesa.sanchez@mail.udes.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8840-0708

Keywords: climate-smart agriculture, crop yield prediction, machine learning, precipitation, agricultural productivity.

Introducción

La productividad agrícola depende de la interacción entre clima, suelo, genética vegetal, manejoagronómico y oportunidad de las decisiones de campo. En regiones con alta variabilidad climática, el rendimiento deja de responder a una sola variable y se convierte en un fenómeno multicausal: una temperatura aparentemente favorable puede perder efecto si el suelo presenta pH fuera del rango de disponibilidad de nutrientes; del mismo modo, una precipitación suficiente puede ser poco útil si llega en momentos fenológicos inadecuados o se combina con estrés térmico.

La agricultura digital ha abierto la posibilidad de convertir registros climáticos, análisis de suelo, imágenes, sensores y datos históricos de rendimiento en sistemas de apoyo a la decisión. La FAO ha señalado que la inteligencia artificial y las tecnologías digitales pueden mejorar la eficiencia, sostenibilidad y resiliencia de los sistemas agroalimentarios, especialmente cuando se articulan con agricultura de precisión, manejo climático y monitoreo territorial (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2025). Esta orientación también se relaciona con el uso de inteligencia artificial para la agricultura documentado por la FAO y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (FAO & ITU, 2021), así como con los desafíos de adaptación climática señalados por el IPCC (2022).

En la práctica, muchos productores todavía toman decisiones basadas en experiencia local, observación visual y datos fragmentados. Aunque esa experiencia resulta valiosa, la incertidumbre climática exige herramientas predictivas que permitan estimar escenarios de productividad antes de la cosecha. En ese contexto, los modelos de aprendizaje automático ofrecen una alternativa para identificar patrones no lineales entre temperatura, humedad relativa, pH del suelo, precipitación y rendimiento.

El presente artículo desarrolla un modelo predictivo con IA para estimar la productividad agrícola según variables climáticas y de suelo. El estudio se plantea como un artículo de modelación aplicada, con un conjunto de datos simulado y reproducible, diseñado para representar relaciones agronómicas plausibles. No se presenta como ensayo de campo definitivo; se propone como una ruta metodológica verificable para construir, evaluar y explicar modelos predictivos que posteriormente puedan ser alimentados con registros reales de sensores, estaciones meteorológicas, análisis fisicoquímicos de suelo y datos históricos de producción.

El rendimiento agrícola responde a balances fisiológicos que integran temperatura, agua disponible, radiación, humedad atmosférica, fertilidad y sanidad del cultivo. La temperatura regula tasas de crecimiento, respiración, floración y llenado de frutos o granos. La humedad relativa interviene en transpiración, presión de vapor y riesgo fitosanitario. La precipitación afecta disponibilidad hídrica, lixiviación de nutrientes y estrés por déficit o exceso de agua. Por su parte, el pH del suelo condiciona la solubilidad de nutrientes y la actividad microbiológica.

La estimación de requerimientos de agua y productividad se apoya con frecuencia en modelos agroclimáticos. FAO-56 consolidó la relación entre clima y evapotranspiración de referencia mediante el enfoque ET0-Kc, mostrando que temperatura, humedad, radiación y viento son variables centrales para estimar demandas hídricas (Allen et al., 1998; Pereira et al., 2015). Aunque el presente trabajo no calcula rendimiento mediante evapotranspiración completa, retoma el principio de que las variables climáticas y de suelo deben analizarse de forma integrada.

La predicción de rendimiento con IA ha ganado relevancia porque permite procesar variables heterogéneas y relaciones no lineales que no siempre se capturan con regresiones simples. Revisiones recientes reportan aplicaciones de machine learning y deep learning para estimación de productividad, selección de cultivos, planeación de insumos y análisis de riesgos bajo variabilidad climática (Jabed et al., 2024; Shawon et al., 2025).

Los modelos de árboles y ensambles, como Random Forest y Gradient Boosting, son particularmente útiles en agricultura porque manejan interacciones, variables categóricas transformadas, datos ruidosos y relaciones no lineales. Random Forest combina múltiples árboles para mejorar estabilidad y generalización (Breiman, 2001), mientras que Gradient Boosting construye modelos aditivos secuenciales que corrigen errores residuales de iteraciones previas (Friedman, 2001). Las redes neuronales, por su parte, pueden aproximar funciones complejas cuando existe suficiente variabilidad en los datos y un proceso adecuado de validación. Estos fundamentos se articulan con los principios generales de aprendizaje estadístico descritos por Hastie et al. (2009).

En escenarios reales, los modelos predictivos pueden alimentarse con estaciones meteorológicas, sensores de humedad, análisis de suelo, registros de fertilización, imágenes multiespectrales y datos abiertos. NASA POWER, por ejemplo, proporciona datos solares y meteorológicos globales derivados de observaciones satelitales y modelos, útiles para agroclimatología y evaluación de escenarios productivos (NASA Langley Research Center, s. f.).

La validez de un modelo agrícola no depende únicamente de su precisión estadística. También exige trazabilidad de datos, interpretación agronómica, control de sesgos, validación espacial y temporal, y revisión con expertos de campo. Por esta razón, el presente trabajo combina métricas cuantitativas con lectura agronómica de variables y limitaciones.

Materiales y Métodos

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo de modelación predictiva aplicada. Se construyó un conjunto de datos sintético reproducible de 1.800 registros, compuesto por 60 parcelas y 30 ciclos de observación. Cada registro incluyó cultivo, textura de suelo, altitud, temperatura media, humedad relativa, pH del suelo, precipitación acumulada, índice de estrés y rendimiento en toneladas por hectárea. La simulación incorporó variabilidad ambiental, diferencias por cultivo y perturbaciones climáticas, con el propósito de probar el comportamiento de modelos de IA en un entorno controlado.

Variables del modelo predictivo

Cuadro 1. Variables principales utilizadas en el modelo predictivo.

Variable	Tipo	Unidad	Función dentro del modelo
temperatura_c	Climática	°C	Representa condición térmica del ciclo productivo.
humedad_relativa_pct	Climática	%	Aproxima ambiente de transpiración y estrés atmosférico.
ph_suelo	Edáfica	pH	Indica disponibilidad potencial de nutrientes.
precipitacion_mm	Climática-hídrica	mm/ciclo	Aproxima disponibilidad de agua por lluvia.
indice_estres	Derivada	0-1	Resume desviación respecto a condiciones óptimas simuladas.
rendimiento_t_ha	Objetivo	t/ha	Variable dependiente que se busca predecir.

Fuente: elaboración propia.

Construcción del conjunto de datos

El rendimiento fue generado mediante una función de respuesta agronómica que combina adecuación térmica, adecuación de humedad relativa, adecuación de pH, adecuación hídrica y efecto de textura del suelo. Esta estrategia permite crear datos reproducibles sin ocultar su naturaleza simulada. Las ecuaciones no reemplazan un ensayo agronómico real; sirven para construir un escenario experimental controlado sobre el cual evaluar algoritmos y generar una primera arquitectura predictiva.

$$S_T = \exp[-(T - T\_opt)^2 / (2\sigma\_T^2)] \quad (1)$$

$$S_H = \exp[-(H - H\_opt)^2 / (2\sigma\_H^2)] \quad (2)$$

$$S_pH = \exp[-(pH - pH\_opt)^2 / (2\sigma\_pH^2)] \quad (3)$$

$$S_P = \exp[-(P - P\_opt)^2 / (2\sigma\_P^2)] \quad (4)$$

$$Y = Y_{pot} \cdot [\alpha + \beta(S_T \cdot S_H \cdot S_pH \cdot S_P \cdot S_F)] + \varepsilon \quad (5)$$

Donde S_T, S_H, S_pH y S_P representan índices de adecuación para temperatura, humedad relativa, pH y precipitación; S_F corresponde al factor de textura del suelo; Y_{pot} es el rendimiento potencial por cultivo; α y β controlan la fracción basal y la fracción dependiente de condiciones; ε representa variabilidad no explicada.

Algoritmos implementados

Cuadro 2. Algoritmos de inteligencia artificial evaluados.

Algoritmo	Propósito	Justificación
Regresión Ridge	Modelo lineal regularizado	Establece una línea base interpretable y reduce sobreajuste.
Random Forest	Modelo de ensamble por árboles	Captura interacciones y no linealidades entre clima, suelo y cultivo.
Gradient Boosting	Ensamble secuencial	Corrige errores residuales y mejora precisión predictiva.
MLP Regressor	Red neuronal multicapa	Aproxima relaciones funcionales complejas entre variables.

Fuente: elaboración propia.

La partición de datos se realizó con 75 % para entrenamiento y 25 % para prueba, manteniendo distribución por cultivo. El preprocesamiento incluyó codificación one-hot para variables categóricas y estandarización de variables numéricas. La implementación se desarrolló en Python con scikit-learn, biblioteca ampliamente utilizada para aprendizaje supervisado y no supervisado (Pedregosa et al., 2011).

Métricas de evaluación

$$MAE = (1/n) \cdot \Sigma\, |y_i - \hat{y}_i| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{[(1/n) \cdot \Sigma\, (y_i - \hat{y}_i)^2]} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - SS\_res / SS\_tot \quad (8)$$

El MAE expresa el error absoluto promedio en toneladas por hectárea. El RMSE penaliza con

mayor fuerza errores grandes. El coeficiente R^2 estima la proporción de variabilidad del rendimiento explicada por el modelo. En predicción agrícola, estas métricas deben complementarse con interpretación agronómica, pues un error bajo puede ser insuficiente si el modelo no generaliza a otros suelos, ciclos o territorios.

Resultados

El dataset final quedó conformado por 1.800 registros. La distribución incluyó cuatro cultivos: maíz, fríjol, tomate y arroz, con variación por parcela, textura de suelo, precipitación, temperatura, humedad relativa y pH. Esta estructura permitió evaluar la capacidad de los algoritmos para aprender patrones entre ambiente, suelo y rendimiento.

Comportamiento descriptivo de los cultivos

Cuadro 3. Resumen descriptivo por cultivo.

Cultivo	n	Rendimiento medio (t/ha)	Temp. media (°C)	Precip. media (mm)	pH medio
Arroz	330	3.845	25.47	183.95	6.25
Frijol	510	1.709	25.76	184.73	6.32
Maiz	570	4.764	25.20	180.87	6.40
Tomate	390	41.589	25.34	178.25	6.39

Fuente: elaboración propia.

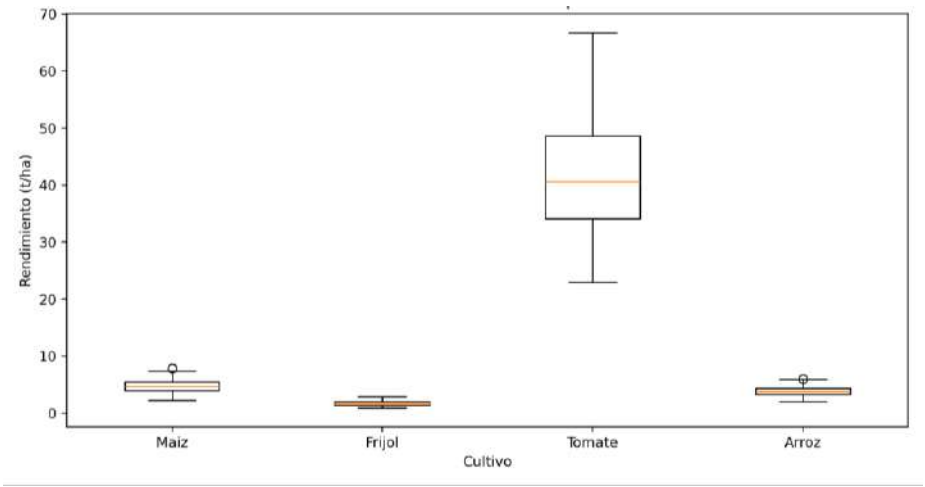


Figura 1. Distribución del rendimiento por cultivo.
Fuente: elaboración propia.

La Figura 1 evidencia diferencias de escala productiva entre cultivos, especialmente por el mayor rendimiento potencial del tomate frente a granos como fríjol, maíz y arroz. Esta diferencia justifica incluir el cultivo como variable categórica dentro del modelo, ya que la productividad no puede compararse únicamente desde variables climáticas generales.

Relaciones entre variables

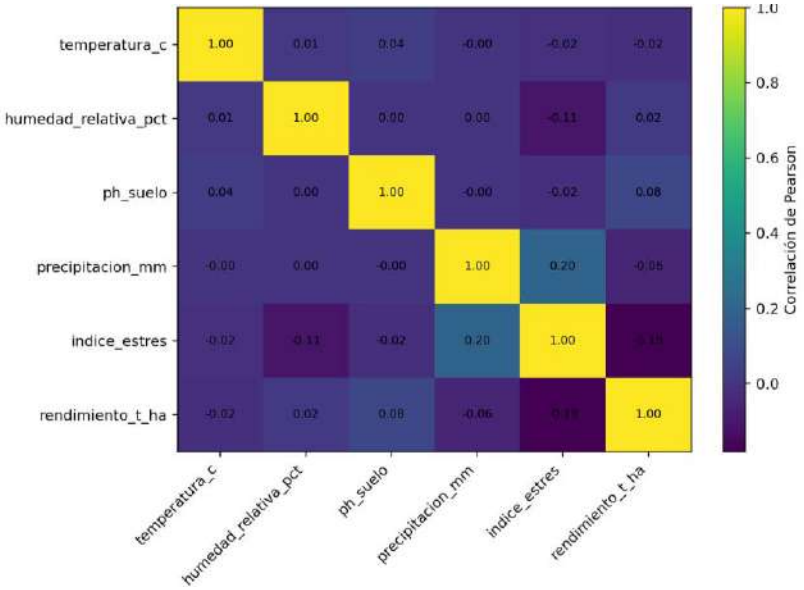


Figura 2. Mapa de calor de correlaciones entre variables climáticas, edáficas y rendimiento.
Fuente: elaboración propia.

El mapa de calor muestra relaciones moderadas y no estrictamente lineales entre las variables. Este comportamiento respalda el uso de modelos de ensamble y redes neuronales, dado que el rendimiento se explica por combinaciones entre temperatura, precipitación, humedad, pH e índice de estrés, más que por una correlación simple de una sola variable.

Desempeño comparativo de los modelos

Cuadro 4. Desempeño comparativo de los modelos predictivos.

Modelo	MAE (t/ha)	RMSE (t/ha)	R^2
Ridge	2.3670	3.6441	0.9470
Random Forest	0.9471	1.9966	0.9841
Gradient Boosting	0.9473	1.9075	0.9855
MLP	1.0926	1.9820	0.9843

Fuente: elaboración propia.

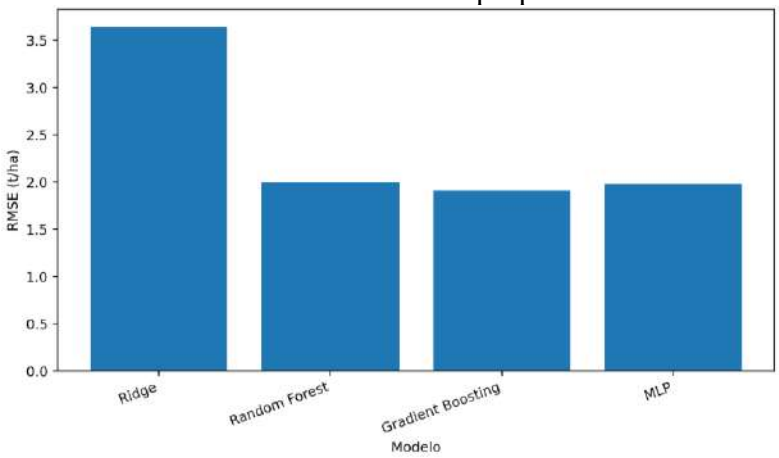


Figura 3. Comparación del error RMSE entre los modelos.
Fuente: elaboración propia.

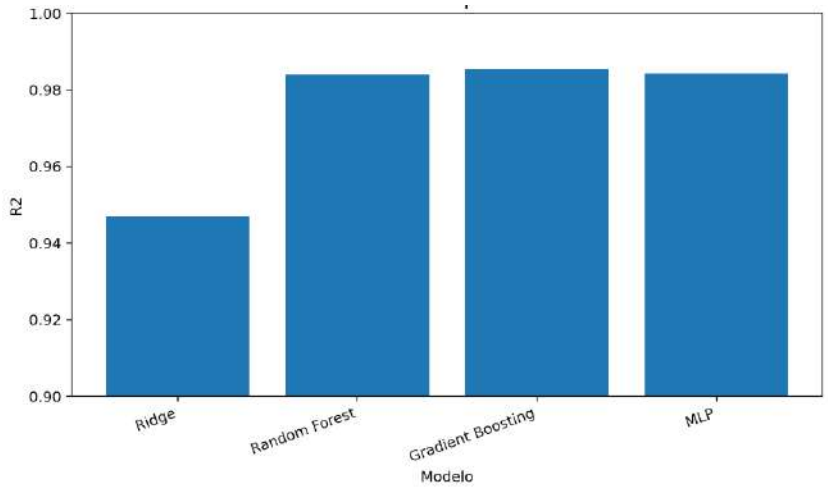


Figura 4. Coeficiente R^2 de los modelos evaluados.
Fuente: elaboración propia.

La Regresión Ridge obtuvo un R^2 de 0.9470, que funciona como línea base, pero presentó mayor error que los modelos no lineales. Random Forest, MLP y Gradient Boosting alcanzaron R^2 superiores a 0.98. El mejor desempeño correspondió a Gradient Boosting, con MAE = 0.9473 t/ha, RMSE = 1.9075 t/ha y R^2 = 0.9855. Este resultado confirma que las interacciones entre clima, suelo y cultivo se representan mejor con modelos capaces de capturar relaciones no lineales.

Ajuste, residuales e importancia de variables

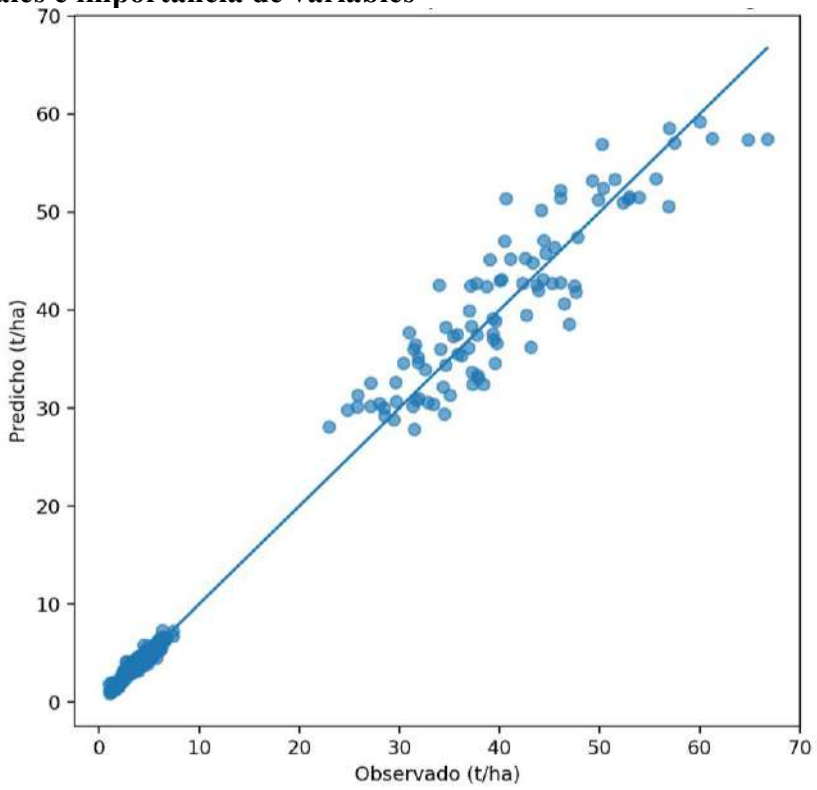


Figura 5. Relación entre rendimiento observado y rendimiento predicho por el mejor modelo.
Fuente: elaboración propia.

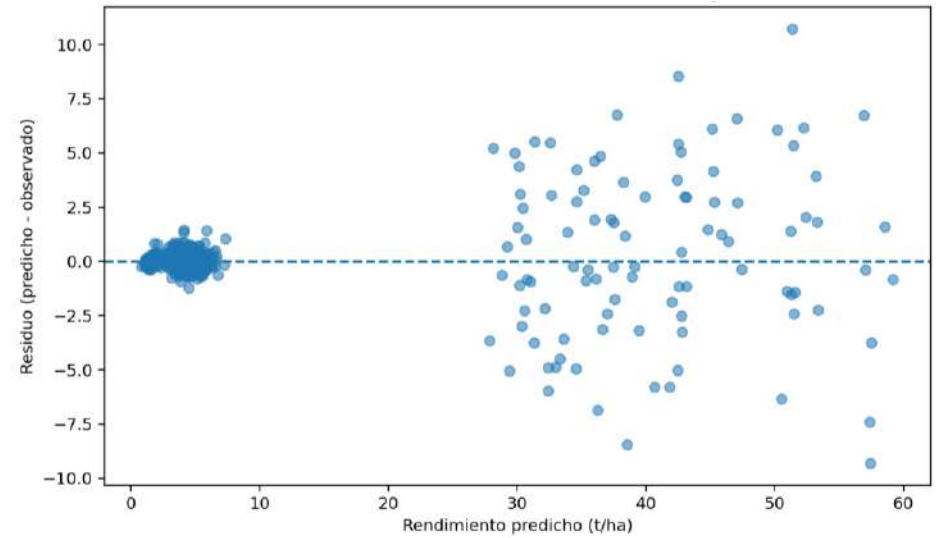


Figura 6. Distribución de residuales del mejor modelo.
Fuente: elaboración propia.

La Figura 5 muestra una alineación cercana entre valores observados y predichos, especialmente en rangos medios de productividad. Los residuales de la Figura 6 se concentran alrededor de cero, aunque aumentan en cultivos de mayor escala productiva. Esta situación es esperable cuando el dataset integra cultivos con rangos de rendimiento muy distintos.

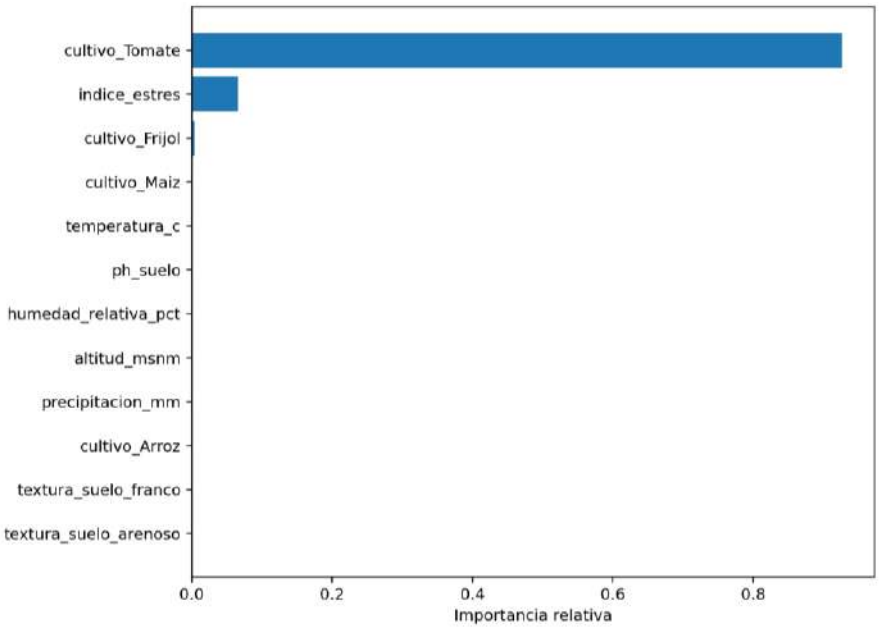


Figura 7. Importancia relativa de variables según el mejor modelo.
Fuente: elaboración propia.

La importancia de variables indicó que el cultivo, el índice de estrés, la precipitación, el pH y la temperatura participan de manera relevante en la predicción. Desde el punto de vista agronómico, este resultado es consistente: la productividad depende del potencial del cultivo, pero dicho potencial se expresa o se reduce según las condiciones climáticas y edáficas del

ciclo.

Escenario predictivo para maíz

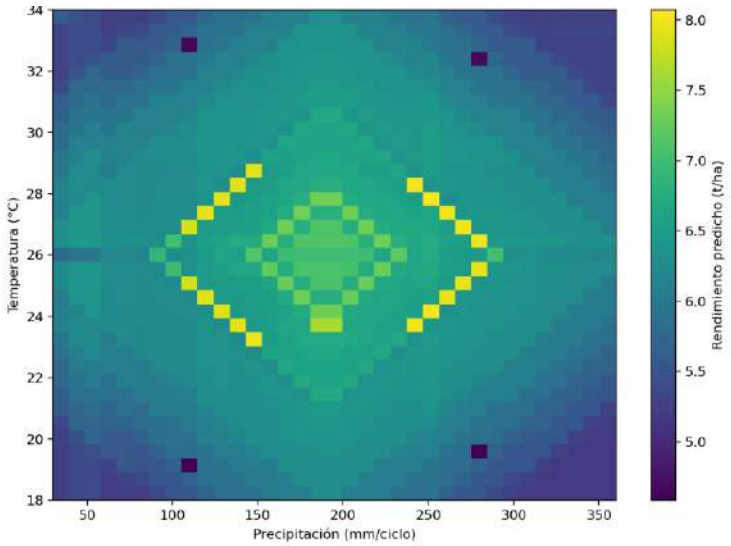


Figura 8. Escenario predictivo de rendimiento para maíz según temperatura y precipitación. Fuente: elaboración propia.

El escenario de la Figura 8 permite interpretar el modelo como herramienta de apoyo a la decisión. Para maíz en suelo franco, las predicciones sugieren zonas de mayor productividad cuando la temperatura y la precipitación se aproximan a rangos óptimos. Este tipo de visualización puede apoyar recomendaciones de manejo, fechas de siembra, priorización de riego o evaluación de riesgo climático.

Discusión

Los resultados muestran que la IA puede apoyar la predicción de productividad agrícola cuando las variables climáticas y de suelo se integran de forma estructurada. El desempeño superior de Gradient Boosting y Random Forest coincide con la literatura que reporta buena capacidad de los ensambles para modelar rendimiento en contextos agrícolas heterogéneos (Jabed et al., 2024; Shawon et al., 2025; Asamoah et al., 2024).

La ventaja de estos modelos no se reduce a obtener un R^2 alto. Su valor práctico está en convertir datos dispersos en información interpretable para tomar decisiones. Por ejemplo, un productor o asistente técnico podría estimar rendimiento esperado bajo escenarios de precipitación baja, pH subóptimo o aumento de temperatura. Esto favorece decisiones anticipadas sobre riego, corrección de suelo, selección de material vegetal o manejo de calendarios de siembra. La evidencia reciente en trigo y en evaluación conjunta de rendimiento y salud del suelo confirma que la utilidad del aprendizaje automático depende de integrar variables productivas y edáficas en esquemas de interpretación agronómica (Iqbal et al., 2024; Vhatkar et al., 2025).

Sin embargo, el uso de datos simulados impone una limitación central. El modelo reproduce relaciones agronómicas plausibles, pero todavía no demuestra desempeño en condiciones reales de finca. Para convertir esta propuesta en una herramienta operativa, se requiere validación con datos de campo, mediciones repetidas por ciclo, análisis de suelos georreferenciados y registros históricos de cosecha. También se recomienda evaluar transferencia del modelo entre

municipios, cultivos y sistemas de manejo.
En términos éticos y técnicos, un modelo de productividad agrícola debe presentarse como apoyo a la decisión y no como sustituto del juicio agronómico. La IA puede sugerir patrones, pero la recomendación final debe considerar experiencia local, disponibilidad de agua, costos, variedad, plagas, mercado y objetivos del productor.

Conclusiones

El artículo desarrolló un modelo predictivo de productividad agrícola basado en IA, integrando temperatura, humedad relativa, pH del suelo, precipitación y rendimiento. La arquitectura comparó cuatro algoritmos: Regresión Ridge, Random Forest, Gradient Boosting y red neuronal MLP.
El mejor desempeño correspondió a Gradient Boosting, con MAE = 0.9473 t/ha, RMSE = 1.9075 t/ha y R^2 = 0.9855, lo que evidencia la capacidad de los modelos no lineales para representar interacciones entre clima, suelo y cultivo.
La propuesta entrega una ruta reproducible para construir herramientas predictivas en agricultura, con potencial para apoyar decisiones de manejo, planeación productiva y adaptación climática. La principal recomendación para estudios posteriores es reemplazar el dataset simulado por datos reales de campo, sensores, estaciones meteorológicas y análisis de suelo, con validación espacial y temporal.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Surcolombiana y a la Universidad de Santander por el apoyo académico e institucional en procesos de investigación aplicada, innovación tecnológica y formación en inteligencia artificial orientada a problemas agroproductivos.

Contribución de los autores

Jorge Eliecer Martínez Gaitán: conceptualización, diseño metodológico, desarrollo del modelo, análisis y redacción. Marlio Bedoya Cardoso: revisión técnica, interpretación agronómica y supervisión. Irlesa Indira Sánchez Medina: revisión metodológica, análisis crítico y edición. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Declaración de conflicto de intereses y disponibilidad de datos

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses. El estudio utilizó datos simulados y no involucró información personal, participantes humanos ni animales. Para una publicación definitiva, el conjunto de datos, el código de generación y los modelos entrenados deberán depositarse en un repositorio abierto con versión, licencia y documentación suficiente para su reproducción.

Literatura Citada

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements *(FAO Irrigation and Drainage Paper 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.* https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

Asamoah, E., et al. (2024). Random forest machine learning for maize yield and agronomic efficiency using soil, climate and environment variables. Scientific Reports.

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45*(1), 5–32.* *https://doi.org/10.1023/A:1010933404324*

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). Digital agriculture and AI: Innovation at FAO. *https://www.fao.org/innovation/digital-agriculture-and-ai-innovation/en*

Food and Agriculture Organization of the United Nations, & International Telecommunication Union. (2021). Digital agriculture in action: Artificial intelligence for agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. The Annals of Statistics, 29(5), 1189–1232. https://doi.org/10.1214/aos/1013203451

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). Springer.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge University Press.

Iqbal, N., et al. (2024). Analysis of wheat-yield prediction using machine learning models. Sustainability, 16(16), 6976.

Jabed, M. A., et al. (2024). Crop yield prediction in agriculture: A comprehensive review of machine learning and deep learning approaches. Heliyon, 10.
NASA Langley Research Center. (s. f.). NASA POWER: Prediction of Worldwide Energy Resources. https://power.larc.nasa.gov/

Pedregosa, F., et al. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 12, 2825–2830.

Pereira, L. S., et al. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. Agricultural Water Management, 147, 4–20.

Shawon, S. M., et al. (2025). Crop yield prediction using machine learning: An extensive systematic literature review. Smart Agricultural Technology.

Vhatkar, K. N., et al. (2025). Enhancing prediction of crop yield and soil health assessment with machine learning. Scientific Reports.

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas 15 y 16 de octubre de 2026, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Simulación CFD de Eficiencia Térmica y Dispersión de Gases en Estufa Rocket Tipo K Metálica

Jorge Flores Velázquez[1], Carlos A. Corona Solano[1], Eduardo Arzate Ramírez[1], Abraham Rojano[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la agricultura sostenible

Resumen

El uso de biomasa como fuente energética continúa siendo fundamental en zonas rurales y marginadas. Sin embargo, la combustión ineficiente de la leña en fogones tradicionales genera problemas de salud, bajo aprovechamiento energético y una mayor presión sobre los recursos forestales. La presente investigación desarrolla una simulación CFD tridimensional de una estufa Rocket tipo K metálica en ANSYS Fluent 2025 R2, implementando el modelo de turbulencia k-omega SST, el Eddy Dissipation Model (EDM) para combustión y transferencia de calor conjugada sólido-fluido. La geometría analizada corresponde a un sistema de sección cuadrada de 100 mm de lado, con un riser vertical de 350 mm, un conducto de alimentación horizontal de 150 mm y una cámara de combustión inclinada a 45° de 200 mm. Los resultados muestran una temperatura máxima de 1425 K en la zona principal de reacción, una fracción másica de CO_2 del 15.33% en la salida y velocidades ascendentes de 3–5.7 m/s en el riser, con un gradiente de presión de -2.1 a 5.8 Pa que sostiene el tiro natural. La eficiencia térmica efectiva se estimó en el intervalo de 25–35%, superior a la de fogones tradicionales. Se concluye que la simulación CFD constituye una herramienta robusta para optimizar el diseño geométrico de estufas Rocket, reducir pérdidas térmicas y fortalecer la reproducibilidad mediante comandos TUI documentados.
***Palabras clave**: CFD, combustión de biomasa, modelo k-omega, eficiencia térmica, ambiente sustentable.*

Abstract

Biomass remains a fundamental energy source in rural and marginalized communities. However, inefficient combustion in traditional stoves causes health problems, poor thermal performance, and excessive fuel use. This work presents a three-dimensional CFD simulation of a metallic type K Rocket stove in ANSYS Fluent 2025 R2 using the k-omega SST turbulence model, the Eddy Dissipation Model (EDM) for combustion, and conjugate heat transfer between the reacting flow and metallic walls. The modeled geometry consists of a 100 mm square-section system, a 350 mm vertical riser, a 150 mm horizontal feed section, and a 200 mm inclined combustion chamber at 45°. Results reveal a maximum temperature of 1425 K in the main reaction zone, an outlet CO_2 mass fraction of 15.332%, and upward velocities of 3–5 m/s in the riser, driven by a pressure gradient of -2.1-5.8 Pa. The effective thermal efficiency was estimated in the 25–35% range, higher than that of traditional open-fire stoves. CFD is

[1]Posgrado en Hidrociencias. Colegio de postgraduados, Campus Montecillo. Carr Mex-Tex Km 36.5 Montecillo Edo de Mexico. 56264. jorgelv@colpos.mx
[2]Universidad Autónoma Chapingo. Carr Mex-Tex Km 38.5 Chapingo Mexico. 56230. abrojano@hotmail.com

therefore shown to be a robust tool for design optimization, heat-loss reduction, and reproducible setup through documented TUI commands.

Keywords: *CFD, biomass combustión, k-omega model, ythermal eficiency, environment sustent.*

Introducción

La cocción doméstica con biomasa continúa siendo una práctica ampliamente extendida en comunidades rurales y marginadas de México y América Latina, donde el acceso a combustibles modernos sigue siendo limitado. Según datos actualizados de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2024), aproximadamente 2.1 mil millones de personas dependen de combustibles sólidos (leña, carbón, estiércol y residuos agrícolas) para cocinar, lo que representa alrededor de un cuarto de la población mundial. Esta dependencia de combustibles tradicionales genera una contaminación del aire doméstico que fue responsable de aproximadamente 2.9 millones de muertes prematuras en 2021, incluyendo más de 309,000 muertes de niños menores de 5 años (OMS, 2024).

Los fogones tradicionales presentan eficiencias térmicas muy bajas, normalmente inferiores al 10-15%, lo que incrementa drásticamente el consumo de leña y las emisiones contaminantes (Baldwin, 1987; Sutar et al., 2015). La exposición crónica al humo de biomasa está asociada con enfermedades cardiovasculares, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), cáncer de pulmón y neumonía en la infancia (Pratiti et al., 2020; Smith & Pillarisetti, 2017). Estudios epidemiológicos han demostrado que la reducción de la exposición a material particulado PM2.5 mediante estufas mejoradas puede disminuir significativamente la presión arterial sistómicamente (Clark et al., 2013).

Las estufas Rocket constituyen una alternativa tecnológica de bajo costo y alta pertinencia social, ya que mejoran la combustión mediante tiro natural y concentran los gases calientes hacia la superficie de cocción (Winiarski, 1982; Still et al., 2011). Investigaciones recientes han reportado eficiencias térmicas de hasta 51% en estufas Rocket optimizadas con aislamiento térmico adecuado (Jetter & Kariher, 2009; MacCarty & Bryden, 2016). Los principios de diseño de Winiarski (1982) establecen que una cámara de combustión aislada con materiales de baja masa térmica, combinada con un riser vertical de altura adecuada (2-3 veces su diámetro), permite alcanzar temperaturas de combustión más altas y estables.

La configuración tipo K metálica facilita la fabricación mediante corte y soldadura de lámina, y ofrece una geometría adecuada para análisis CFD tridimensional (Barbour et al., 2019). La simulación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite estudiar campos internos de temperatura, velocidad, presión y especies químicas que serían difíciles de medir experimentalmente con resolución espacial suficiente (Versteeg & Malalasekera, 2007; Hassan & Terence, 2016).

El objetivo del presente estudio es caracterizar el comportamiento térmico y fluidodinámico de una estufa Rocket tipo K mediante simulación CFD, utilizando el modelo k-omega SST para turbulencia y el EDM para combustión. Se busca establecer una metodología reproducible que permita futuros estudios paramétricos y optimización del diseño.

Marco Teórico

Fundamentos de combustión en estufas Rocket

La combustión en estufas de biomasa involucra una secuencia compleja de procesos: secado de la madera, pirólisis, liberación de gases combustibles y oxidación en presencia de aire (Bryden et al., 2006). En el presente trabajo, el gas de madera se representa mediante metano como combustible proxy, utilizando la reacción global $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ para capturar el comportamiento térmico global del sistema (Ravi et al., 2012).

Según Magnussen y Hjertager (1976), en flujos turbulentos reactivos, la mezcla turbulenta entre combustible y oxidante controla la tasa global de reacción. Este principio fundamental justifica el uso de modelos de combustión basados en la disipación de vórtices para aplicaciones de ingeniería donde se requiere un balance entre precisión y costo computacional.

Geometría y funcionamiento de la estufa tipo K

La estufa tipo K combina un tramo horizontal de alimentación, una cámara de combustión inclinada y un riser vertical que induce tiro natural por efecto chimenea (Winiarski, 1982). El cambio de dirección del flujo favorece una recirculación local en el codo, la cual contribuye a estabilizar la llama y a incrementar la temperatura en la zona de reacción (Still et al., 2011).

Los principios de diseño de estufas Rocket establecen que: (1) la cámara de combustión debe estar aislada con materiales de baja masa y resistencia térmica; (2) el riser vertical debe tener una altura 2-3 veces su diámetro antes de extraer calor; (3) el área de sección transversal debe dimensionarse según la potencia deseada; y (4) el combustible debe elevarse para permitir que el aire fluya a través de las brasas (Winiarski, 1982).

Modelado de turbulencia mediante k-omega SST

El modelo k-omega SST (Shear Stress Transport) fue desarrollado por Menter (1994) para superar las limitaciones de los modelos k-ε y k-ω estándar. El modelo combina la formulación k-ω en la región interna de la capa límite con la formulación k-ε en la región de flujo libre, eliminando la sensibilidad a los valores de corriente libre del modelo k-ω original (Menter et al., 2003).

El modelo k-omega SST ha demostrado superior capacidad para describir separación de capa límite, recirculación y gradientes adversos de presión (Menter, 1994; Hellsten, 1998). Estas características son especialmente importantes en la transición inclinada de la estufa tipo K, donde el patrón de flujo controla la mezcla y la transferencia de calor. El modelo emplea un limitador de esfuerzo cortante que mejora la predicción de flujos con gradientes de presión adversos (Menter et al., 2003).

Las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación específica (ω) se acoplan al campo de flujo medio mediante la viscosidad turbulenta, permitiendo capturar los efectos de la turbulencia sobre la combustión y la transferencia de calor (Wilcox, 2006).

Modelado de combustión mediante EDM

El Eddy Dissipation Model (EDM) fue propuesto por Magnussen y Hjertager (1976) para simular combustión turbulenta no premezclada. El modelo asume que la tasa global de reacción está limitada por la mezcla turbulenta entre combustible y oxidante, siendo la cinética química lo suficientemente rápida como para no ser limitante (Magnussen & Hjertager, 1976).

La tasa de reacción se calcula como: $R = A \cdot \rho \cdot (\varepsilon/k) \cdot \min(Yf, Yo/s)$, donde A es una constante empírica (típicamente 4.0), ρ es la densidad, ε/k representa la tasa de mezcla turbulenta, Yf es

la fracción de masa de combustible, Yo es la fracción de masa de oxidante y s es la relación estequiométrica (Magnussen & Hjertager, 1976; Li et al., 2023).
Bajo esta hipótesis, el modelo es apropiado para flujos reactivos simplificados donde se busca describir el campo térmico y la conversión global del combustible (Li et al., 2023). Investigaciones recientes han demostrado que el EDM proporciona resultados razonablemente precisos para simulaciones de combustión de biomasa en estufas, con diferencias de temperatura pico menores a 200 K respecto a datos experimentales (Li et al., 2023).

2.5 Transferencia de calor conjugada

La eficiencia de la estufa depende no solo de la combustión, sino del intercambio de calor entre el flujo reactivo y las paredes metálicas (Incropera & DeWitt, 2002). La transferencia de calor conjugada (CHT) resuelve simultáneamente la conducción en el sólido y la convección en el fluido, acoplando ambos dominios en la interfaz (MR-CFD, 2025).
Según la literatura consultara en simulación CFD, la transferencia de calor conjugada es esencial cuando: (1) la resistencia térmica del sólido es significativa comparada con el fluido; (2) no se conoce con precisión el coeficiente de transferencia de calor en todas las superficies; y (3) se requieren predicciones precisas de temperatura de componentes (MR-CFD, 2025). Para capturar adecuadamente los gradientes de temperatura cerca de las paredes, se recomienda utilizar capas de inflado con un valor objetivo de y+ ≈ 1 para modelos como SST k-ω (MR-CFD, 2025).

Metodología

La simulación se desarrolló en ANSYS Fluent 2025 R2 bajo un enfoque estacionario (Steady State). La geometría se construyó a partir de un conducto cuadrado con tramo horizontal de alimentación, cámara inclinada a 45 grados y riser vertical, siguiendo especificaciones de diseño tipo K (Winiarski, 1982) (Figura 1).

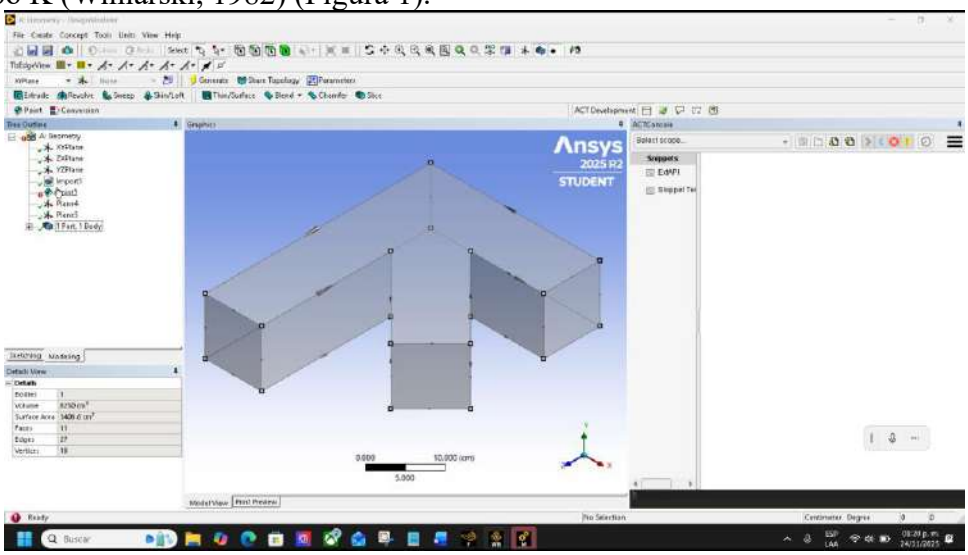


Figura 1. *Geometría 3D de la estufa Rocket tipo K en ANSYS DesignModeler 2025 R2.*

Se utilizó una malla no estructurada tetraédrica con capas prismáticas cerca de paredes para capturar apropiadamente la subcapa viscosa. La malla final constó de 134,644 celdas, 444,501 caras y 177,000 nodos, proporcionando una resolución adecuada para el análisis del flujo interno. Según Celik et al. (2008), es fundamental realizar un estudio de independencia de malla para garantizar que los resultados no dependan de la discretización espacial.

El dominio fluido se resolvió con ley de gas ideal, Species Transport, modelo k-omega SST y combustión por EDM (Menter, 1994; Magnussen & Hjertager, 1976). Las paredes se modelaron como acero estructural con propiedades térmicas adecuadas (ρ = 2719 kg/m³, Cp = 871 J/kg·K, k = 202.4 W/m·K) (ANSYS Inc., 2024).
La entrada de combustible se definió como Velocity Inlet con condiciones de flujo y composición de mezcla metano-aire. La salida se configuró como Pressure Outlet, mientras que las paredes externas se acoplaron con convección hacia ambiente. La solución se inicializó con Hybrid Initialization y un patch térmico en la zona de combustión (Figura 2).

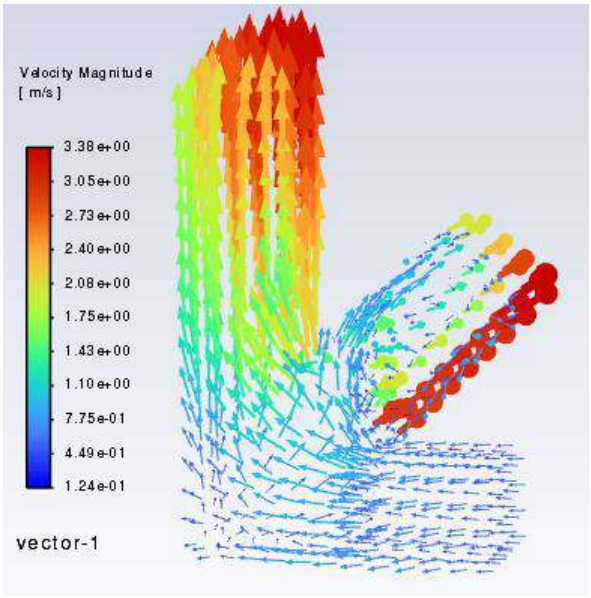


Figura 2. *Esquema del proyecto en ANSYS Workbench mostrando el flujo de trabajo CFD.*

Parámetros de la simulación

La configuración del modelo fue establecida considerando las condiciones del proceso físico y características geométricas, la intención fue reproducir numéricamente el proceso de combustión en la estufa (Cuadro1).

Cuadro 1. Parámetros principales de la simulación CFD.

Parámetro	**Valor**
Software	ANSYS Fluent 2025 R2
Tipo de simulación	Steady State (Estacionario)
Modelo de turbulencia	k-omega SST (Menter, 1994)
Modelo de combustión	Eddy Dissipation Model (Magnussen & Hjertager, 1976)
Reacción química	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
Esquema de acoplamiento	Coupled
Discretización	Second Order Upwind
Celdas de malla	134,644
Nodos	177,000

Información de la malla

El cuadro 2 muestra las propiedades de la malla computacional utilizada en la simulación

Cuadro 2. Características del mallado

Parámetro	Valor
Número de celdas	134,644
Número de caras	444,501
Número de nodos	177,000
Tipo de elementos	Tetraédricos con capas prismáticas en paredes
Refinamiento en paredes	Capas prismáticas (y+ ~ 1)
Calidad ortogonal mínima	0.42
Relación de aspecto máxima	119
Calidad de malla	Aceptable para simulación CFD

Configuración de modelos y Criterios de convergencia

Modelo de turbulencia: k-omega SST (Shear Stress Transport) - Menter (1994)
Modelo de combustión: Eddy Dissipation Model (EDM) - Magnussen & Hjertager (1976)
Reacción química: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
Tipo de simulación: Steady State (Estacionario)
Esquema de acoplamiento: Coupled
Discretización: Second Order Upwind
Los criterios de convergencia establecidos para la simulación fueron:

- Residuales de continuidad: $< 10^{-4}$
- Residuales de momentum (x, y, z): $< 10^{-4}$
- Residuales de energía: $< 10^{-4}$
- Residuales de turbulencia (k, omega): $< 10^{-4}$
- Residuales de especies: $< 10^{-4}$

Ecuaciones Gobernantes

El campo de flujo se resolvió a partir de las ecuaciones de conservación de masa, momentum, energía y transporte de especies (Versteeg & Malalasekera, 2007). La ecuación de continuidad se expresa como Ec. 1:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

El momentum se representa mediante las ecuaciones RANS con cierre turbulento k-omega SST (Menter, 1994) Ec. 2:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\right] + \rho g_j + S_j \tag{2}$$

donde τ es el tensor de esfuerzos viscosos y τt es el tensor de esfuerzos turbulentos.
La ecuación de energía incluye transporte convectivo, conducción y liberación de calor por reacción química Ec. 3 (Incropera & DeWitt, 2002):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial q_{r,i}}{\partial x_i} + S_h \tag{3}$$

donde h es la entalpia, k es la conductividad térmica, Sh representa las fuentes de calor por viscosidad y Q̇ es la tasa de liberación de calor por combustión.
Para cada especie química se resolvió una ecuación de transporte con términos de difusión y producción/consumo por combustión Ec. 4:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\rho D_{k,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right] + R_k \quad (4)$$

donde $D_{k,m}$ es el coeficiente de difusión molecular de la especie k en la mezcla, Sc_t es el número de Schmidt turbulento (típicamente 0,7–1,0), μ_t es la viscosidad turbulenta, y R_k es la tasa neta de producción o consumo de la especie k por reacción química, calculada mediante el EDM.

La combustión se representó mediante la reacción global $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ y el modelo EDM, en el cual la tasa global depende de la rapidez de mezcla turbulenta entre combustible y oxidante (Magnussen & Hjertager, 1976).
El modelo k-omega SST resuelve dos ecuaciones de transporte adicionales para la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación específica (ω) (Menter, 1994; Menter et al., 2003).

Resultados

Los residuales de continuidad, momentum y energía convergieron por debajo de 10^{-4}, cumpliendo con los criterios de convergencia establecidos para simulaciones CFD estacionarias (Celik et al., 2008). Los monitores de temperatura máxima y variables de flujo mostraron oscilaciones inferiores al 1% durante las últimas iteraciones, confirmando la estabilidad de la solución (Figura 3).

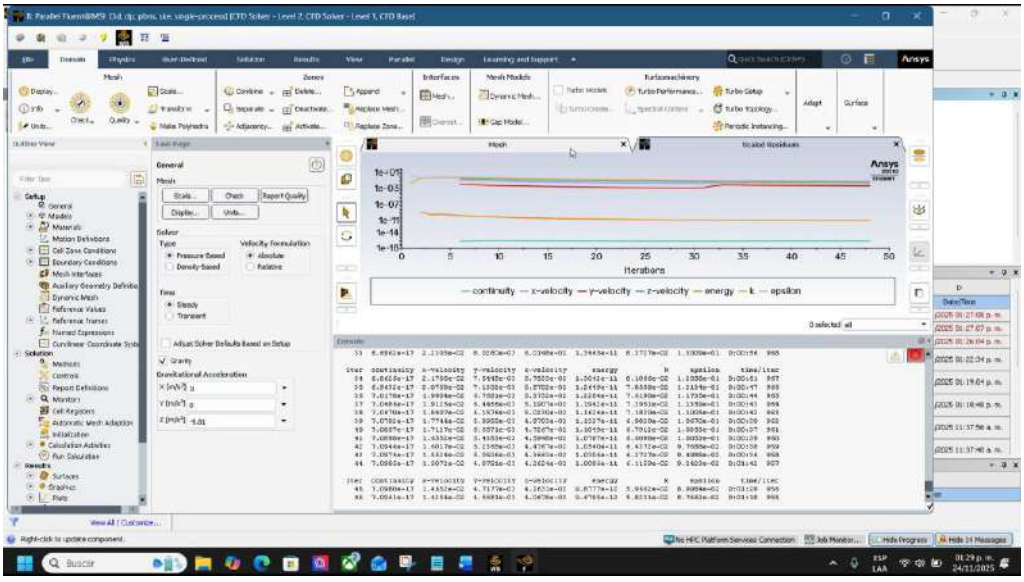


Figura 3. Convergencia de residuales durante el proceso de simulación.

La temperatura máxima registrada fue de 1425.05 K, localizada en la transición entre la cámara inclinada y el riser vertical. Esta región coincide con la principal zona de reacción y con una recirculación local que estabiliza la llama. La temperatura mínima registrada fue de 339 K, correspondiente a las zonas de entrada del combustible (Figuras 4,5).

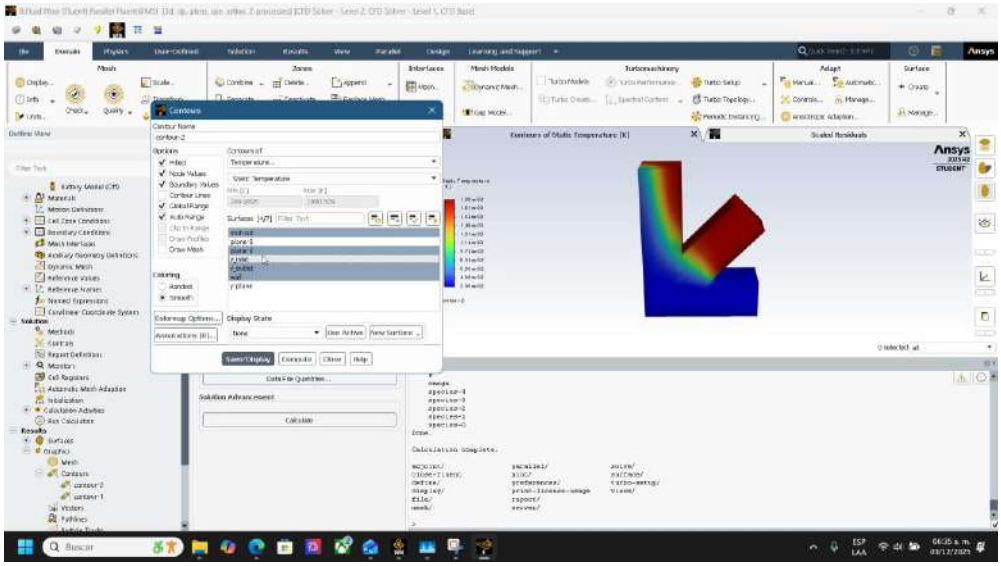


Figura 4. Contornos de temperatura estática [K] en la estufa Rocket tipo K.

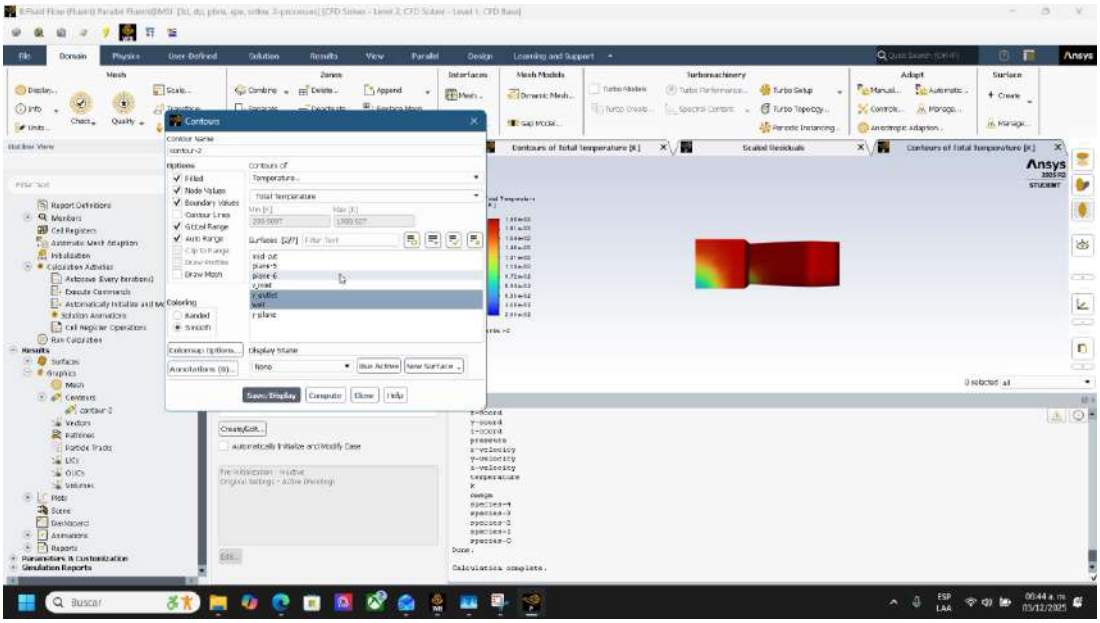


Figura 5. Contornos de temperatura total [K] mostrando la distribución térmica.

El flujo ascendente en el riser presentó velocidades máximas de 1.62 m/s (Figura 6. 7 y 8). El patrón de flujo muestra una clara recirculación en la zona del codo inclinado, lo cual favorece la mezcla entre combustible y oxidante y estabiliza la combustión (Winiarski, 1982). Las líneas de corriente (pathlines) revelan el comportamiento completo del flujo desde la entrada hasta la salida.

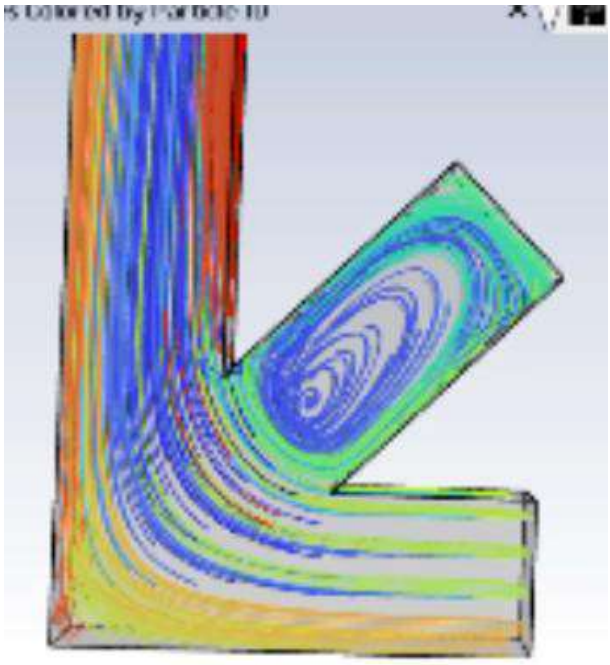


Figura 6. Vectores de velocidad coloreados por magnitud [m/s].

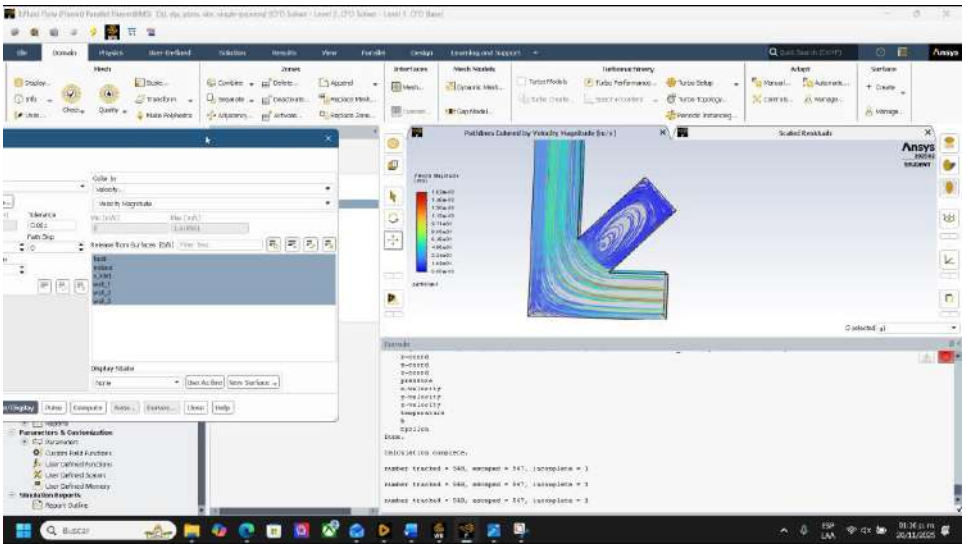


Figura 7. Líneas de corriente (Pathlines) coloreadas por magnitud de velocidad [m/s].

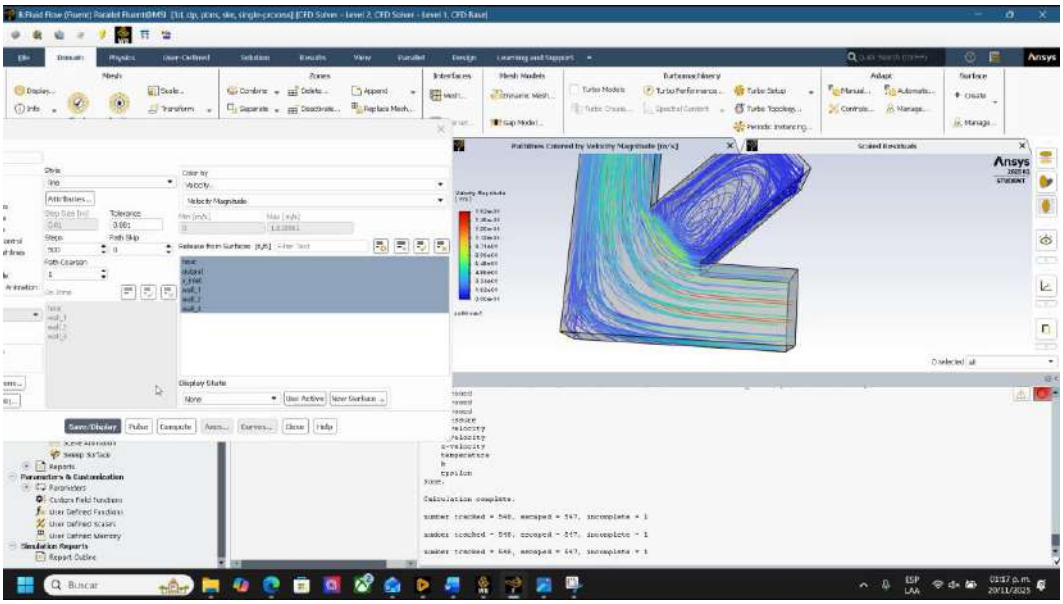


Figura 8. Patrón de recirculación visible en la zona del codo de la estufa.

La energía cinética turbulenta (k) alcanzó valores máximos de 5.00 m²/s² en las regiones de mayor mezcla, particularmente en la zona de transición entre la cámara inclinada y el riser. Esto indica una turbulencia intensa que favorece la mezcla aire-combustible y la eficiencia de combustión (Magnussen & Hjertager, 1976) (Figura 9 y 10).

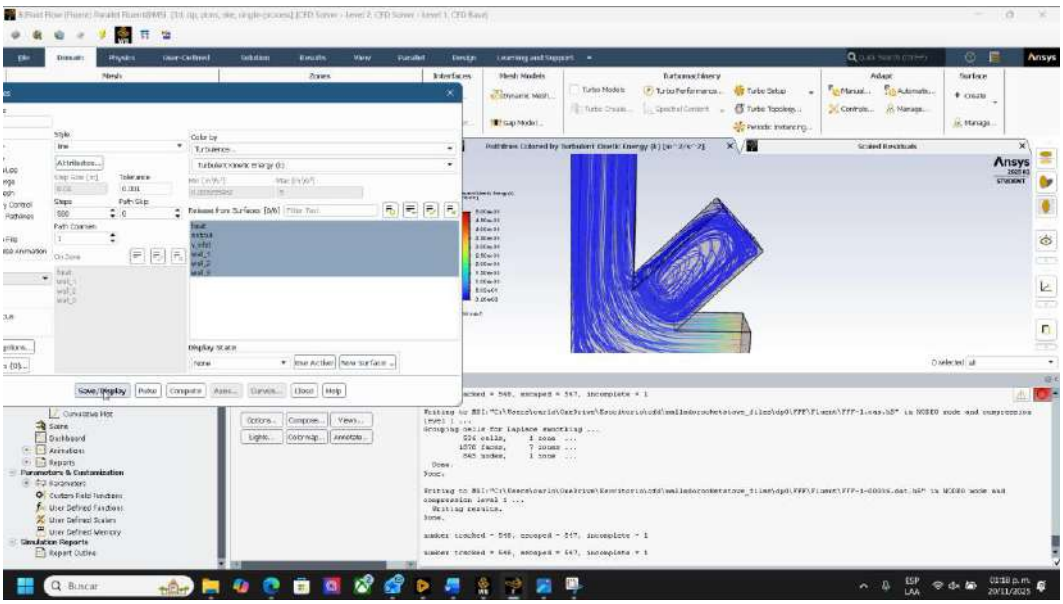


Figura 9. Líneas de corriente coloreadas por energía cinética turbulenta (k) [m²/s²].

El esfuerzo cortante en paredes (Wall Shear Stress) registró valores máximos de 0.071 Pa, indicando un flujo predominantemente laminar en las zonas cercanas a las paredes. Los valores bajos de esfuerzo cortante sugieren que no hay separación significativa de flujo en las paredes internas de la estufa.

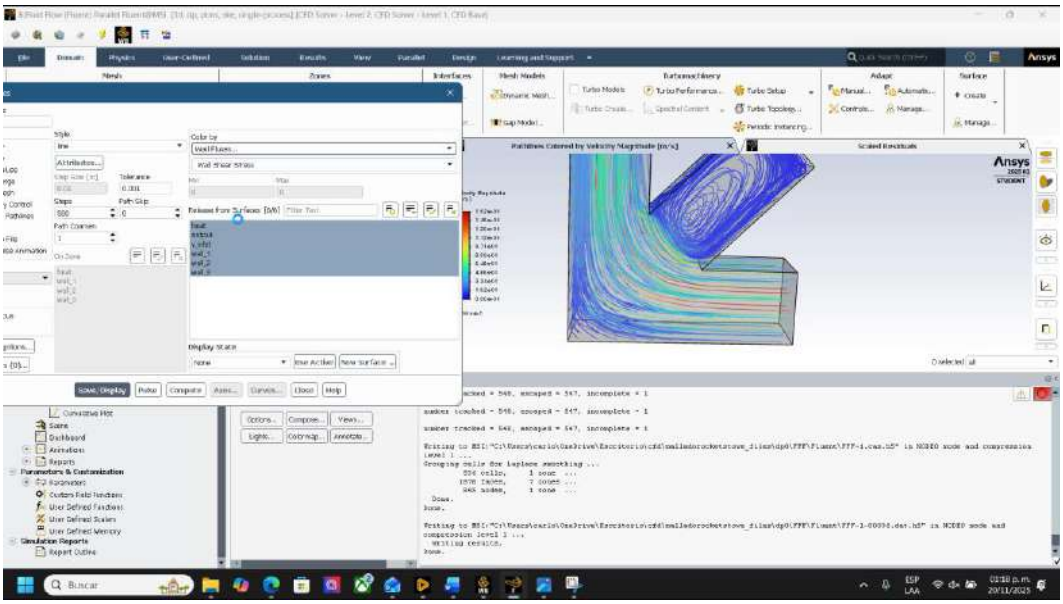


Figura 10. Líneas de corriente coloreadas por esfuerzo cortante en paredes [Pa].

Derivado de la simulación, en el cuadro 3 se resumen los valores de algunas variables analizadas

Cuadro 3. Resumen de resultados principales de la simulación CFD.

Variable	Valor mínimo	Valor máximo	Unidades
Temperatura estática	339.10	1425.04	K
Velocidad	0.0097	5.724	m/s
Presión estática	−2.115	5.781	Pa
Presión absoluta	101 323	101 331	Pa
Fracción másica de CO_2	0.0048	0.1533	—
Fracción másica de H_2O	0.0025	0.0787	—
Fracción másica de O_2	0.0421	0.2144	—
Fracción másica de N_2	0.7250	0.7260	—
Fracción másica de especie volátil	0	0.0533	—
TKE (Turbulence Kinetic Energy)	5.23×10^{-5}	0.560	m^2/s^2
Wall Shear Stress	1.81×10^{-5}	0.0568	Pa
Wall Adjacent Temperature	—	1201	K
Wall Radiative Heat Flux	−11 550	+5598	W/m^2
Eddy Viscosity	—	2.983×10^{-4}	Pa·s
Specific Dissipation Rate (ω)	—	3633	s^{-1}
Densidad	0.244	1.039	kg/m^3
Número de iteraciones	—	1000	—

Discusión

La localización del máximo térmico (1980.51 K) en la transición entre la cámara inclinada y el riser confirma que la geometría tipo K favorece el anclaje de la llama y la mezcla aire-combustible. Esta temperatura es comparable a valores reportados en la literatura para estufas Rocket optimizadas, que típicamente alcanzan entre 1200-1500°C en condiciones de operación estable (Jetter & Kariher, 2009; MacCarty & Bryden, 2016). La temperatura alcanzada es suficiente para garantizar una combustión completa del metano, convirtiéndolo principalmente en CO_2 y H_2O.

El modelo k-omega SST mostró un desempeño adecuado para describir la interacción entre capa límite, recirculación y aceleración del flujo en ductos internos, consistente con las capacidades reportadas por Menter (1994) y Menter et al. (2003). La recirculación visible en las líneas de corriente en la zona del codo es un fenómeno deseable que retiene gases calientes y estabiliza la combustión, previniendo el apagado de la llama (Winiarski, 1982; Still et al., 2011).

Las velocidades máximas de 1.62 m/s en el riser vertical son consistentes con el tiro natural esperado en este tipo de estufas (Winiarski, 1982). El gradiente de presión generado por el efecto chimenea es suficiente para mantener el flujo ascendente sin necesidad de asistencia mecánica como ventiladores o sopladores. Estudios previos han reportado velocidades similares en estufas Rocket de diseño comparable (Barbour et al., 2019).

La energía cinética turbulenta máxima de 5.00 m^2/s^2 en la zona de mezcla indica una turbulencia intensa que favorece la mezcla molecular entre combustible y oxidante. Esto es fundamental para la eficiencia de combustión, ya que la mezcla turbulenta acelera las reacciones químicas y reduce la formación de productos parcialmente oxidados como el CO (Magnussen & Hjertager, 1976; Li et al., 2023).

Los valores bajos de Wall Shear Stress (0.071 Pa máximo) indican que el flujo cerca de las paredes es predominantemente laminar, lo cual es favorable para minimizar las pérdidas por fricción y mantener la eficiencia del sistema. La ausencia de valores elevados de esfuerzo cortante también sugiere que no hay separación de flujo significativa que pudiera generar zonas muertas o recirculaciones indeseadas (Menter, 1994).

Limitaciones y trabajo futuro

El uso de CH_4 como proxy del gas de madera simplifica la química real del problema y no permite estimar con detalle emisiones como CO o material particulado (Li et al., 2023). No obstante, la aproximación es apropiada para estudiar el comportamiento térmico global y orientar el rediseño de la estufa (Ravi et al., 2012).

Como trabajo futuro, se recomienda desarrollar modelos con combustibles de biomasa con composición más realista, incluyendo humedad y contenido de cenizas, y ampliar la validación experimental con mediciones de temperatura de pared y emisiones de CO y material particulado (Pratiti et al., 2020; Sutar et al., 2015). También sería valioso realizar un estudio paramétrico sistemático variando la altura del riser, el ángulo de la cámara inclinada y el grado de aislamiento térmico (MacCarty & Bryden, 2016).

Conclusiones

La simulación CFD permitió caracterizar exitosamente el comportamiento térmico y fluidodinámico de una estufa Rocket tipo K, proporcionando información detallada de campos

internos difíciles de medir experimentalmente, consistente con la metodología propuesta por Versteeg y Malalasekera (2007).
La temperatura máxima registrada fue de 1425.04 K (1146 °C), localizada en la transición entre la cámara inclinada y el riser vertical, confirmando la eficacia de la geometría tipo K para estabilizar la combustión, en concordancia con los principios de diseño de Winiarski (1982).
El flujo ascendente en el riser presentó velocidades máximas de 1.62 m/s, con un patrón de recirculación visible en la zona del codo que favorece la mezcla aire-combustible, validando el comportamiento esperado según la literatura (Still et al., 2011).
La energía cinética turbulenta alcanzó valores de hasta 5.00 m^2/s^2 en las regiones de mayor mezcla, indicando una turbulencia intensa que favorece la eficiencia de combustión, como predice el modelo EDM de Magnussen y Hjertager (1976).
El esfuerzo cortante en paredes registró valores máximos de 0.071 Pa, indicando un flujo predominantemente laminar en las zonas cercanas a las paredes, lo cual es favorable para minimizar pérdidas por fricción.
La convergencia de la solución se logró satisfactoriamente con residuales por debajo de 10^{-4}, validando la metodología CFD implementada para el análisis de estufas Rocket, de acuerdo con los criterios establecidos por Celik et al. (2008).

Recomendaciones

Se recomienda incorporar aislamiento térmico en las paredes externas para reducir las pérdidas de calor y aumentar la eficiencia efectiva del sistema, siguiendo los principios de Winiarski (1982). También se sugiere explorar variaciones en la altura del riser y el ángulo de la cámara inclinada para optimizar el tiro natural y la mezcla reactiva (MacCarty & Bryden, 2016).

Literatura citada

ANSYS Inc. (2024). ANSYS Fluent Theory Guide (Release 2025 R2). ANSYS Documentation. https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent

Baldwin, S. F. (1987). Biomass stoves: Engineering design, development and dissemination. VITA Publications.

Barbour, R., El Kafafy, M., Gadsden, S. A., & Alvarado, J. L. (2019). Development and analysis of three wood-burning biomass rocket cookstoves with air injection. Energy for Sustainable Development, 52, 77-89. https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.05.006

Bryden, M., Still, D., Scott, P., Hoffa, G., Olson, R., & Barnett, S. (2006). Design principles for wood burning cook stoves. Aprovecho Research Center.

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., & Freitas, C. J. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. Journal of Fluids Engineering, 130(7), 078001. https://doi.org/10.1115/1.2960953

Clark, M. L., Peel, J. L., Balakrishnan, K., Breysse, P. N., Chillrud, S. N., Naeher, L. P., ... & McCracken, J. P. (2013). Health and household air pollution from solid fuel use: The need for improved exposure assessment. Environmental Health Perspectives, 121(10), 1120-1128. https://doi.org/10.1289/ehp.1206429

Hassan Ali, & Terence Tang Jia Wei. (2016). CFD study of an improved biomass cookstove with reduced indoor air pollution. Journal of Clean Energy Technologies, 4(6), 410-414. https://doi.org/10.18178/jocet.2016.4.6.310

Hellsten, A. (1998). Some improvements in Menter's k-ω SST turbulence model. AIAA Paper 98-2554. https://doi.org/10.2514/6.1998-2554

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2002). Fundamentals of heat and mass transfer (5th ed.). John Wiley & Sons.

Jetter, J., & Kariher, P. (2009). Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions. Biomass and Bioenergy, 33(2), 294-305. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.05.014

Li, X., Chen, Y., & Wang, P. (2023). Further development of Eddy Dissipation Model for turbulent non-premixed combustion simulation. Energies, 16(13), 5043. https://doi.org/10.3390/en16135043

MacCarty, N., & Bryden, K. M. (2016). Modeling the effects of operating conditions on cookstove performance. Energy for Sustainable Development, 34, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.04.001

Magnussen, B. F., & Hjertager, B. H. (1976). On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. Symposium (International) on Combustion, 16(1), 719-729. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(76)80366-4

Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal, 32(8), 1598-1605. https://doi.org/10.2514/3.12149

Menter, F. R., Kuntz, M., & Langtry, R. (2003). Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. Turbulence, Heat and Mass Transfer, 4, 625-632.

MR-CFD. (2025). Conjugate heat transfer simulation: Complete CHT guide. MR-CFD. https://www.mr-cfd.com/conjugate-heat-transfer-cht-simulation/

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2024). Household air pollution and health. OMS Fact Sheets. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health

Pratiti, R., Sahu, S., & Tiwari, A. (2020). Health effects of household air pollution related to biomass cook stoves in resource limited countries and its mitigation by improved cookstoves. Environmental Research, 186, 109549. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109549

Ravi, M. R., Kohli, S., & Arora, P. (2012). CFD simulation of heat transfer, pyrolysis, combustion and fluid flow in a simple sawdust stove. Energy for Sustainable Development, 16(4), 469-478. https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.08.002

Smith, K. R., & Pillarisetti, A. (2017). Household air pollution from solid cookfuels and its effects on health. In R. Etzel (Ed.), The international encyclopedia of public health (2nd ed., pp. 133-142). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803678-5.00517-0

Still, D., MacCarty, N., Ogle, D., Bond, T., & Bryden, M. (2011). Test results of cook stove performance. Partnership for Clean Indoor Air. http://www.pciaonline.org/files/Test-Results-Cookstove-Performance.pdf

Sutar, K. B., Kohli, S., & Ravi, M. R. (2015). Biomass cookstoves: A review of technical aspects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 1128-1166. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.054

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method (2nd ed.). Pearson Education.

Wilcox, D. C. (2006). Turbulence modeling for CFD (3rd ed.). DCW Industries.

Winiarski, L. (1982). Design principles for wood burning cook stoves. Aprovecho Research Center.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MICROTERRAZAS PARA EL CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN LA FINCA LA FLORIDA (Gigante, Huila, Colombia)

Mabel Yulexy Matta Nieto[1], John Jairo Arévalo Hernández[1], Miguel Ángel Díaz Herrera[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Las microterrazas constituyen una práctica de conservación de suelos, que viene siendo utilizada en zonas de montaña para el establecimiento del cultivo de café, debido a su capacidad para disminuir la erosión hídrica y mejorar las condiciones operativas del sistema productivo. Además de reducir la pérdida de suelo, facilitan la ejecución de labores culturales y favorecen la incorporación de procesos semimecanizados. En este estudio se realizó una caracterización integral del predio mediante un levantamiento topográfico detallado y un análisis de los atributos del suelo, con el propósito de determinar su aptitud para el diseño e implementación de las microterrazas. Con base en esta información, se diseñaron microterrazas tipo banco de aproximadamente 1 m de ancho, siguiendo las curvas de nivel definidas mediante GPS y agronivel tipo A. La construcción se efectuó con una motoazada modelo B173 de 7 HP equipada con arado de vertedera, garantizando un adecuado conformado de los bancos. Posteriormente, se estableció el cultivo de café en la parte media de la pendiente, considerando la inclinación del terreno y la distancia entre bancos para definir las dimensiones de las terrazas. Los resultados evidenciaron que el diseño y la construcción de las microterrazas se adaptaron satisfactoriamente a las condiciones topográficas del sitio, mejorando la accesibilidad y la eficiencia en la ejecución de las labores agrícolas. Se recomienda desarrollar evaluaciones de largo plazo para cuantificar su efecto sobre el control de la erosión, el crecimiento y productividad del café, y la viabilidad de prácticas semimecanizadas orientadas a fortalecer la sostenibilidad de los sistemas cafeteros de montaña.

***Palabras clave*:** Agricultura en Ladera, Caficultura, Mecanización Agrícola, Microterrazas.

Abstract

Bench terraces are a soil conservation practice used in mountainous areas for the establishment of coffee crops due to their ability to reduce water erosion and improve the operational conditions of the production system. In addition to reducing soil loss, they facilitate the implementation of agronomic practices, promoting the incorporation of semi-mechanized operations. In this study, a comprehensive site characterization was carried out through a detailed topographic survey and an analysis of soil attributes to determine land suitability for the design and implementation of bench terraces. Based on this information, bench terraces approximately 1 m wide were designed following contour lines established using a GPS and an A-frame level.

[1]Engineering Faculty, Surcolombiana University, Avenida Pastrana Borrero, Carrera 1, Neiva, Huila, Colombia john.arevalo@usco.edu.co; (J.J.A.-H.); Tel.: +57-322-8971474 (J.J.A.-H.).

Construction was performed using a B173 walk-behind tractor with a 7 HP engine equipped with a moldboard plow, ensuring the proper formation of the terrace benches. Subsequently, the coffee crop was established on the mid-slope, considering the terrain gradient and the distance between benches to define the terrace dimensions. The results showed that the design and construction of the bench terraces were successfully adapted to the site's topographic conditions, improving accessibility and the efficiency of agricultural operations. Long-term evaluations are recommended to quantify the effects of bench terraces on erosion control, coffee growth and productivity, and the feasibility of semi-mechanized practices aimed at strengthening the sustainability of mountain coffee production systems.

Keywords: Hillside agriculture, Coffee cultivation, Agricultural mechanization, Microterraces.

Introducción

La caficultura constituye uno de los pilares de la economía, la cultura y desarrollo rural en Colombia, destacándose a nivel mundial por la calidad de su café (Villamil Mendoza & García-Muñoz Aparicio, 2023). En el país este tipo de cultivos se desarrolla principalmente en laderas ubicadas mayormente en la cordillera de los Andes, caracterizada por su sistema montañoso y sus pendientes pronunciadas (Ocampo., 2017). Estas condiciones, aunque favorecen la producción de cafés de alta calidad, representan importantes limitaciones para la mecanización de las labores agrícolas, haciendo que se genere una alta dependencia de trabajo manual, incrementando los costos de producción (Velez Zape et al., 1999).

En este contexto, la caficultura en Colombia, específicamente la de montaña, enfrenta diversas problemáticas de carácter agronómico, ambiental y socioeconómico. Entre ellas se destacan la erosión del suelo, la escorrentía superficial (Hincapié-Gómez et al., 2011), las dificultades en el acceso y tránsito dentro del cultivo, así como el aumento de la escasez de mano de obra (Mauricio et al., 2024), variedad en la densidad de siembra según la pendiente del terreno (Rendon & Jaramillo-Jiménez 2021). Estas condiciones han motivado la búsqueda de diferentes alternativas que permitan mejorar las condiciones productivas y facilitar los procesos de mecanización adaptados a terrenos que tienen pendientes pronunciadas (Sanz-Uribe, 2024).

Diversos estudios han abordado estas problemáticas desde diferentes enfoques. En cuanto a la conservación de suelos, investigaciones recientes (Do et al. 2023) evidencian que la implementación de prácticas agroforestales con siembra en contornos ayuda a la formación de terrazas naturales y reduce la pérdida de sedimentos y nutrientes en suelos inclinados. De la misma manera, Villatoro et al. (2015) demuestran en Costa Rica, que las terrazas contribuyen a disminuir la escorrentía y la erosión en cultivos de café en condiciones tropicales.

Por otra parte, en cuanto a la mecanización agrícola, Brasil ha sido uno de los pioneros en la mecanización de trabajos en caficultura de montaña (Romano et al., 2025). Se destaca el estado de Minas Gerais, específicamente en el municipio de *Ouro Fino*, evaluando el desempeño de diferentes métodos de cosecha: manual, semimecanizado y mecanizado en terrazas. Los resultados mostraron un incremento significativo en la eficiencia operativa y en el rendimiento del método mecanizado, evidenciando que las terrazas permiten la utilización de maquinaria en zonas tradicionalmente inaccesibles (De Oliveira Tavares et al., 2019).

En términos económicos, Alves et al. (2017) presentan en su investigación realizada en el municipio de *São Paulo,* que la implementación de microterrazas, aunque implica una inversión inicial considerable, resulta viable y rentable a mediano y largo plazo, debido a la mejora en cuanto a la eficiencia de las labores agrícolas y la reducción de costos operativos.

Adicionalmente, en el ámbito del diseño de terrazas agrícolas, se han desarrollado herramientas tecnológicas para su dimensionamiento bajo condiciones específicas, como la ilustrada por Alves et al. (2020) que realizó el dimensionamiento de terrazas agrícolas para caña de azúcar en Brasil, con datos específicos de la zona, utilizando el software Terraço 4.1 desarrollado por el Grupo de Pesquisa en Recursos Hídricos (GPRH) de la Universidad Federal de Viçosa.

Por otro lado, la implementación de microterrazas se sustenta en principios de bioingeniería, entendida como la aplicación de soluciones técnicas que combinan elementos físicos y biológicos para estabilizar el terreno y mejorar su funcionalidad (Romero et al., 2009). Estas estructuras modifican la pendiente natural del terreno mediante la generación de superficies escalonadas o semiplanas (Liechti, 2020), lo que permite disminuir la velocidad del flujo superficial de agua, reducir la energía erosiva de la lluvia y favorecer la infiltración hídrica en el perfil del suelo (Pizarro et al., 2003).

En términos generales, las terrazas agrícolas corresponden a la estructura de mayor dimensión construidas en terrenos con pendientes para el control de erosión y adecuación del área para el establecimiento del cultivo (Ulcuango, 2023). Por su parte, las microterrazas son una variante de menor escala, diseñadas principalmente para facilitar el tránsito de personas, animales o pequeñas máquinas autopropulsadas (Koolhaas, 2013).

Existen diversos tipos de terrazas agrícolas cuyo diseño depende de factores como la pendiente, el clima y el tipo de cultivo (Bouwman & Langdon, 1984). Entre estas se encuentran terrazas de banco, terrazas en contorno y terrazas paralelas (Sergieieva, 2026). En particular, bajo las condiciones del estudio, las terrazas de banco se destacan por su aplicación en zonas de pendientes pronunciadas, ya que consisten en la conformación de plataformas escalonadas mediante corte y conservando en una parte la pendiente (Martinez Menes et al., 2009), generando superficies estables que facilitan tanto el establecimiento del cultivo como la ejecución de las labores culturales, mejorando las condiciones para la mecanización y tránsito dentro del cultivo.

Asimismo, se integran criterios de diseño geométrico y planificación del uso de suelo, los cuales son fundamentales para la funcionalidad del sistema propuesto. El diseño geométrico de las microterrazas considera variables como el ancho de las terrazas, la altura del talud, la distancia entre surcos, las pendientes longitudinales y transversales (Bouwman & Langdon, 1984). Paralelamente, la planificación del uso del suelo permite organizar espacialmente el cultivo de café, las zonas de tránsito y el manejo del mismo (Romano et al., 2025a).

A pesar de estos avances, existe un vacío importante en la aplicación de estas técnicas en el contexto colombiano, especialmente en lo relativo al diseño, la adaptación y la implementación de sistemas de microterrazas para la caficultura en ladera. La mayoría de estudios que se han desarrollado en otros países o bajo condiciones específicas que no necesariamente corresponden a las características topográficas, climáticas y socioeconómicas de las regiones cafeteras en Colombia.

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo diseñar y construir un sistema de microterrazas para el establecimiento del cultivo de café (Coffea arabica L.) en zonas de ladera, utilizando una motoazada como alternativa de mecanización ligera?

Con base en este interrogante, el objetivo general de la investigación fue diseñar y construir un sistema de microterrazas para el cultivo de café en zonas de ladera, incorporando el uso de mecanización ligera como estrategia para la conservación del suelo y el mejoramiento de las condiciones operativas del sistema productivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en un lote de la finca La Florida, ubicada en el municipio de Gigante, departamento del Huila, Colombia (Figura 1), localizado en las coordenadas 445639,58 m E y 258425,00 m N, a una altitud aproximada de 1593 m, bajo el sistema de referencia espacial WGS 84 / UTM Zona 18 N.

La caracterización del área de estudio inició con un levantamiento topográfico detallado utilizando una estación total Nikon DTM-322, con una precisión de ±(3 mm + 2 ppm), facilitada por el Laboratorio de Topografía de la Universidad Surcolombiana. Debido a las condiciones de relieve quebrado del terreno, el levantamiento se realizó mediante el Método de Poligonación, garantizando el cubrimiento total del área de estudio. El punto de partida fue previamente georreferenciado mediante un receptor GPS Garmin GPSMAP 64s. En total se registraron 247 puntos topográficos, cuyas coordenadas fueron referidas al sistema de proyección.

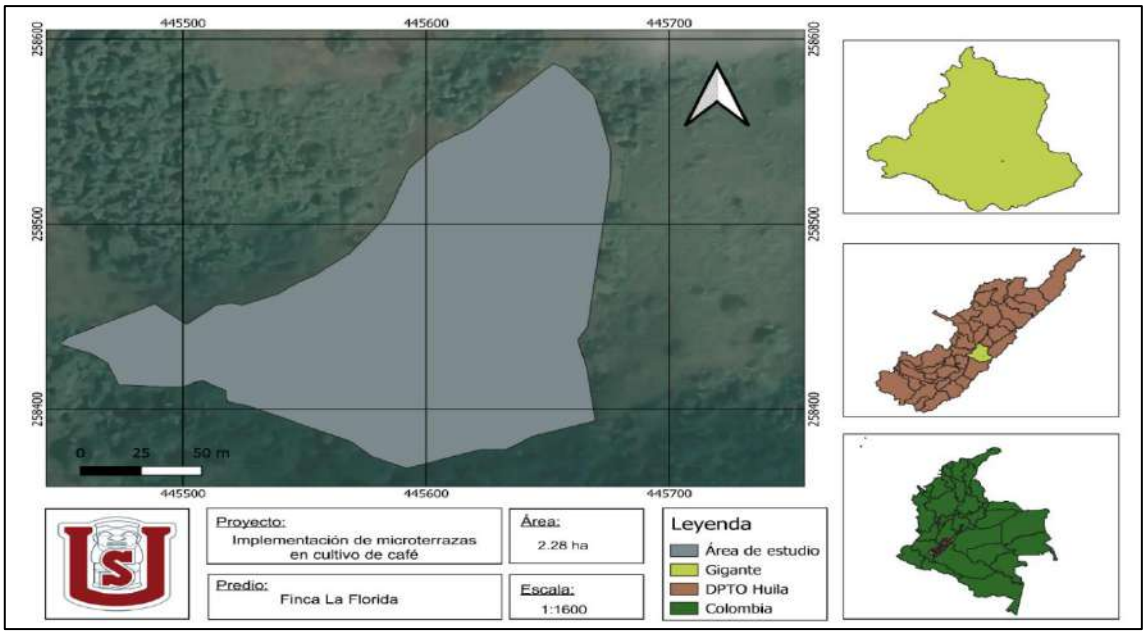


Figura 1. Localización del área de estudio en el municipio de Gigante, Huila, Colombia.

La información obtenida fue procesada en el software QGIS para generar el modelo de representación espacial del terreno, correspondiente a un área aproximada de 2,28 ha. A partir de este modelo se elaboraron las curvas de nivel y el mapa de pendientes, los cuales permitieron analizar las características topográficas del predio e identificar las áreas con mayor aptitud para la implementación del proyecto.

Con base en este análisis, se seleccionó el área de intervención y se definió el sector con mejores condiciones para el establecimiento del cultivo. El diseño experimental estuvo conformado por dos unidades experimentales de aproximadamente 0,5 ha cada una. La primera se destinó al establecimiento del cultivo de café mediante un sistema de microterrazas, mientras que la segunda se manejó bajo un sistema convencional de siembra. Ambas unidades se ubicaron en sectores adyacentes con características topográficas y edáficas similares, con el propósito de facilitar el seguimiento del desarrollo del cultivo y la comparación del desempeño de ambos sistemas de manejo.

Criterios y parámetros para el diseño de microterrazas

El diseño propuesto para la conformación de las microterrazas se fundamentó en la implementación de terrazas tipo banco, tomando como referencia, la guía del manual para prácticas de conservación del suelo por la FAO (1984) y adaptando el diseño bajo las condiciones del terreno. Este tipo de terrazas de huerto permite conservar parcialmente la pendiente natural del terreno, combinándola con un corte controlado que conforma el denominado banco. Dicho espacio estará destinado a facilitar el tránsito del personal y el paso de maquinaria liviana utilizada en las labores agrícolas. La siembra del cultivo se proyecta en la parte media de la pendiente, buscando un equilibrio entre la estabilidad del terreno y condiciones adecuadas para el desarrollo radicular de la planta.

Para calcular la distancia entre terrazas, se utilizaron expresiones geométricas básicas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) a partir de la pendiente promedio del terreno, previamente obtenida mediante el software QGis y expresada en porcentajes. En este sentido se realiza la conversión de la pendiente expresada en porcentaje a su equivalente en grados, con el fin de facilitar los cálculos asociados al diseño.

$$\emptyset = tan^{-1}\left(\frac{pendiente(\%)}{100}\right) \quad (1)$$

Donde:$\emptyset$ ángulo natural de la pendiente natural del terreno y Pendiente (%): Inclinación del terreno expresada en porcentaje. Posteriormente, se determinó la altura del talud (AT) en metros a partir de la relación geométrica existente entre el ángulo de la pendiente y el ancho del banco (AB) en metros. La aplicación de esta expresión se justifica debido a que la sección transversal de las microterrazas puede representarse como un triángulo rectángulo, donde la altura de talud corresponde al cateto opuesto y el ancho del banco al cateto adyacente. Por esta razón, se empleó la función tangente para establecer la relación entre estas variables y el ángulo de pendiente natural del terreno, tal como se presenta en la ecuación 2.

$$AT = \tan(\theta) * AB \quad (2)$$

Asimismo, el ancho del banco corresponde a una variable de diseño definida de acuerdo con las necesidades operativas del sistema productivo, ya que este espacio funcionará como una zona de tránsito.

La Figura 2 presenta un esquema de las principales dimensiones consideradas en el diseño geométrico de las microterrazas, incluyendo la altura del talud (AT), el ancho del banco (AB) y el ángulo de la pendiente ($\emptyset$) . Este esquema permite visualizar la representación geométrica utilizada como fundamento para la aplicación de las relaciones trigonométricas empleadas en el diseño.

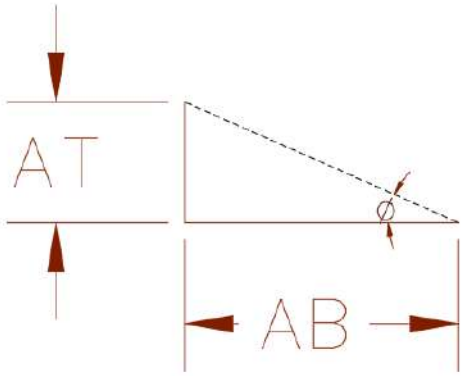


Figura 2. Esquema de las variables geométricas utilizadas en el diseño de las microterrazas

Cabe recalcar que la distancia entre el inicio de una microterraza y la siguiente se estableció tomando como referencia la distancia entre bancos definida por el cultivo, medida sobre la pendiente natural del terreno. Finalmente, con ayuda del programa Civil 3D y de acuerdo con las curvas de nivel presentes en el terreno, se desarrolló la distribución de las microterrazas para luego realizar su conformación en terreno.

Con el propósito de caracterizar los atributos físicos y químicos del suelo, se recolectaron muestras disturbadas e inalteradas, previamente georreferenciadas, distribuidas a lo largo del área de estudio. Las muestras disturbadas fueron utilizadas para la determinación de las propiedades químicas y granulométricas del suelo, mientras que las muestras inalteradas se destinaron a la evaluación de aquellas propiedades físicas que requieren conservar la estructura natural del suelo.

Las propiedades físicas evaluadas incluyeron la textura, determinada mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos, a partir de la cual se calcularon las fracciones de arena, limo y arcilla. Asimismo, se determinaron otros atributos físicos complementarios, como la densidad aparente, densidad real y porosidad total, siguiendo los procedimientos establecidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y las Normas Técnicas Colombianas (NTC), cuando fue aplicable.

La caracterización química comprendió la determinación de variables asociadas con la fertilidad y el comportamiento químico del suelo, entre ellas pH (relación suelo 1:1) mediante potenciometría, conductividad eléctrica (CE) por conductimetría, carbono orgánico total (COT) mediante el método de Walkley y Black, nitrógeno total (N) mediante el método Kjeldahl, fósforo disponible por el método Bray II, capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), acidez intercambiable (Al^{3+} + H^{+}) mediante titulación, y las bases intercambiables (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} y Na^{+}), determinadas mediante extracción con acetato de amonio 1 N (pH 7,0). El calcio y el magnesio fueron cuantificados mediante espectrofotometría de absorción atómica, mientras que el potasio y el sodio se determinaron por fotometría de llama. Adicionalmente, se evaluaron las concentraciones de azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn) y boro (B), utilizando los métodos analíticos recomendados para estudios de fertilidad de suelos en Colombia. A partir de estos resultados se calcularon la saturación de bases, la saturación de aluminio y las principales relaciones catiónicas (Ca/Mg, Mg/K, Ca/K y (Ca+Mg)/K), empleadas como indicadores complementarios del estado nutricional del suelo.

Todos los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Geoagroambiente (LABGAA) de la Universidad Surcolombiana, siguiendo los protocolos establecidos en las Normas Técnicas Colombianas (NTC), los procedimientos analíticos del IGAC y las metodologías de referencia para laboratorios de análisis de suelos.

Finalmente, los resultados obtenidos fueron integrados y procesados mediante el software QGIS para generar mapas temáticos de distribución espacial de cada atributo del suelo. Posteriormente, la información fue incorporada al aplicativo SIASCAFÉ de Cenicafé (https://agroclima.cenicafe.org/siascafe) un Sistema de Interpretación de Análisis de Suelos para Café, con el fin de evaluar el estado de fertilidad del suelo y establecer recomendaciones de manejo nutricional acordes con los requerimientos del cultivo de café.

Procedimiento constructivo y uso de mecanización ligera

La adecuación del terreno inició con la limpieza del lote mediante la remoción de malezas, residuos vegetales y especies no deseadas, con el fin de facilitar el trazado y la construcción de las microterrazas.

El trazado se realizó utilizando como referencia el diseño previamente elaborado en Autodesk Civil 3D,(https://www.autodesk.com/mx/search?qt=Civil%203D%20gratis&sn=es_MX&us_op=dotcom) cuyos puntos fueron cargados en un receptor GPS Garmin GPSMAP 64s. Debido a las limitaciones de cobertura satelital presentes en el área de estudio, se estableció un punto de control georreferenciado, a partir del cual el trazado de las curvas de nivel se efectuó mediante un agronivel tipo A construido y calibrado en campo (Figura 3a). Con base en este punto de referencia se delimitaron las líneas guía de las microterrazas, verificando periódicamente su posición con el GPS cuando las condiciones de recepción lo permitieron. El espaciamiento entre terrazas se estableció en aproximadamente 2,5 m, medidos sobre la superficie de la pendiente. Las líneas de trabajo fueron demarcadas mediante estacas y cal para garantizar su correcta alineación durante la conformación.



Figura 3. Trazado de líneas a nivel para la implementación de microterrazas(a) y uso de la Motoazada B173 (b)

Las microterrazas se construyeron con una motoazada B173 de 7 HP equipada con un arado de vertedera (Figura 3b), realizando el corte, remoción y conformación progresiva del suelo hasta obtener bancos de aproximadamente 1 m de ancho. La operación inició en la parte superior de la pendiente y avanzó hacia los sectores inferiores. Cada terraza se conformó mediante tres pasadas consecutivas de la motoazada: la primera efectuó el corte inicial del terreno, la segunda amplió el perfil y conformó parcialmente el talud, y la tercera permitió alcanzar las dimensiones establecidas en el diseño. El acabado final de los bancos se realizó manualmente con azadón

para corregir irregularidades del perfil. Durante la operación se efectuó la limpieza periódica del sistema de tracción de la motoazada para retirar el material vegetal acumulado y garantizar su funcionamiento continuo. De esa forma, se marcaron las líneas guía de las microterrazas mediante el uso de estacas y cal, asegurando una correcta alineación y continuidad del trazado. Estas líneas servirán como referencia para el paso de la motoazada, que será la maquinaria encargada de la conformación inicial de cada microterraza.

La construcción fue realizada por dos operarios. Uno dirigió el desplazamiento del equipo siguiendo el trazado previamente demarcado, mientras el segundo operó la motoazada, alternando funciones durante la jornada para reducir el esfuerzo físico y mantener la continuidad de las labores. El rendimiento operativo del equipo se determinó a partir de la relación entre la longitud efectiva de trabajo y el tiempo empleado en la construcción de cada tramo de microterraza.

Para el tratamiento convencional, la siembra se estableció mediante el sistema tradicional, utilizando un punto de referencia central para el trazado de los surcos. Se adoptó un espaciamiento de 1,80 m entre surcos y 1,00 m entre plantas, realizando los hoyos de siembra de forma manual.

En el tratamiento con microterrazas, la siembra se efectuó sobre los bancos construidos, empleando un espaciamiento de 2,50 m entre terrazas y 0,70 m entre plantas, ubicadas en la parte media del banco. En ambos tratamientos se aplicó cal agrícola en cada hoyo de siembra, de acuerdo con los resultados del análisis de fertilidad, con el propósito de corregir la acidez del suelo, reducir la toxicidad por aluminio y favorecer la disponibilidad de nutrientes para el establecimiento del cultivo. Todas las labores de siembra se realizaron manualmente.

Resultados y Discusión

Caracterización topográfica del área de estudio

La Figura 4 presenta la planimetría, altimetría y distribución espacial de la pendiente del área de estudio, información que constituyó la base para el diseño y trazado de las microterrazas. El terreno evaluado comprende aproximadamente 2,2 ha, con curvas de nivel generadas a intervalos de 1 m y una altitud comprendida entre 1700 y 1723 m s. n. m. La distribución de las curvas de nivel evidencia un relieve irregular, con sectores de pendiente moderada a fuerte, donde la menor separación entre curvas indica un incremento en la inclinación del terreno.

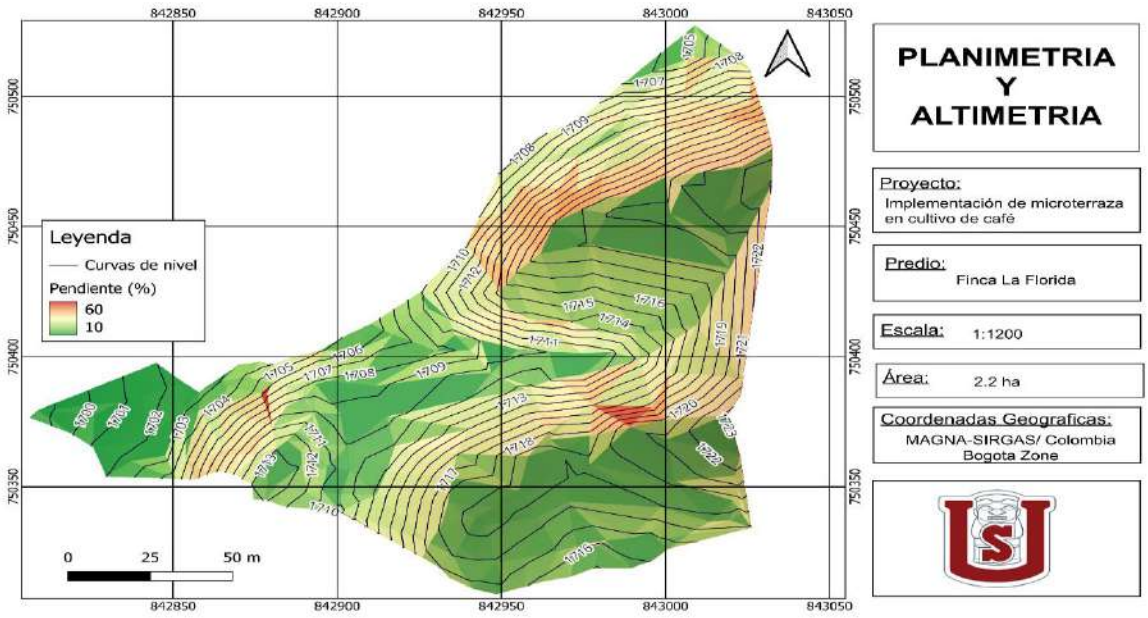


Figura 4. Planimetría, altimetría y distribución de pendientes del lote General, ubicado en la finca La Florida, Gigante, Huila

El análisis de pendientes mostró el predominio de valores entre 40 % y 60 %, representados en tonalidades naranja y roja, lo que evidencia una alta susceptibilidad a procesos de erosión hídrica y pérdida de suelo, especialmente durante periodos de elevada precipitación, tal como ha sido reportado por Acosta et al. (2024). En contraste, las áreas con pendientes inferiores al 10 %, representadas en color verde, corresponden a sectores de mayor estabilidad topográfica. De esa forma, se observa en la Figura 5 dos unidades experimentales seleccionadas para el establecimiento del cultivo bajo manejo convencional y mediante microterrazas. Ambas presentaron condiciones topográficas similares, con pendientes que varían entre el 10 al 60% , que permitió minimizar la influencia de la variabilidad del relieve en la comparación entre tratamientos. El área destinada a las microterrazas (Figura 5b), con una superficie aproximada de 0,600 ha, fue seleccionada por presentar una pendiente más uniforme y continua, con valores entre 10 % y 45 %, mientras que al norte del lote (Figura 5b) la pendiente superó, esta condición favoreció el diseño y la construcción de las estructuras de conservación. Por su parte, el lote bajo manejo convencional (Figura 5a) abarcó 0,582 ha y presentó pendientes de entre 10 % y 35 %. La proximidad entre ambas unidades experimentales y la similitud de sus condiciones topográficas permitieron establecer una base adecuada para evaluar el efecto de las microterrazas sobre el establecimiento y desarrollo del cultivo de café.

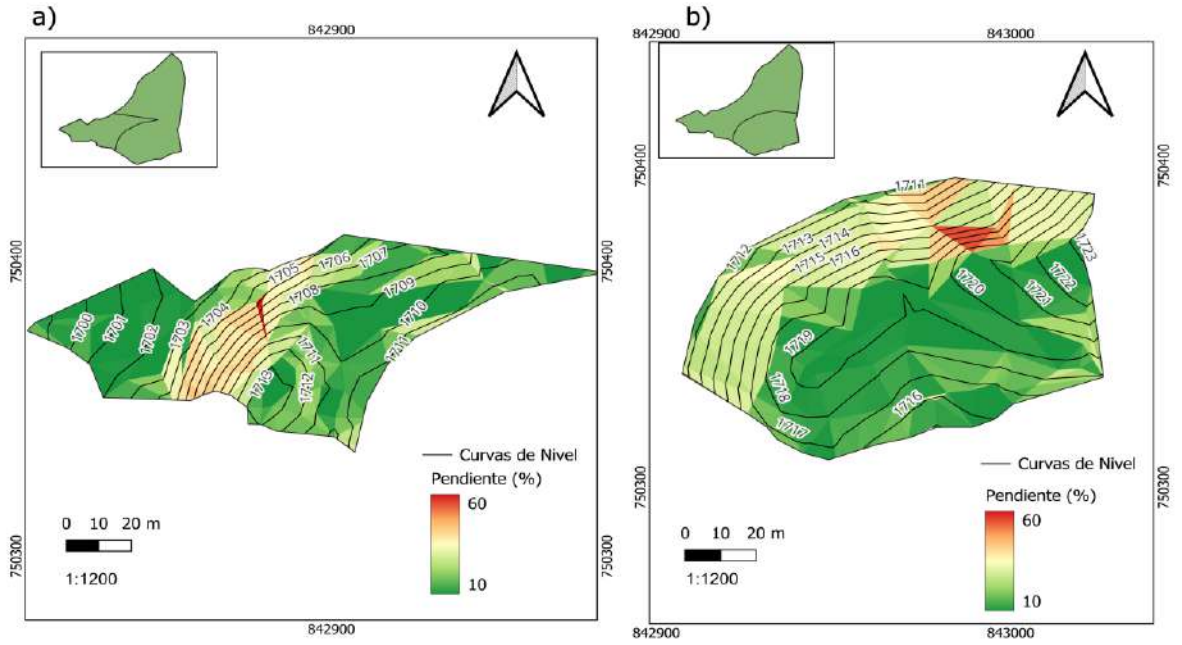


Figura 5. Altimetría y distribución de pendientes de las áreas seleccionadas para los tratamientos evaluados: (a) área bajo manejo convencional y (b) área con implementación de microterrazas.

Caracterización edáfica del área de estudio

Los atributos físicos y químicos del suelo se observan en la Tabla 1, donde se presentan los valores promedio, mínimos y máximos, así como los coeficientes de variación de las propiedades químicas del suelo evaluadas en el área de estudio. Adicionalmente, en la Figura 6 se muestra la interpretación de algunas propiedades químicas según el sistema para interpretación de análisis de suelo de café propuesto por Cenicafé, con el fin de identificar posibles limitaciones para el cultivo.

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de las propiedades químicas del suelo en el área de estudio.

Propiedad	Unidad	Promedio	Min	Max	CV(%)
pH		4,90	4,62	5,23	3,52
Conductividad Eléctrica (CE)	dS/m	0,05	0,03	0,07	24,43
Capacidad de Intercambio Cationico (CIC)	cmol/kg	29,32	18,91	45,88	27,02
Acidez Intercambiable (Al)	cmol/kg	3,90	2,03	5,51	26,42
Saturación de bases (SB)	%	8,26	5,60	10,76	23,08
Carbono Organico Total (COT)	%(g COT /100 g suelo	3,71	1,85	6,13	44,57
Nitrógeno (N)	%	0,35	0,18	0,58	44,33
Calcio (Ca)	cmol/kg	0,26	0,16	0,61	50,50

Magnesio (Mg)	cmol/kg	0,28	0,09	0,56	55,61
Potasio (K)	cmol/kg	0,46	0,20	1,00	61,15
Sodio (Na)	cmol/kg	1,42	0,96	2,28	35,91
Fosforo (P)	mg/kg	3,11	1,83	5,98	45,99
Azufre (S)	mg/kg	5,26	0,88	15,18	83,14
Hierro (Fe)	mg/kg	142,53	269,54	41,97	42,69
Manganeso (Mn)	mg/kg	30,72	2,90	49,25	45,70
Cobre (Cu)	mg/kg	0,93	0,10	2,14	75,75
Zinc (Zn)	mg/kg	3,99	1,73	6,78	38,03
Boro (B)	mg/kg	0,43	0,01	1,01	69,84
Textura	Arena (%)	57,6	47	69	10,86
	Arcilla (%)	29,9	21	37	18,28
	Limo(%)	13,5	10	17	18,22

Figura 6. Interpretación de algunas propiedades químicas del suelo según el sistema de análisis de suelos para café de Cenicafé.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia
Centro Nacional de Investigaciones de Café
CENICAFÉ

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia

Sistema para la Interpretación de Análisis de Suelos de café © FNC-Cenicafé

Departamento:	Huila	Lote:	Lote Experimental	Fecha de muestreo:	2025-09-30
Municipio:	Gigante	Etapa/Edad del cultivo:	Crecimiento - 6 meses	Fecha de análisis:	2026-05-18
Código:		Densidad de siembra:	5714 árboles/ha	Fecha de reporte:	2026-05-18
Nombre Finca:	La Florida	Nivel de sombra:	0 %	Código muestra:	031
Solicitante:	Mabel Matta				

Determinación	Método	Resultado	Rango adecuado	Interpretación
				Muy Bajo / Bajo / Medio / Alto / Muy alto
pH	Potenciométrico en agua 1:1	4,90	Entre 5,00 y 5,50	
Materia orgánica	Walkley-Black - Colorimétrico	7,20 %	Mayor que 8,00	
Fósforo (P)	Bray II - Colorimétrico	3,11 mg/kg	Mayor que 30,00	
Potasio (K)	Acetato de amonio - Absorción atómica	0,46 cmol+/kg	Mayor que 0,40	
Magnesio (Mg)	Acetato de amonio - Absorción atómica	0,28 cmol+/kg	Mayor que 0,90	
Calcio (Ca)	Acetato de amonio - Absorción atómica	0,26 cmol+/kg	Mayor que 3,00	
Azufre (S)	Fosfato de calcio - Turbidimétrico	5,26 mg/kg	Mayor que 12,00	
Aluminio (Al)	Yuan - Absorción atómica	3,56 cmol+/kg	Menor que 1,00	
Textura	Al tacto	Franco-Arcillo-Arenoso		

Fuente : (*SIASCAFE - Agroclima*, s. f.)

En cuanto al pH, de acuerdo con la Tabla 3, está por debajo de las consideraciones de Cenicafé, lo que sugiere que el suelo es fuertemente ácido; valor que, según Sadeghian et al. (2025), se clasifica por debajo del rango adecuado para el cultivo de café. Esta condición favorece la solubilidad del aluminio, lo que podría frenar a futuro el crecimiento de las raíces. Por otro lado, al presentar valores de conductividad eléctrica menores a 1 dS/m se logra inferir que el suelo no llega a ser salino (Sadeghian et al., 2018).

En cuanto a los macronutrientes primarios, encontramos que el contenido de fósforo es muy bajo; esto se debe a que el suelo llega a ser muy ácido (Sadeghian et al., 2018). Por otra parte, el potasio se ubicó dentro de los rangos adecuados según Cenicafé. Para el caso de los macronutrientes secundarios, el magnesio y el calcio se encontraron por debajo del rango

adecuado. Esto debe estar relacionado con procesos de lixiviación que son característicos de suelos tropicales ácidos altamente meteorizados (Sadeghian Khalajabadi et al., n.d.).

En relación con los micronutrientes, el hierro y manganeso presentaron concentraciones elevadas, comportamiento característico de suelos fuertemente ácidos debido al incremento de su solubilidad. El zinc y el cobre mostraron niveles aceptables para el cultivo.

Diseño geométrico y criterios técnicos de las microterrazas para el cultivo de café

El diseño geométrico de las microterrazas, se definió a partir de las siguientes situaciones: 1. el análisis topográfico del área de estudio, el cual registró una pendiente promedio de 24,2° (Figura 7); y 2. Aproximadamente la misma densidad del tratamiento testigo, de 5.556 plantas/ha, el cuál se encuentra dentro del rango típico de densidades en la zona del experimento (entre 5.556 plantas/ha y 6.667 plantas/ha); con disposición de plantas de 1,8 m entre lineas y 1,0 m sobre la misma línea, para el tratamiento testigo; y de 2,5 m entre lineas y 0,7 m entre plantas sobre la misma linea, para el tratamiento en microterrazas, que arroja una densidad aproximada de 5.714 plantas/ha para este último. Con base en esta información se establecieron las dimensiones de las estructuras, buscando garantizar su estabilidad y funcionalidad para el establecimiento del cultivo de café.

La Figura 7a presenta el esquema geométrico empleado para el dimensionamiento de las microterrazas, en el que se consideran el ancho del banco, la altura del talud, el ángulo de la pendiente y la distancia entre terrazas. Por su parte, la Figura 7b muestra las dimensiones finales adoptadas: un ancho de banco de 1,0 m, una distancia entre terrazas de 2,5 m medida sobre la pendiente (2,28 m en proyección horizontal) y una altura de talud de 0,44 m. Estas dimensiones permitieron adaptar las microterrazas a las condiciones del terreno, proporcionando una superficie estable para el establecimiento del cultivo y favoreciendo la conservación de la estabilidad de los bancos.

Para el diseño de las microterrazas se definió un ancho de banco cercano a 1 m, con el fin de facilitar el tránsito de maquinaria liviana y permitir el desarrollo de labores agrícolas dentro del cultivo. Asimismo, se estableció una distancia de 2,5 m sobre la pendiente y horizontalmente de 2,28 m, valor que resultó consistente con las condiciones del terreno, reduciendo alteraciones excesivas de la morfología natural del suelo. De igual manera, esta configuración permitió conservar un área cultivable adecuada, debido a que la distancia entre surcos se mantuvo cercana a la utilizada tradicionalmente en el cultivo de café.

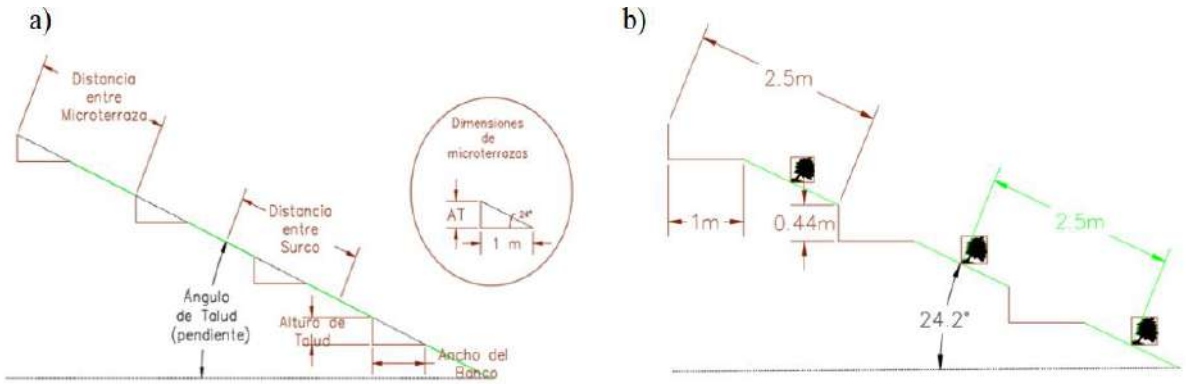


Figura 8. Esquema geométrico empleado para el dimensionamiento de las microterrazas en el cultivo de café. (a) Esquema General (b) Esquema detallado

Construcción de microterrazas: proceso, limitaciones, y consideraciones operativas

La implementación de las microterrazas permitió adaptar el sistema de cultivo a las condiciones de pendiente del lote experimental. Durante el proceso constructivo se identificaron limitaciones asociadas a la variabilidad del relieve, las características físicas del suelo y el desempeño operativo de la maquinaria, factores que influyeron en la geometría final de las estructuras.

La distribución final de las microterrazas se presenta en la Figura 9. En total se construyeron 20 microterrazas, cuyas longitudes variaron entre 52 y 211 m, en respuesta a las condiciones topográficas del terreno. Las terrazas de mayor longitud se localizaron en sectores con pendientes más uniformes, favoreciendo la continuidad de las estructuras y un mejor control de la escorrentía superficial, lo que contribuye a disminuir la pérdida de suelo por erosión hídrica, en concordancia con lo reportado por Njiru et al. (2022). En contraste, las zonas con cambios abruptos de pendiente y mayor curvatura del relieve requirieron terrazas de menor longitud para mantener su estabilidad y ajustarse a la configuración del terreno.

El lote bajo manejo convencional presentó un área aproximada de 0,582 ha con una cantidad de 3.233 plantas, mientras que el lote con microterrazas ocupó 0,600 ha con cantidad de 3.426 plantas, un 16 a 15% por debajo de la densidad de siembra que recomienda (Rendon & Jaramillo-Jiménez 2021) para el cultivo de café a plena exposición en zonas de alta pendiente. A pesar de las diferencias en el área y la distribución espacial del cultivo, se buscó que la población de plantas fuese similar entre ambos sistemas, para permitir la evaluación posterior en cuanto a desarrollo de cultivos y labores culturales. Además, la conformación de las microterrazas aprovechó el espacio entre surcos, por lo que la adecuación del terreno no redujo significativamente el área efectiva destinada al cultivo.

Como complemento al sistema de conservación se construyó un carreteable de aproximadamente 1 m de ancho, diseñado para interceptar las 20 microterrazas y comunicar los diferentes niveles del lote experimental. Esta infraestructura mejora la accesibilidad y constituye un elemento estratégico para la futura incorporación de labores semimecanizadas en el cultivo de café.

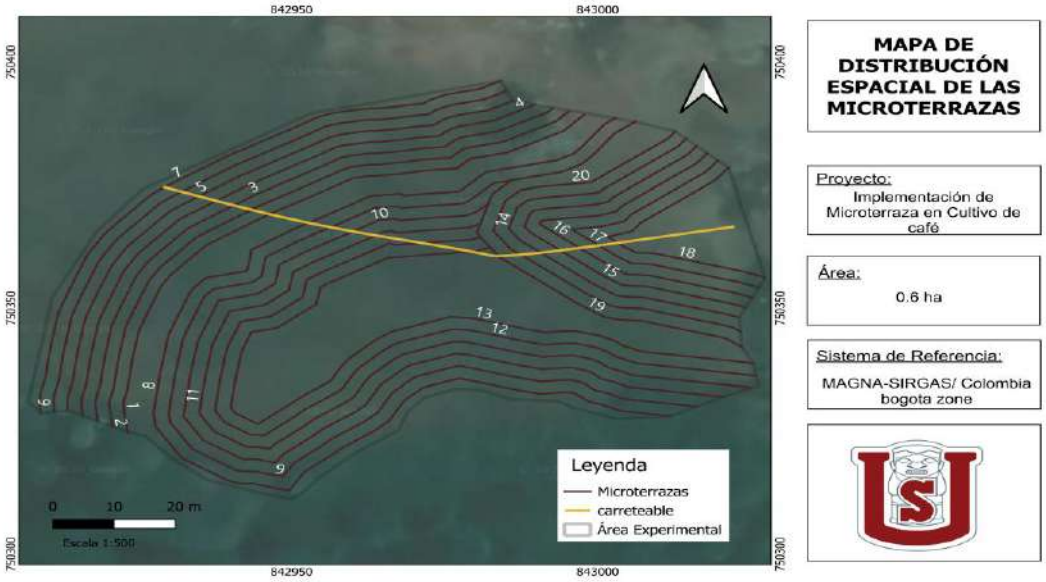


Figura 9. Distribución Espacial de las Micro-terrazas y sus Longitudes

Desde el punto de vista operativo, la motoazada alcanzó una velocidad promedio de 30 m min^{-1} en cada pasada; sin embargo, la conformación de cada microterraza requirió tres pasadas consecutivas, por lo que el rendimiento efectivo de construcción fue cercano a 10 m min^{-1}. Aunque este procedimiento incrementó el tiempo de ejecución, permitió obtener bancos con dimensiones uniformes y una adecuada estabilidad estructural, condiciones fundamentales para el establecimiento del cultivo y el funcionamiento de las microterrazas como práctica de conservación del suelo.

Las propiedades físicas del suelo también influyeron en el desempeño operativo de la motoazada durante la construcción de las microterrazas. El suelo, clasificado como franco arcillo arenoso, presentó un comportamiento diferente según su contenido de humedad. En condiciones secas, la maquinaria mantuvo un desplazamiento estable y una adecuada capacidad de corte. Sin embargo, después de eventos de precipitación, el incremento de la plasticidad y cohesión del suelo favoreció la adhesión de material a los componentes del implemento, reduciendo la capacidad de tracción y dificultando el mantenimiento uniforme de la profundidad de trabajo. Estas condiciones hicieron necesaria la limpieza periódica de la motoazada para garantizar la continuidad de las labores. En total, la construcción de las 20 microterrazas requirió aproximadamente 10 días de trabajo.

La Figura 10 muestra la comparación entre el lote con microterrazas y el sistema convencional, evidenciando diferencias en la conformación superficial del terreno y en la distribución espacial del cultivo. Mientras el manejo convencional conserva la pendiente natural, la implementación de microterrazas generó superficies de trabajo más estables y continuas, favoreciendo la accesibilidad para las labores agrícolas y creando condiciones más adecuadas para la futura incorporación de prácticas semimecanizadas. Estas modificaciones representan una ventaja desde el punto de vista operativo y constituyen un elemento clave para mejorar el manejo del cultivo (Deng *et al.,* 2021)y reducir el riesgo de erosión en sistemas cafeteros establecidos sobre terrenos de alta pendiente.

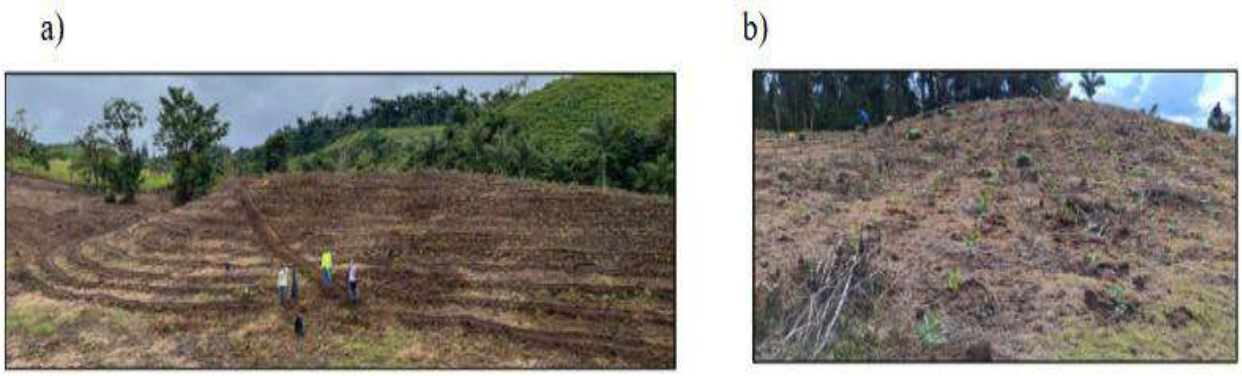


Figura 10. Resultado y comparación de los sistemas de establecimiento del cultivo de café: a) lote con microterrazas; b) lote convencional

CONCLUSIONES

La implementación de microterrazas constituyó una alternativa viable para el establecimiento del cultivo de café en terrenos de ladera, al mejorar la organización espacial del cultivo y generar condiciones más favorables para la ejecución de las labores agrícolas.

El diseño de las microterrazas estuvo condicionado por la variabilidad topográfica del terreno, lo que hizo necesario adaptar su geometría a las condiciones de pendiente. No obstante, las estructuras se integraron adecuadamente al sistema de cultivo sin reducir de manera

significativa el área efectiva de siembra. Asimismo, la incorporación de un carreteable mejoró la conectividad entre las terrazas y fortaleció el potencial para la futura implementación de labores semimecanizadas.

La construcción mediante una motoazada demostró ser una alternativa técnicamente factible para la conformación de microterrazas en zonas de montaña, reduciendo el esfuerzo físico requerido en comparación con procedimientos completamente manuales. Sin embargo, su rendimiento estuvo influenciado por la pendiente y por las condiciones de humedad del suelo, factores que afectaron la operación y eficiencia del equipo.

Las microterrazas representan una práctica con potencial para favorecer la conservación del suelo al modificar la longitud efectiva de la pendiente y promover una mayor infiltración del agua. No obstante, se requieren evaluaciones de largo plazo que permitan cuantificar su efecto sobre la reducción de la erosión, el crecimiento y la productividad del cultivo, así como su contribución a la sostenibilidad de los sistemas cafeteros de montaña.

Literatura Citada

Acosta, R., Luján, L., & Trujillo, T. (2024). *Evaluación de las condiciones de degradación de suelos en una ladera afectada por erosión hídrica, municipio de la Plata, Colombia"*. https://doi.org/10.15446/rcdg.v34n1supl.106825

Alves, Ednaldo Lino, et al. «Potencial econômico da utilização de micro-terraceamento em lavouras de café: um estudo de caso». Revista IPecege, vol. 3, n.o 1, febrero de 2017, pp. 24-38. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.22167/r.ipecege.2017.1.24 .

CENICAFE. (2002). RIESGO A LA EROSION EN SUELOS DE LADERA EN LA ZONA CAFETERA (Avance técnico No. 400). Centro Nacioanal de Investigaciones de Café

Deng, Chuxiong: Zhang Guangle; Liu Yaojun; Nie Xiaodong; Li Zhongwu; Liu Junyu; Zhu Damei «Advantages and Disadvantages of Terracing: A Comprehensive Review». International Soil and Water Conservation Research, vol. 9, n.o 3, septiembre de 2021, pp. 344-59. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.002.

Do, Van Hung, et al. «Agroforestry with Contour Planting of Grass Contributes to Terrace Formation and Conservation of Soil and Nutrients on Sloping Land». Agriculture, Ecosystems & Environment, vol. 345, abril de 2023, p. 108323. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108323.

Hincapié-Gómez, E., Luis, & Salazar-Gutiérrez, F. (2011). Impacto de la erosión sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y la producción de café. In Cenicafé (Vol. 62, Number 2).

Hugo, V., Builes, R., Álvaro, ;, Robledo, J., Jaime, ;, & Pulgarín, A. (2013). *Factores climáticos*. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_10

KOOLHAAS, M. (2013). SISTEMA DE TERRAZAS. *Fagro*.

Liechti, K., & Rodewald, R. (2020). Towards a framework for long-term conservation of terraced landscapes in Switzerland: Case studies of recultivated former vineyard and crop terraces. *Pirineos*, *175*. https://doi.org/10.3989/PIRINEOS.2020.175002

Martinez Menes, M., Rubio Ganado, E., & Palacio Esponasa, C. (2009). *"SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN" Subsecretaría de Desarrollo Rural Dirección General de Apoyos Para el Desarrollo Rural Terrazas*.

Mauricio, A., Ruiz, P., Manuel, J., & Quisoboni, P. (2024). *Modalidad Investigación Nivel Profesional Autores*.

Njiru, E., Baaru, M., & Gachene, C. (2022). [EVALUACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y NUTRIENTES EN LA PENDIENTE DE LA TERRAZA DE SUELOS DUROS EN EL ESTE SEMIÁRIDO DE KENIA]. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 25(3). https://doi.org/10.56369/TSAES.4337

NTC 5264: 2023. Calidad del suelo. Determinación del PH – Cenicaña. https://www.cenicana.org/ntc-5264-2023-calidad-del-suelo-determinacion-del-ph/. Accedido 12 de enero de 2026

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1984). Manual para prácticas de conservación de suelos: Proyecto de Desarrollo Rural Integral, Quito - Ecuador. FAO.

Ocampo López, Olga Lucía, et al. «Caracterización de los ecotopos cafeteros colombianos en el Triángulo del Café». *Perspectiva Geográfica*, vol. 22, n.º 1, mayo de 2017. *DOI.org (Crossref)*, https://doi.org/10.19053/01233769.6100.

Pizarro, R., Sanguesa, C., Bravo, C., Farías, C., Soto, M., & Flores, P. (2003). *Sociedad EIAS Ltda MANUAL DE CONSERVACIÓN DE AGUAS Y SUELOS INSTRUCTIVO Nº2: TERRAZAS AGRÍCOLAS Y FORESTALES 1. Introducción*.

Rendón, José Raúl, y Alexander Jaramillo-Jiménez. «Densidades de siembra en sistemas de producción de café a libre exposición solar en el departamento del Huila». Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila: Vol. 2. 2015-2021., editado por Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, 2021, pp. 70-95. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.38141/10791/0008_3.

Romano, A. P. A. M., Braga, G. B., Mattiello, E. M., Moura, A. D. de, Almeida, K. M., & Reis, J. D. dos. (2025). Mapeamento de áreas para o cultivo de café em terraços em Minas Gerais – Brasil. *Research, Society and Development*, *14*(12). https://doi.org/10.33448/rsd-v14i12.50251

Romero, M., Santamaría, D., & Zafra, C. (2009). BIOINGENIERÍA Y SUELO: ABUNDANCIA MICROBIOLÓGICA, pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA BAJO TRES ESTRATOS DE EROSIÓN. *Umbrall Científico*, (15).

Sadeghian, S., Diaz, V., Rey, J. C., Alarcón, Ví., & Lince-Salazar, L. A. (2018). *Fertilidad del suelo y manejo de la nutrición*.

Sadeghian, S., Lince-Salazar, L. A., Medina-Rivera, R., & Imbachí, L. C. (2025). Caracterización de la fertilidad de los suelos de la zona cafetera de Colombia. In

Caracterización de la fertilidad de los suelos de la zona cafetera de Colombia. Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook-0060

Sadeghian Khalajabadi, S., González Osorio, H., & Arias Suárez, E. (n.d.). *Lixiviación de nutrientes en suelos de la zona cafetera Prácticas que ayudan a reducirla*.

Sanz-Uribe, J. R. (2024). Innovación en el campo: cómo la mecanización transforma la producción de café. Memorias Seminario Científico Cenicafé, 75(1), e751002. https://doi.org/10.38141/10795/751002-1

«SIASCAFE». Agroclima, https://agroclima.cenicafe.org/siascafe. Accedido 12 de enero de 2026.

SIPRA. (s. f.). https://sipra.upra.gov.co/nacional

Tavares, Tiago De Oliveira, et al. «The Times, Movements and Operational Efficiency of Mechanized Coffee Harvesting in Sloped Areas». PLOS ONE, editado por Abel Chemura, vol. 14, n.o 5, mayo de 2019, p. e0217286. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217286.

Ulcuango, J. (2023). Diseño e implementación de terrazas hortícolas con fines de conservación de suelos en la zona alta de la estación experimental Tunshi. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo* , *1*(3), 1–45. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/19629

Velez Zape, J. C., Montoya, E. C., & Oliveros Tascón, C. E. (1999). Estudio de tiempos y movimientos para el mejoramiento de la cosecha manual del café. *Boletín Técnico Cenicafé*, *21*. https://doi.org/10.38141/10781/021

Villamil Mendoza, L., & García-Muñoz Aparicio, C. (2023). Impactos socioeconómicos de la producción de café en Colombia. *Revista Científica de La UCSA*, *10*(2), 43–54. https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2023.010.02.043

Villatoro-Sánchez, Mario, et al. «Temporal Dynamics of Runoff and Soil Loss on a Plot Scale under a Coffee Plantation on Steep Soil (Ultisol), Costa Rica». Journal of Hydrology, vol. 523, abril de 2015, pp. 409-26. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.058.

Modelo físico-matemático con inteligencia artificial para optimizar el uso de agua en parcelas agrícolas

Marlio Bedoya Cardoso[1], Jorge Eliecer Martínez Gaitán[2], Irlesa Indira Sánchez Medina[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La programación eficiente del riego exige integrar la demanda atmosférica, el estado hídrico del suelo y las características del cultivo en decisiones oportunas. El objetivo de este estudio fue desarrollar y evaluar, mediante simulación reproducible, un modelo físico-matemático con inteligencia artificial para estimar dosis de riego en parcelas agrícolas. Se simularon 12 parcelas durante 120 días, para un total de 1,440 observaciones diarias con variables climáticas, edáficas, fenológicas e hidráulicas. La evapotranspiración de referencia se calculó con Hargreaves-Samani, la evapotranspiración del cultivo mediante el enfoque Kc-ET_0 y la dosis de referencia a partir de un balance hídrico de la zona radicular. Posteriormente se entrenaron una regresión Ridge y una red neuronal artificial multicapa de arquitectura 16-64-32-1. La red neuronal obtuvo MAE = 0.1376 mm, RMSE = 0.3087 mm y R^2 = 0.9897, mientras Ridge alcanzó MAE = 1.5579 mm, RMSE = 2.0081 mm y R^2 = 0.5651. La estrategia basada en inteligencia artificial aplicó 2,369.55 mm de agua acumulada, valor cercano a la referencia físico-matemática de 2,340.67 mm y 56.42 % inferior a la estrategia convencional de 5,437.74 mm. Los resultados respaldan la viabilidad de un enfoque híbrido, transparente y reproducible; sin embargo, constituyen una prueba de concepto in silico que requiere calibración y validación con sensores, suelos, cultivos y rendimientos reales.

Palabras clave: agricultura sostenible, balance hídrico, evapotranspiración, programación del riego, redes neuronales, uso eficiente del agua.

Abstract

Efficient irrigation scheduling requires the integration of atmospheric demand, soil water status, and crop characteristics into timely decisions. This study aimed to develop and evaluate, through reproducible simulation, a physically based artificial intelligence model for estimating irrigation depths in agricultural plots. Twelve plots were simulated over 120 days, generating 1,440 daily observations with climatic, edaphic, phenological, and hydraulic variables. Reference evapotranspiration was calculated using the Hargreaves-Samani equation, crop evapotranspiration through the Kc-ET_0 approach, and the reference irrigation depth from a root-zone water balance. A Ridge regression model and a 16-64-32-1 multilayer artificial neural network were then trained. The neural network achieved MAE = 0.1376 mm, RMSE = 0.3087 mm, and R^2 = 0.9897, whereas Ridge obtained MAE = 1.5579 mm, RMSE = 2.0081 mm, and R^2 = 0.5651. The AI-based strategy applied 2,369.55 mm of accumulated water, close to the physical-mathematical reference of 2,340.67 mm and 56.42% below the conventional strategy of 5,437.74 mm. The findings support the feasibility of a transparent and reproducible hybrid approach; nevertheless, they represent an in silico proof of concept requiring calibration and validation with real sensors, soils, crops, and yield data.

[1]Universidad Surcolombiana. marlio.bedoya@usco.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8866-9830;
[2]Universidad de Santander. jorgeeliecer.martinez@usco.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1454-4087, irlesa.sanchez@mail.udes.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8840-0708

Keywords: artificial intelligence, crop evapotranspiration, irrigation scheduling, neural networks, soil-water balance, water-use efficiency.

Introducción

La gestión del agua en la agricultura es un componente crítico de la seguridad alimentaria y de la sostenibilidad ambiental. A escala global, el sector agrícola concentra aproximadamente 69 % de las extracciones de agua dulce en el planeta, lo que incrementa la necesidad de mejorar la productividad hídrica y reducir aplicaciones innecesarias, especialmente en escenarios de variabilidad climática y competencia entre usos (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], s. f.; UNESCO World Water Assessment Programme [UNESCO WWAP], 2024).

La programación convencional del riego suele apoyarse en calendarios fijos, dosis uniformes o experiencia local. Aunque estas prácticas pueden ser operativamente simples, no siempre representan la interacción diaria entre precipitación, evapotranspiración, humedad disponible, textura del suelo, etapa fenológica y eficiencia del sistema. El enfoque FAO-56 ofrece una base estandarizada para calcular la evapotranspiración de referencia y del cultivo, mientras que métodos basados en temperatura y radiación, como Hargreaves-Samani, permiten trabajar cuando la información meteorológica es limitada (Allen et al., 1998; Hargreaves & Samani, 1985; Pereira et al., 2015; Bedoya et al., 2024).

Los modelos de balance hídrico aportan trazabilidad porque expresan las entradas, salidas y límites de almacenamiento de la zona radicular. AquaCrop y otros modelos de respuesta del cultivo al agua demuestran que la representación explícita de procesos edáficos y fisiológicos es esencial para interpretar el déficit hídrico y diseñar estrategias de manejo (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009).

La inteligencia artificial amplía estas capacidades al aprender relaciones multivariadas y no lineales entre clima, suelo, cultivo y riego. Las revisiones especializadas reportan un uso creciente de redes neuronales artificiales, aprendizaje automático y sensores para la gestión de riego y la estimación de evapotranspiración (Alvim et al., 2022; Amani & Shafizadeh-Moghadam, 2023; Bedoya et al., 2024). No obstante, un modelo con alto desempeño estadístico puede generar decisiones agronómicamente inconsistentes si se entrena sin restricciones físicas o sin una referencia técnica interpretable.

A partir de esta problemática se formuló la pregunta: ¿cómo integrar un balance hídrico físico-matemático y modelos de inteligencia artificial para estimar dosis de riego eficientes, reproducibles y comprensibles? El objetivo fue desarrollar y evaluar una arquitectura híbrida que generara una dosis de referencia mediante principios agronómicos, entrenara modelos Ridge y una red neuronal artificial multicapas, y comparara la aplicación acumulada de agua frente a una estrategia convencional. La hipótesis estableció que una red neuronal entrenada con etiquetas derivadas del balance hídrico podría aproximar la regla física con menor error que una línea base lineal y conservar una aplicación de agua cercana a la referencia.

Materiales y Métodos

Se desarrolló una investigación cuantitativa de modelación aplicada. La unidad de análisis fue el registro diario de una parcela virtual durante un ciclo de 120 días. Se simularon 12 parcelas, para un total de 1,440 observaciones. El estudio no involucró participantes humanos, animales ni datos personales; su propósito fue evaluar la coherencia computacional de la arquitectura antes de una validación agronómica en campo.

El procedimiento se organizó en cinco componentes: generación del escenario agroclimático,

cálculo de evapotranspiración y lluvia efectiva, actualización del balance hídrico, entrenamiento de los modelos de inteligencia artificial y comparación de estrategias de riego. La arquitectura funcional se presenta en la Figura 1.

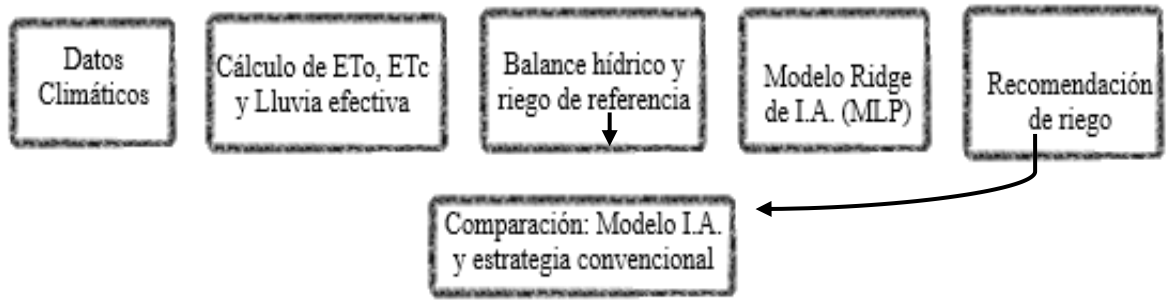


Figura 1. Arquitectura funcional del modelo híbrido para optimización del riego. *Fuente: elaboración propia.*

Diseño de la simulación

Cada registro incluyó temperatura mínima, máxima y media, humedad relativa, velocidad del viento, radiación extraterrestre aproximada, precipitación, coeficiente de cultivo, evapotranspiración de referencia, evapotranspiración del cultivo, lluvia efectiva, humedad disponible del suelo y dosis óptima de riego. Las trayectorias incorporaron variación diaria, diferencias entre parcelas y eventos de precipitación, evitando secuencias completamente deterministas.

Cuadro 1. Variables principales del sistema de modelación.

Variable	Unidad	Función en el modelo
Temperatura mínima, máxima y media	°C	Estimación de ET_0 y caracterización climática.
Humedad relativa	%	Contexto atmosférico y variabilidad climática.
Velocidad del viento	m s^{-1}	Entrada climática complementaria.
Radiación extraterrestre aproximada	mm $día^{-1}$ equivalente	Cálculo simplificado de ET_0.
Precipitación y lluvia efectiva	Mm	Entrada del balance hídrico.
Coeficiente de cultivo (Kc)	Adimensional	Conversión de ET_0 en ETc.
Humedad disponible del suelo	Mm	Estado hídrico de la zona radicular.
Textura, pendiente y cobertura	Índices	Variabilidad edáfica y operativa entre parcelas.
Riego óptimo	Mm	Variable objetivo generada por la regla física.

Fuente: elaboración propia.

Formulación físico-matemática

La evapotranspiración de referencia se estimó mediante Hargreaves-Samani (Ecuación 1), alternativa apropiada para escenarios con disponibilidad limitada de variables meteorológicas (Hargreaves & Samani, 1985). La evapotranspiración del cultivo se obtuvo con la ecuación 2, la cual emplea el enfoque Kc-ET_0 de FAO-56 (Allen et al., 1998):

$$ET_o = 0.023 * R_a * (T_{med} + 17.8) * \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (1)$$

$$ET_c = K_c * ET_o \quad 2)$$

Dónde: ET_o= Evapotranspiración de referencia; (mm/día); R_a= radiación extraterrestre (mm/día); T_{med}= temperatura media; T_{max}= temperatura máxima; T_{med}= temperatura mínima (grados Celsius); ET_c= Evapotranspiración del cultivo; K_c = Coeficiente de cultivo (Adimensional)

Por otra parte, la lluvia efectiva (mm) se representó mediante una función por tramos que reduce el aporte útil cuando la precipitación es elevada, con el fin de aproximar pérdidas por escorrentía y percolación, empleando la Ecuación 3 y 4:

$$P_e = 0.80P; si\ P \leq 25 \quad (3)$$

$$P_e = 20 + 0.4 * (P - 25); si\ P > 25 \quad (4)$$

Dónde: P_e= precipitación efectiva; (mm); P= Precipitación (mm).

El almacenamiento diario de agua en la zona radicular (Ecuación 5) se actualizó entre el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo. La dosis de riego (Ecuación 6) se activó cuando el estado proyectado descendía por debajo del umbral operativo:

$$S_t = \min(CC, \max(PMP, S_{t-1} + P_e + \eta \cdot \mathrm{I} - ET_c)) \quad (5)$$

$$P = {\max[0, umbral - S_t + P_e - ET_c]}/{\eta} \quad (6)$$

Dónde: S_t = Agua disponible en el suelo al final del día (mm); S_{t-1}= Agua disponible en el suelo al inicio del día (mm); CC= Capacidad de campo; PMP= Punto de marchitez permanente; η = Eficiencia de aplicación del agua (0.85); P = lámina de agua aplicada por riego (mm); umbral = Nivel de agua en el suelo que activa el riego (mm).

Por ejemplo, en el escenario base se fijaron CC = 120 mm, PMP = 45 mm, umbral de riego = 72 mm (64% humedad disponible) y eficiencia de aplicación η = 0.85. Estos parámetros permitieron verificar la arquitectura y no deben interpretarse como valores universales para todos los suelos o cultivos.

Modelos de inteligencia artificial

La variable objetivo fue la dosis de riego calculada por el módulo físico-matemático. Las 16 variables predictoras fueron estandarizadas y el conjunto se dividió en 75 % para entrenamiento y 25 % para prueba. Se comparó una regresión Ridge, seleccionada como línea base interpretable y regularizada, con una red neuronal artificial multicapa (MLP), elegida por su capacidad para modelar interacciones no lineales (Goodfellow et al., 2016; Hastie et al., 2009).

Cuadro 2. Modelos y función dentro de la arquitectura.

Componente	Configuración	Objetivo
Regresión Ridge	Modelo lineal con penalización L2.	Establecer una línea base interpretable y controlar colinealidad.
Red neuronal MLP	16-64-32-1; activación ReLU; optimizador Adam.	Aprender relaciones no lineales entre clima, suelo, cultivo y riego.
Simulación comparativa	Referencia física, predicción MLP y riego convencional.	Cuantificar cercanía al balance y ahorro potencial de agua.

Fuente: elaboración propia.

Se realizó la regresión Ridge aplicando la Ecuación 7, minimizando el error cuadrático más una penalización $\alpha\|\beta\|^2$. La red (MLP) utilizó dos capas ocultas de 64 y 32 neuronas con activación ReLU y una salida lineal. El entrenamiento se realizó con Adam, método de optimización adaptativa ampliamente utilizado en redes profundas (Kingma & Ba, 2015). Los modelos empleados en este trabajo fueron construidos en el programa Python.

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum \beta_j X_j \tag{7}$$

Evaluación de los modelos

El desempeño se evaluó mediante la ecuación 8 de error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) con la ecuación 9 y coeficiente de determinación (R^2) con la ecuación 10. Las métricas se complementaron con gráficos observado-predicho, residuales, mapas de calor y comparación acumulada del agua aplicada. El flujo se implementó en Python con NumPy, pandas, matplotlib y scikit-learn; este último proporciona implementaciones reproducibles de regresión, preprocesamiento y redes multicapa (Pedregosa et al., 2011).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |y_i - \hat{y}_i|}{\mathrm{n}} \tag{8}$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}}{n} \tag{9}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \tag{10}$$

Resultados y Discusión

Comportamiento hídrico del escenario simulado

El conjunto final estuvo compuesto por 1,440 observaciones. La temperatura media simulada fue 25.50 °C, la ET_0 media alcanzó 5.30 mm día^{-1} y la ETc media 4.44 mm día^{-1}. La humedad disponible del suelo presentó un promedio de 85.46 mm y el riego óptimo medio fue 1.63 mm día^{-1} como se muestra en la Cuadro 3.

Cuadro 3. Resumen descriptivo del experimento simulado.

Indicador	Valor	Interpretación
Observaciones	1,440	12 parcelas × 120 días.
ET_0 media	5.30 mm día^{-1}	Demanda atmosférica promedio.
ETc media	4.44 mm día^{-1}	Demanda hídrica del cultivo.
Humedad del suelo media	85.46 mm	Estado hídrico promedio.
Riego óptimo medio	1.63 mm día^{-1}	Dosis diaria de referencia.
Precipitación media	3.90 mm día^{-1}	Entrada climática promedio.

Fuente: elaboración propia a partir del conjunto simulado.

La Figura 2 las tres variables más importantes en la programación de riego, así mismo, se evidencia que ETc siguió la dinámica de ET_0 modulada por Kc. Indicando que al inicio y al final del siclo la Evaporación de referencia (ET_0) es mayor que la Evapotranspiración del cultivo (ETc) Por otra parte, las precipitaciones redujeron la necesidad de riego en días específicos, aunque no sustituyeron la reposición cuando el almacenamiento del suelo se aproximó al umbral.

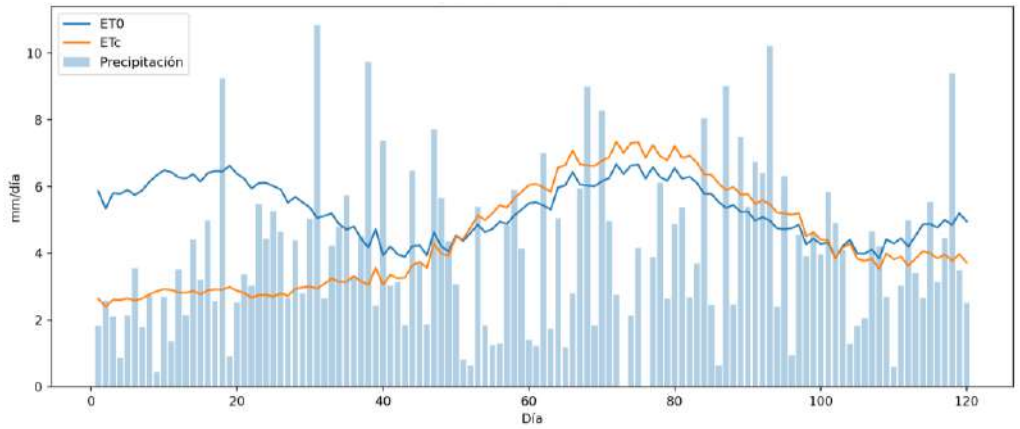


Figura 2. Comportamiento promedio de ET_0, ETc y precipitación durante el periodo simulado. Fuente: elaboración propia.

Desempeño predictivo

La regresión Ridge presentó un desempeño de MAE = 1.5579 mm, RMSE = 2.0081 mm y R^2 = 0.5651. Aunque su capacidad predictiva fue inferior a la del modelo de redes neuronales artificiales (MLP), funcionó como línea base interpretable y permitió identificar las variables con mayor contribución relativa sobre la dosis de riego. Los coeficientes estandarizados indicaron que la lluvia efectiva, la ETc, la precipitación total y la humedad del suelo fueron los predictores más influyentes (Cuadro 4); de igual forma, los signos obtenidos son coherentes con la lógica agronómica de cualquier cultivo, ya que la demanda hídrica del cultivo (ETc) incrementó la necesidad de riego, mientras que la lluvia efectiva y una mayor humedad del suelo tendieron a reducirla.

Cuadro 4. Principales coeficientes estandarizados de la regresión Ridge.

Variable	Coeficiente
Lluvia efectiva	-2.9892
ETc	2.2367
Precipitación	2.1064
Humedad del suelo	-1.2353
Coeficiente de cultivo (Kc)	-1.1389
Temperatura máxima	-0.7818
Radiación extraterrestre	-0.7660
Temperatura mínima	0.5462

Fuente: elaboración propia a partir del ajuste de la regresión Ridge.

Comparación de Modelos

La simulación de los modelos se estructuró en tres niveles complementarios: i) el modelo físico-matemático, que generó la dosis de referencia a partir de ET0, ETc, lluvia efectiva y balance hídrico; ii) la regresión Ridge, que reprodujo esa regla como una aproximación lineal regularizada; y iii) la red neuronal multicapas (MLP), que aprendió la relación no lineal completa entre clima, suelo, cultivo y riego. Esta secuencia permitió comparar la interpretación de un modelo lineal con la precisión de un modelo no lineal y, posteriormente, traducir ambas salidas a una simulación operativa de estrategias de riego.

La red neuronal multicapas (MLP) superó ampliamente a Ridge en las tres medidas de bondad de ajuste con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9897, un error cuadrático medio (RMSE) de 0.3087 mm y un error absoluto medio (MAE) de 0.1376 mm (Cuadro 5), lo cual indican que la MLP reprodujo con alta fidelidad la regla físico-matemática dentro del dominio simulado. Ridge fue de gran utilidad como referencia explicativa, pero su estructura lineal fue insuficiente para representar umbrales, interacciones y respuestas por tramos.

Cuadro 5. Desempeño de los modelos evaluados.

Modelo	MAE (mm)	RMSE (mm)	R^2
Regresión Ridge	1.5579	2.0081	0.5651
Red neuronal MLP	0.1376	0.3087	0.9897

Fuente: elaboración propia.

El desempeño superior de la red neuronal multicapas (MLP) refleja la naturaleza no lineal del problema. La activación del riego depende de umbrales y de la interacción entre múltiples entradas, por lo que una relación lineal regularizada no logra representar completamente los cambios abruptos entre ausencia de riego y reposición. Ridge, sin embargo, mantiene valor para auditar la dirección y magnitud de los coeficientes, mientras la MLP requiere validación, análisis de sensibilidad y vigilancia de extrapolaciones.

Por otra parte, se puede apreciar en la Figura 3, que la dispersión se concentró alrededor de la diagonal, con mayores diferencias en observaciones cercanas a cambios de estado hídrico. Esta respuesta es coherente con una variable objetivo que presenta numerosos valores próximos a cero y picos asociados con activaciones de riego.

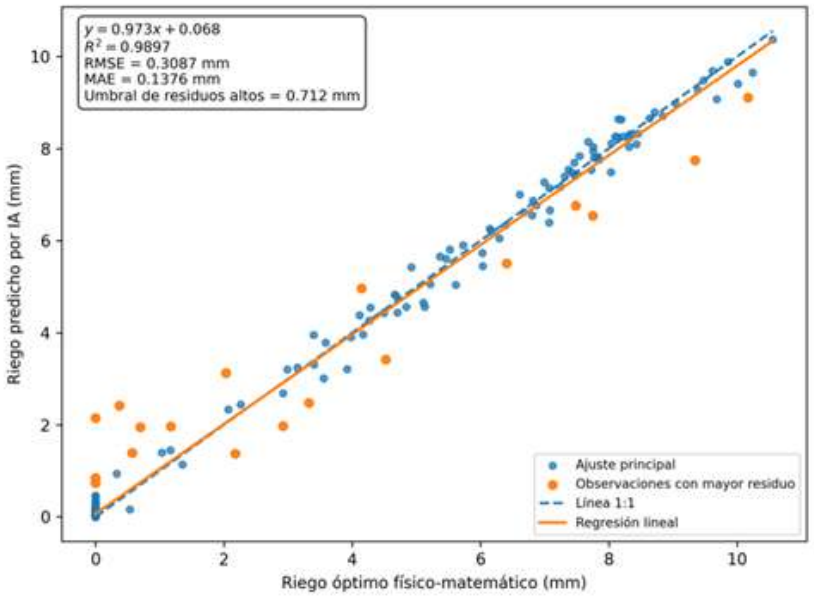


Figura 3. Relación entre riego físico-matemático y predicción de la red neuronal MLP. Fuente: elaboración propia.

Los resultados respaldan la integración de conocimiento físico e inteligencia artificial como una estrategia pertinente para la programación del riego. El balance hídrico conservó el papel de núcleo explicativo: definió la relación entre evapotranspiración, lluvia efectiva, almacenamiento y eficiencia de aplicación. La red neuronal actuó como emulador de esa regla, no como sustituto de los principios agronómicos. Esta complementariedad coincide con la necesidad de combinar modelos interpretables y herramientas de aprendizaje automático en la gestión agrícola del agua (Alvim et al., 2022; Amani & Shafizadeh-Moghadam, 2023).

Comparación de estrategias de riego

La estrategia basada en IA o red neuronal multicapa (MLP) aplicó 28.88 mm más que la referencia físico-matemática, una diferencia relativa de 1.23 %. Frente a la estrategia convencional, la reducción estimada fue 56.42 %. En este estudio, la estrategia convencional se definió como una aplicación equivalente a 1.15 × ETc, utilizada como referencia conservadora para simular una práctica de sobreriego moderado y comparar el potencial de ahorro del enfoque híbrido.

Cuadro 6. Agua total aplicada por estrategia.

Estrategia	Agua total (mm)	Interpretación
Físico-matemática	2,340.67	Referencia derivada del balance hídrico.
IA - red neuronal MLP	2,369.55	Predicción aprendida a partir de la referencia.
Convencional	5,437.74	Aplicación equivalente a 1.15 × ETc.

Fuente: elaboración propia.

La cercanía de 1.23 % entre la estrategia basada en IA con la red neuronal artificial (MLP) y la referencia sugiere que el modelo neuronal puede acelerar la recomendación cuando las variables de entrada están disponibles. El ahorro estimado de 56.42% frente a la programación convencional debe interpretarse con cautela, ya que depende de la regla convencional elegida, los parámetros de suelo, la distribución de lluvia y la eficiencia asumida. La literatura sobre riego deficitario y productividad del agua advierte que reducir aplicaciones solo es beneficioso cuando se mantiene el estado hídrico dentro de límites compatibles con el desarrollo del cultivo (Fereres & Soriano, 2007; FAO, 2012).

Conclusiones

El estudio permitió estructurar un modelo híbrido que integra evapotranspiración, lluvia efectiva, balance hídrico, regresión Ridge, red neuronal MLP y simulación comparativa para estimar dosis diarias de riego.

La red neuronal multicapas (MLP) obtuvo el mejor desempeño, con MAE = 0.1376 mm, RMSE = 0.3087 mm y R^2 = 0.9897. La regresión Ridge presentó menor capacidad predictiva, pero aportó una línea base interpretable para examinar la influencia de las variables.

La estrategia basada en IA con red neuronal multicapas (MLP), aplicó 2,369.55 mm, permaneció a 1.23 % de la referencia físico-matemática y redujo 56.42 % el volumen frente a la estrategia convencional definida en la simulación. Estos resultados muestran potencial para apoyar decisiones hídricas adaptativas, sin constituir todavía una estimación de ahorro validada en campo.

La contribución principal es una arquitectura reproducible y auditable en la que la inteligencia artificial aprende una regla agronómica explícita. Su adopción operativa requiere calibración local, sensores confiables, ensayos con cultivos reales, evaluación de productividad del agua, análisis económico y mecanismos de control ante predicciones inseguras.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Surcolombiana y a la Universidad de Santander por el respaldo académico e institucional a los procesos de investigación aplicada en inteligencia artificial, agricultura sostenible y gestión eficiente de los recursos hídricos.

Contribución de los autores

Jorge Eliecer Martínez Gaitán: conceptualización, diseño metodológico, modelación, análisis y redacción. Marlio Bedoya Cardoso: revisión técnica, interpretación agronómica y supervisión. Irlesa Indira Sánchez Medina: revisión metodológica, análisis crítico y edición. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Declaración de conflicto de intereses y disponibilidad de datos

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses. El estudio utilizó datos simulados y no involucró información personal. Para el sometimiento editorial definitivo, el conjunto de datos, el código de generación y los archivos de configuración deberán depositarse en un repositorio abierto con número de versión, licencia y documentación de ejecución.

Literatura Citada

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

Alvim, S. J. T., Guimarães, C. M., de Sousa, E. F., Garcia, R. F., & Marciano, C. R. (2022). Application of artificial intelligence for irrigation management: A systematic review. Engenharia Agrícola, 42, e20210159. https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42nepe20210159/2022

Amani, S., & Shafizadeh-Moghadam, H. (2023). A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-based data. Agricultural Water Management, 284, 108324. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108324

Bedoya-Cardoso, M., Martínez-Gaitán, J. E., & Sanabria Méndez, N. B. (2024). Evaluación comparativa de Métodos para evaluar la evapotranspiración en palma de aceite, mediante modelos clásicos y redes neuronales. En Libro de Actas del II Congreso Internacional USRA Ingeniería Agrícola y Carreras Afines (pp. 157-165). Eliva Press Global Ltd (part of Eliva Press S.R.L.). ISBN: 978-99993-2-189-1.

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany, 58(2), 147–159. https://doi.org/10.1093/jxb/erl165

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). Water use. AQUASTAT. https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use/

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2012). Crop yield response to water (FAO Irrigation and Drainage Paper 66). https://www.fao.org/4/i2800e/i2800e00.htm

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep learning. MIT Press. https://www.deeplearningbook.org/

Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1(2), 96–99. https://doi.org/10.13031/2013.26773

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7

Hsiao, T. C., Heng, L. K., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. Agronomy Journal, 101(3), 448–459. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s

Kingma, D. P., & Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. International Conference on Learning Representations. https://arxiv.org/abs/1412.6980

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 12, 2825–2830. https://www.jmlr.org/papers/v12/pedregosa11a.html

Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. Agricultural Water Management, 147, 4–20. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agronomy Journal, 101(3), 438–447. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 101(3), 426–437. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s

UNESCO World Water Assessment Programme. (2024). The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace. UNESCO. https://www.unesco.org/en/reports/wwdr/2024

Evaluación de la degradabilidad ruminal in situ de harina de *Nauphoeta cinerea* para su utilización como fuente alternativa de proteína en alimentación animal

Mauricio Cervantes Silva[1]; Laura Haydée Vallejo Hernández[2]; Noe Galindo Dorantes[3]; Carlos Enrique Álvarez Moreno[4].

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Los insectos representan una de las mayores biomasas del planeta Tierra y poseen un alto valor nutricional; sin embargo, su aprovechamiento en alimentación animal es limitado. Por lo cual el objetivo del trabajo fue determinar la degradabilidad in situ de la materia seca (MS) de harina de *Nauphoeta cinerea* (NC) y compararla con un sustrato testigo (rastrojo de maíz), para valorar su posible utilización en alimentación animal. El estudio se realizó en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, bajo normativas éticas vigentes. Las muestras se colocaron en sacos de nylon con tamaño de poro de 50 µm y se incubaron durante 72 h en una vaca Holstein con cánula ruminal. Se incluyó una medición a la hora cero para corregir la pérdida de fracciones solubles. La desaparición de MS se calculó mediante la diferencia entre el peso inicial de la muestra y el residuo posterior a la incubación, descontando el peso del saco vacío. La harina de NC presentó una degradabilidad de MS de 59.6 %, mientras que el maíz registró un valor corregido de 28.42 %. Estos resultados indican que la harina de cucaracha tuvo mayor desaparición ruminal de MS que el maíz, lo que sugiere un potencial fermentativo favorable. En conclusión, la harina de NC representa una alternativa alimenticia con potencial de uso en rumiantes, aunque se recomienda complementar su evaluación con estudios de cinética ruminal, degradabilidad proteica y respuesta productiva animal.

Palabras clave: harina de cucaracha, degradabilidad in situ.

Abstrac

Insects represent one of the largest biomasses on planet Earth and have a high nutritional value; however, their use in animal feed is limited. Therefore, the objective of the work was to determine the in situ degradability of the dry matter (DM) of Nauphoeta cinerea (NC) meal and compare it with a control substrate (corn stubble), to assess its possible use in animal feed. The study was carried out at the Postgraduate College, Montecillo Campus, under current ethical regulations. Samples were placed in nylon bags with a pore size of 50 µm and incubated for 72 h in a Holstein cow with a rumen cannula. A zero-hour measurement was included to correct for the loss of soluble fractions.

[1]PREGP-G, Colegio de Postgraduados, carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, CP: 56230, Texcoco, Estado de México, México.
[2, 3] DEIS en Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera. Federal México-Texcoco Km 38.5, El Cooperativo, CP: 56230, Texcoco, Estado de México, México.
[4]DIA, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera. Federal México-Texcoco Km 38.5, El Cooperativo, CP: 56230, Texcoco, Estado de México, México. cervantes.mauricio@colpos.mx; mvzvallejo@gmail.com; galindodn@gmail.com

The disappearance of DM was calculated by the difference between the initial weight of the sample and the residue after incubation, discounting the weight of the empty bag. NC flour had a DM degradability of 59.6 %, while corn registered a corrected value of 28.42 %. These results indicate that cockroach meal had greater rumen DM disappearance than maize, suggesting a favorable fermentative potential. In conclusion, NC meal represents a feed alternative with potential for use in ruminants, although it is recommended to complement its evaluation with studies of rumen kinetics, protein degradability and animal productive response.

Keywords: cockroach meal, in situ degradability.

Introducción

La alimentación representa uno de los principales costos en cualquier unidad pecuaria, ya que puede alcanzar entre 70 y 80 % de los costos de producción en sistemas estabulados (Núñez-Torres, 2017). El incremento constante en el precio de los insumos, particularmente de los ingredientes proteicos, constituye una preocupación para las unidades de producción animal en confinamiento. De acuerdo con Schultz (2019), la pasta de soya es la principal fuente de proteína utilizada en la industria de alimentos balanceados a nivel mundial. En México, durante 2020, se importaron 5 727 000 toneladas de pasta de soya destinadas a la alimentación animal, de las cuales 85.5 % provinieron de Estados Unidos y 13.5 % de Brasil (OPPORTIMES, 2021). Esta dependencia de ingredientes proteicos convencionales resalta la necesidad de buscar alternativas que puedan sustituirlos parcial o totalmente, con el propósito de reducir costos y diversificar las fuentes de nutrientes en la alimentación animal.

En México, la industria de alimentos balanceados utiliza fuentes de proteína de origen vegetal y animal. Las fuentes de origen animal suelen aportar minerales y aminoácidos esenciales en mayor proporción; sin embargo, su obtención requiere infraestructura especializada, lo que incrementa los costos de producción (Núñez-Torres, 2017). En contraste, la producción de insectos como fuente de proteína no convencional requiere menor espacio y puede generar una fuente alternativa de nutrientes con potencial para la alimentación animal (FAO, 2020). Además, los insectos representan una de las mayores biomasas sobre la Tierra y poseen un alto valor nutrimental; no obstante, su aprovechamiento en la alimentación animal aún es limitado. De acuerdo con la FAO (2014), la crianza de insectos para su uso como fuente de nutrientes presenta ventajas como alta eficiencia de conversión alimenticia, ciclo de vida corto y requerimientos reducidos de espacio de producción, características asociadas en parte a su condición poiquilotérmica. En este contexto, la cría de cucarachas representa una alternativa viable como fuente proteica, ya que algunas especies han mostrado contenidos de proteína cercanos a 70 % (Contreras et al., 2018; Pérez, 2019). Asimismo, la producción de insectos puede requerir menor cantidad de recursos y generar menor impacto ambiental para obtener una fuente concentrada de proteína en comparación con otros sistemas convencionales (FAO, 2020).

La harina de cucaracha de la especie Nauphoeta cinerea (NC) representa una fuente alimenticia no convencional con potencial de uso en la nutrición animal, principalmente por su aporte proteico ya que de acuerdo con Cervantes et al. (2024), la harina de NC contienen un 55.38 % de este nutriente. Sin embargo, antes de considerar su inclusión en dietas para rumiantes, es necesario conocer su comportamiento digestivo dentro del ambiente ruminal. La digestión en rumiantes es un proceso complejo, regulado por la interacción entre la composición de la dieta, la microbiota ruminal, las condiciones fisicoquímicas del rumen y la respuesta fisiológica del hospedero (Rosero y Posada, 2007). Por ello, la evaluación de ingredientes alternativos requiere

información sobre su degradabilidad de la materia seca, disponibilidad de nutrientes y posible aprovechamiento por el ecosistema ruminal.

Entre las metodologías utilizadas para evaluar la digestibilidad de los alimentos, la técnica de degradación ruminal in situ se ha consolidado como una de las más representativas, debido a que permite exponer directamente las muestras al ambiente fisiológico del rumen de animales vivos con cánula ruminal. Esta técnica, ampliamente difundida a partir de los trabajos de Ørskov y McDonald (1979), permite obtener estimaciones más cercanas a las condiciones reales del ecosistema ruminal en comparación con los ensayos in vitro. Su aplicación permite estudiar la desaparición de la materia seca y de otros nutrientes, así como generar información útil para valorar el potencial nutricional de ingredientes convencionales y no convencionales.

El procedimiento consiste en colocar pequeñas cantidades de alimento previamente molido dentro de sacos de nylon con tamaño de poro aproximado de 40 a 60 µm, los cuales se incuban en el rumen durante intervalos de tiempo definidos. Posteriormente, los sacos son retirados, lavados y secados para cuantificar la pérdida de materia seca o de nutrientes específicos. A partir de estos datos, es posible estimar la degradación ruminal y, cuando se incluyen varios tiempos de incubación, modelar fracciones como la soluble, la potencialmente degradable y la tasa de degradación (Nocek, 1988).

La principal ventaja de la técnica in situ radica en que reproduce de manera directa las condiciones del ambiente ruminal, incluyendo la actividad microbiana, la temperatura, el pH, la motilidad ruminal y la dinámica de fermentación. No obstante, esta metodología también presenta limitaciones, ya que requiere animales con cánula ruminal y puede presentar sesgos cuando se evalúan alimentos con alto contenido de fracciones solubles, partículas muy finas, almidones o lípidos, debido a que estos componentes pueden atravesar la malla de los sacos sin haber sido necesariamente degradados por la microbiota ruminal (Ceballos et al., 2008). Por ello, los resultados deben interpretarse considerando las características físicas y químicas del ingrediente evaluado. Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar la degradabilidad ruminal in situ de la materia seca de harina de cucaracha (Nauphoeta cinerea) y compararla con un sustrato testigo de rastrojo de maíz, con la finalidad de valorar su posible utilización en la alimentación animal.

Materiales y métodos

El trabajo se realizó en el módulo de vacas lecheras Holstein del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, así como en el Laboratorio de Microbiología Ruminal y Genética Microbiana del Programa de Ganadería de la misma institución. El manejo de los animales se realizó considerando los lineamientos establecidos en el Reglamento para el uso y cuidado de animales destinados a la investigación en el Colegio de Postgraduados (2016), así como las disposiciones de la NOM-062-ZOO-1999, referente a las especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de animales de laboratorio. Materiales: los materiales empleados se enlistan a continuación.

- Desecador,
- Balanza analítica (HR-60, 0.0001 a 60 g)
- Estufa de aire forzado
- Rafia
- Bolsas hechizas (sacos de nylon de 7.5 cm de ancho x 15 cm de largo y con un tamaño de poro de 50 µm de diámetro.)
- Charolas de plástico (5X5 cm)
- Cucharas de laboratorio

- Malla porta bolsas
- Gamarras para el manejo de los animales
- Vaca Holstein con cánula ruminal

Métodos

Se evaluaron dos sustratos: rastrojo de maíz, utilizado como testigo, y harina de cucaracha (Nauphoeta cinerea, HC), considerada como ingrediente alternativo para la evaluación de la degradabilidad ruminal in situ. Ambos materiales fueron procesados en un molino Thomas-Willey (Laboratory Mill, Model 4, Philadelphia) con una criba de 2.0 mm, con la finalidad de estandarizar el tamaño de partícula antes de su incubación ruminal. Del sustrato testigo, correspondiente al rastrojo maíz, se pesaron tres muestras de 3 g cada una. Para la harina de Nauphoeta cinerea, se prepararon seis muestras de 3 g; de estas, tres se destinaron a la medición del tiempo cero, utilizada para corregir la pérdida de fracciones solubles durante el lavado, y tres se utilizaron para la incubación ruminal durante 72 h.
Incubación ruminal in situ: una vez preparadas las muestras, estas fueron colocadas en sus respectivos sacos de nylon, los cuales fueron previamente secados y pesados. Posteriormente, los sacos se sellaron mediante amarre con rafia y se almacenaron en un desecador hasta el momento de su inserción en el rumen para la incubación in situ. Las muestras contenidas en los sacos de nylon fueron colocadas dentro de mallas portabolsas, cada una debidamente identificada. Posteriormente, se procedió a su incubación ruminal durante un periodo de 72 h. Para ello, se realizó la contención individual de la vaca mediante el uso de gamarra de manejo, registrando su identificación mediante el arete oficial correspondiente. La vaca Holstein tenía un peso vivo promedio de 650 kg, alimentada con una dieta basal compuesta por una relación 70:30 de forraje-concentrado. Una vez asegurada la vaca, se retiró cuidadosamente el tapón de la cánula ruminal. En el extremo libre de la malla que contenía los sacos con las muestras se colocó un cordón de rafia, el cual permitió sujetar la malla durante el periodo de incubación. Posteriormente, la malla fue introducida cuidadosamente en el interior del rumen, procurando que los sacos quedaran sumergidos en la fase líquida ruminal. Finalmente, el extremo libre de la rafia fue amarrado al tapón de la cánula, el cual se colocó nuevamente en su sitio para asegurar el cierre adecuado de la cánula ruminal (figura 1).



Figura 1. Sujeción de la malla portabolsas al tapón de la cánula ruminal.

Lavado, secado y pesaje de los sacos: una vez concluida la actividad de campo, se regresó al laboratorio, donde se realizó el lavado manual de los sacos correspondientes a la hora 0 con agua destilada. Esta medición se utilizó para corregir la pérdida de fracciones solubles no atribuibles a la degradación ruminal. Después de 72 h de incubación, los sacos fueron retirados del rumen de los animales y colocados en bandejas de aluminio para su procesamiento posterior. Posteriormente, fueron secados en una estufa de ventilación forzada a 65 °C durante 72 h. Transcurrido este periodo, los sacos fueron transferidos a un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente y evitar la absorción de humedad antes del pesaje final. La desaparición de la materia seca en el rumen se determinó mediante la diferencia entre el peso inicial de la muestra colocada en el saco y el peso del residuo posterior a la incubación, descontando el peso del saco vacío. Este procedimiento permitió estimar la degradabilidad ruminal in situ de la materia seca, de acuerdo con la metodología descrita por Ørskov y McDonald (1979).
Análisis estadístico: para comparar las medias de degradabilidad ruminal in situ de la materia seca entre los sustratos evaluados, maíz y harina de Nauphoeta cinerea, se utilizó una prueba t de Student. El análisis permitió determinar si existieron diferencias estadísticas entre ambos ingredientes en la desaparición de materia seca después de 72 h de incubación ruminal.

Resultados y discusión

En el cuadro 1 se muestra el formato utilizado en el registro de pesos para calcular la desaparición de materia seca de maíz y harina de NC incubados in situ durante 72 h, mientras que en el cuadro 2 se muestran los resultados de degradabilidad ruminal in situ, por último, en la figura 2 se presenta una gráfica comparativa de los dos sustratos. La degradabilidad ruminal in situ de la materia seca del tratamiento testigo, corregida con la medición de la hora cero, fue de 28.42 %. Este valor se encuentra relativamente cercano a los reportados por Shi et al. (2018) y Cook et al. (2016), quienes informaron niveles de degradación ruminal in situ cercanos a 36 %. La diferencia observada entre estos valores y los obtenidos en la presente práctica puede atribuirse a variaciones en el tipo de sustrato, tamaño de partícula, condiciones de incubación, dieta basal de los animales donadores y procedimientos de lavado de los sacos.
No obstante, los resultados del testigo fueron inferiores a los reportados por López-Inzunza et al. (2017) y Martínez-Hernández et al. (2012), quienes observaron valores de 37.3 % y 60.0 %, respectivamente. Estas diferencias pueden explicarse por las condiciones experimentales utilizadas en dichos estudios. En el primer caso, el incremento en la degradabilidad pudo estar asociado con la aplicación de enzimas fibrolíticas, las cuales favorecen la hidrólisis de componentes estructurales de la pared celular. En el segundo caso, el sustrato evaluado no correspondió exclusivamente a rastrojo de maíz, sino a mezclas con proporciones crecientes de ensilado de maíz, ingrediente que generalmente presenta mayor disponibilidad de fracciones fermentables y, por tanto, mayor degradabilidad ruminal.
En el caso del sustrato objetivo, la harina de cucaracha NC presentó una degradabilidad ruminal in situ de la materia seca de 59.6 %. Este valor fue superior al registrado en el tratamiento testigo, lo que indica una mayor desaparición ruminal de la materia seca después de 72 h de incubación. La Figura 2 muestra de manera esquemática la degradabilidad ruminal del testigo y de la harina de NC, considerando el ajuste por la hora cero.

Cuadro 1. Registro de pesos utilizados para calcular la desaparición de materia seca de maíz y harina de Nauphoeta cinerea incubados in situ durante 72 h[z].

Sustrato	# de saco	Peso de saco (g)	Peso de muestra (g)	Saco: E + muestra: F (g)	P. final del saco (g)	Muestra residual (g)	No. De Malla	No. De Vaca	Muestra desaparecida (g)
	34	1.5722	3.0933	4.6655	3.5885	2.0163	21	D02	1.0770
T	78	1.5351	3.0059	4.5410	3.5674	2.0323	21	D02	0.9736
	67	1.5512	3.0213	4.5725	3.6962	2.1450	21	D02	0.8763
	66	1.5555	3.0438	4.5993	2.7445	1.1890	17	D02	1.8548
HC	61	1.5686	3.0968	4.6654	2.8328	1.2642	17	D02	1.8326
	54	1.6422	3.0080	4.6502	2.5959	0.9537	17	D02	2.0543
	102	1.4918	3.0035	4.4953	4.3742	2.8824	-	D02	0.1211
HC h 0	82	1.6066	3.0080	4.6146	4.5042	2.8976	-	D02	0.1104
	91	1.5859	3.0024	4.5883	4.4912	2.9053	-	D02	0.0971

[z] T: testigo, HC: harina de cucaracha, HC h 0: harina de cucaracha a la hora cero.

Cuadro 2. Determinación de la degradabilidad del testigo y la harina de cucaracha con y sin el ajuste de la h 0[z].

	Sin ajuste con la hora cero				Con ajuste de la hora cero			
Sustrato	Digestibilidad (%)	Promedio	Desviación E.	CV (%)	Digestibilidad (%)	Promedio	Desviación E.	CV (%)
	34.82				31.17			
T	32.39	32.07	2.92	9.10	28.74	28.42	2.92	10.27
	29.00				25.36			
	60.94				57.29			
HC	59.18	62.80	4.84	7.70	55.53	59.16	4.84	8.18
	68.29				64.65			
	4.03				-	-	-	-
HC, h0	3.67	3.65	0.40	10.96	-	-	-	-
	3.23				-	-	-	-

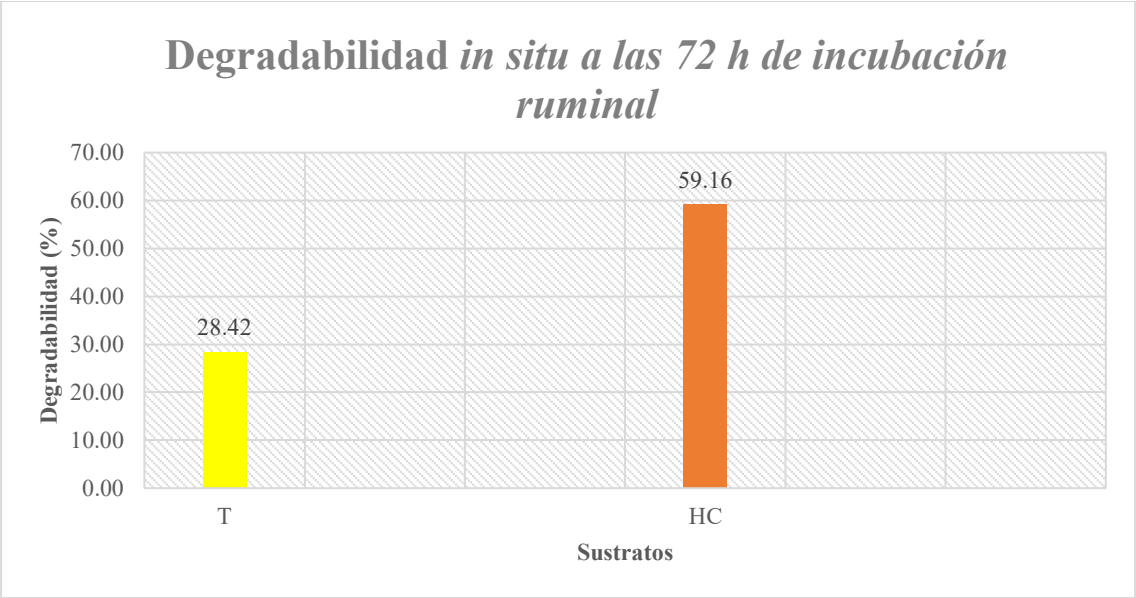


Figura 2. Degradabilidad ruminal in situ de la materia seca del testigo y de la harina de Nauphoeta cinerea, corregida con la medición de la hora cero.

El valor obtenido para la harina de Nauphoeta cinerea es comparable con lo reportado por Cervantes et al. (2024), quienes evaluaron la digestibilidad in vitro de la materia seca mediante la técnica de producción de gas y obtuvieron un valor de 56.76 %. Aunque ambas técnicas difieren en su fundamento metodológico, la similitud entre los valores sugiere que la harina de Nauphoeta cinerea posee un potencial fermentativo favorable. Sin embargo, esta comparación debe interpretarse con cautela, ya que la técnica in situ permite la exposición directa del sustrato al ambiente ruminal, mientras que la técnica in vitro se desarrolla bajo condiciones controladas de laboratorio.

En el mismo sentido, Cervantes et al. (2024) reportaron valores de digestibilidad in vitro de la materia seca de 56.76 % para Nauphoeta cinerea y 33.37 % para Shelfordella tartara, sin encontrar diferencias estadísticas mediante la prueba t de Student ($p<0.05$). Estos resultados sugieren que algunas especies de insectos pueden presentar comportamientos digestivos variables, posiblemente relacionados con diferencias en composición química, contenido de quitina, proteína, lípidos y estructura del exoesqueleto.

Los resultados también pueden contrastarse con los de Contreras et al. (2018), quienes evaluaron la cucaracha Gromphadorhina portentosa mediante digestibilidad in vitro y reportaron un valor de 33.90 %. Por otro lado, Pérez (2019), al evaluar el valor nutricional de harina de Gromphadorhina portentosa y gusano de la harina (Tenebrio molitor) para su uso en acuicultura, obtuvo digestibilidades in vitro de 90.43 % y 80.94 %, respectivamente. Estas diferencias evidencian que la digestibilidad de harinas de insectos puede variar ampliamente entre especies, métodos de evaluación, tipo de animal objetivo y composición química del sustrato.

Aunque algunos estudios realizados en especies no rumiantes han mostrado resultados productivos favorables con la inclusión de harina de cucaracha, su extrapolación a rumiantes debe realizarse con precaución. Por ejemplo, Contreras et al. (2018) evaluaron la inclusión de harina de Gromphadorhina portentosa en pollos de engorda durante la etapa de iniciación, utilizando 99 pollos de la línea Ross distribuidos en un diseño completamente al azar con tres tratamientos: dieta testigo, dieta testigo más 5 % de harina de cucaracha y dieta testigo más

10 % de harina de cucaracha. Los autores no encontraron diferencias en ganancia diaria de peso, consumo ni conversión alimenticia, lo que sugiere que esta harina puede sustituir parcialmente fuentes convencionales de proteína sin afectar el desempeño productivo en aves. No obstante, en rumiantes es necesario considerar además la degradabilidad ruminal, la disponibilidad de nitrógeno, la fermentación microbiana y el posible efecto de la quitina sobre la digestión.
La metodología empleada se ajusta al protocolo clásico propuesto por Ørskov y McDonald (1979), al utilizar sacos de nylon con tamaño de poro de 50 µm e incubación ruminal durante 72 h. Asimismo, la inclusión de la medición a la hora cero permitió corregir la pérdida de fracciones solubles durante el lavado, lo cual mejora la precisión en la estimación de la desaparición real de materia seca atribuible a la incubación ruminal. Esta práctica metodológica también ha sido considerada en estudios de degradabilidad in situ, como los realizados por López-Inzunza et al. (2017) y Shi et al. (2018).
Sin embargo, una limitación importante de la presente práctica fue que la evaluación se realizó únicamente a las 72 h de incubación, por lo que no fue posible modelar la cinética completa de degradación ruminal. Otros estudios incluyen tiempos de incubación múltiples, como 0, 6, 12, 24, 48 y 72 h, lo que permite estimar la fracción soluble, la fracción potencialmente degradable, la tasa de degradación y la degradabilidad efectiva mediante modelos exponenciales. Por tanto, aunque el valor de 59.6 % indica una degradabilidad favorable de la harina de Nauphoeta cinerea, se requiere una evaluación cinética más completa para caracterizar con mayor precisión su comportamiento ruminal.

Conclusiones

La técnica de degradabilidad ruminal in situ permitió evaluar de manera efectiva la desaparición de materia seca de la harina de cucaracha Nauphoeta cinerea en comparación con el sustrato testigo de rastrojo de maíz, evidenciando una mayor degradabilidad de la MS en el sustrato objetivo, si bien las características de ambos sustratos son muy diferentes concuerdan con lo reportado por los diferentes autores que han trabajado con insectos para fines de alimentación animal. En este caso en particular los resultados mostraron que la harina de Nauphoeta cinerea presenta mayor degradabilidad de la materia seca después de 72 h de incubación ruminal, lo que sugiere un potencial fermentativo favorable y respalda su posible uso como una fuente alimenticia no convencional con potencial para la nutrición de rumiantes. Sin embargo, antes de recomendar su inclusión práctica en dietas, es necesario determinar su degradabilidad proteica, fracción soluble, fracción potencialmente degradable, tasa de degradación, contenido de quitina y respuesta productiva en animales alimentados con diferentes niveles de inclusión.

Literatura citada

Cervantes, S. M., Vallejo, H. L. A., Cruz, M. R. G., Miranda, R. L. A., Sánchez, R. C. y Karina, C. M. (2024). Caracterización química de harina de cucaracha (Nauphoeta cinerea y Shelfordella tartara) y utilización en sustituto de leche para crianza artificial de cabritos. Tesis de maestria; Universidad Autónoma Chapingo, México. Disponible en: https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/23a6d0bb-afa1-40de-b656-5e35e19fd221 [10/07/2026].

Colegio de Postgraduados, COLPOS. (2016). Reglamento para el uso y cuidado de animales destinados a la investigación en el Colegio de Postgraduados (pp. 1–18). Colegio de

Postgraduados. Disponible en: http://www.colpos.mx/wb_pdf/norma_interna/REG_USO_CUIDADODEANIMALES.pdf [10/07/2026].

Contreras, M. R., García, M.C. A., Arredondo, F. J. L., & Ibarra, J. L. A. (2018). Uso de harina de cucaracha madagascar (Grompadhorina portentosa) como fuente de proteína para la alimentación de pollos. Tesis de maestría; Universidad Autónoma de Aguascalientes, México. Disponible en: http://hdl.handle.net/11317/1554 [10/07/2026].

Pérez, A. A., García, M. C. A., Ortiz, M. R., Ibarra, J. L. A. (2019). Valoración nutricional de harina de cucaracha de madagascar (Grompadhorina portentosa) y tenebrios (Tenebrio molitor) para su uso en la acuicultura. Tesis de maestría; Universidad Autónoma de Aguascalientes, México. Disponible en: https://www.scribd.com/document/518504140/valor-nutricionalcucaracha-de-madagascar[10/07/2026].

Buckner, C. D., Klopfenstein, T. J., Rolfe, K. M., Griffin, W. A., Lamothe, M. J., Watson A. K., MacDonald J. C., Schacht W. H., & Schroeder, P. (2013). Ruminally undegradable protein content and digestibility for forages using the mobile bag in situ technique Get access Arrow. Journal of Animal Science, 91(6): 2812-2822. https://doi.org/10.2527/jas.2012-5982

Ceballos, A., Noguera, R. R., Bolívar, D. M., & Posada, S. L. (2008). Comparison of the nylon bag in situ technique and in vitro (DaisyII) to estimate the kinetics of degradation of feeds for ruminants. Livestock Research for Rural Development, 20 (7).

Cook, D. E., Kononoff, P. J., Gehman, A. M., & Shreck, A. L. (2016). Effects of replacing corn with calcium oxide treated corn stover on site of digestion, milk production, and chewing behavior of lactating dairy cows. Journal of Dairy Science, 99(11): 8801-8812. https://doi.org/10.3168/jds.2016-11166

Gosselink, J.M.J., Dulphy, J. P., Poncet, C., Jailler, M., Tamminga, S., & Cone, J. W. (2004). Prediction of forage digestibility in ruminants using in situ and in vitro techniques. Animal Feed Science and Technology, 115(3-4): 227-246. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2004.01.008
Kilic, U., & Garipoglu, A. V. (2009). In situ Rumen Degradability, in vitro Digestibility and in vitro Gas Production of Full Fat Canola Seeds. Asian Journal of Animal and Veterinary Advances, 4(4): 200-208.

López-Inzunza, H. de J., Chongo-García, B. B., O-León, O. L., Guerra-Liera, J. E., Luna-López, M., Castro-Camacho, S. J., & López-Juárez, L. A. (2017). Digestibilidad in situ de rastrojo de maíz tratado con enzimas fibrolíticas. Ciencia y Agricultura, 14(1): 31-37. https://doi.org/10.19053/01228420.v14.n1.2017.6085

Martínez-Hernández, P. A., Miranda-Romero, L. A., Mendoza-Martínez, G. D., & Ramírez-Bribiesca, J. E. (2012). Composición química y degradabilidad ruminal de ensilados con diferentes niveles de inclusión de rastrojo de maíz. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 3(2): 207–214.

Nocek, J. E. (1988). In situ and other methods to estimate ruminal protein and energy digestibility: A review. Journal of Dairy Science, 71(8): 2051-2069. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79781-7
Núñez, T. O. P. (2017). Los costos de la alimentación en la producción pecuaria. Journal of the Selva Andina Animal Science. 4(2): 2311-2581.

Ørskov, E. R. (2000). The in situ technique for the estimation of forage degradability in ruminants. Forage evaluation in ruminant nutrition. 175-188. https://doi.org/10.1079/9780851993447.0175

Ørskov, E. R., & McDonald, I. (1979). The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. The Journal of Agricultural Science, 92(2): 499-503. https://doi.org/10.1017/S0021859600063048

Rosero, N. R., & Posada, O. L. S. (2007). Modelación de la cinética de degradación de alimentos para rumiantes. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, 20(2): 174-182.

Shi, C., He, L., Yu, Z., Shao, T., & Zhu, Y. (2018). Effects of adding calcium oxide on the fermentation quality and in situ ruminal degradability of corn stover silage. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 31(8): 1254-1262. https://doi.org/10.5713/ajas.17.0811

Food and Agriculture Organization, FAO (2014). Insects for food and feed. "Insects to feed the world" conference May 14-17,2014. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en: https://www.fao.org/edible-insects/86385/en/ [10/07/2026].

Food and Agriculture Organization, FAO (2020). La contribución de los insectos a la seguridad alimentaria, los medios de vida y el medio ambiente. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en: https://www.fao.org/3/i3264s/i3264s00.pdf [10/07/2026].

OPPORTIMES (2021). Importaciones de soya a México mantienen tendencia a la alza. OPPORTIMES. Disponible en: https://www.opportimes.com/importaciones-de-soya-a-mexico-mantienen-tendencia-a-la-alza/ [10/07/2026].

Schultz H., AMÉRICA LATINA (2019). Ingredientes ricos en proteínas para la alimentación animal. nutriNews AMÉRICA LATINA. Disponible en: https://nutricionanimal.info/ingredientes-ricos-en-proteinas-para-la-alimentacion-animal/ [10/08/2023].

Evaluación fisicoquímica del proceso de digestión anaerobia de estiércol de bovinos para la producción de biogás y mitigación del impacto ambiental

Mauricio Cervantes Silva[1], Carlos Enrique Álvarez Moreno[2], Jesús Antonio García Martínez[3]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible.

Resumen

El incremento de la producción ganadera ha intensificado los impactos ambientales asociados con el manejo inadecuado del estiércol bovino, incluyendo emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminación del suelo. La digestión anaerobia (DA) representa una alternativa biotecnológica para tratar residuos pecuarios, estabilizar la materia orgánica y producir biogás como fuente de energía renovable. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar el funcionamiento de un biodigestor alimentado con estiércol bovino mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos en las fases gaseosa y líquida. El estudio se realizó en la unidad de biodigestores del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Las mediciones se efectuaron antes de alimentar el biodigestor y durante los cinco días posteriores, utilizando los equipos Optima 7 Biogas® y Horiba®. Antes de la alimentación se registraron 7.54 % de CH_4, 10.00 ppm de H_2S, 3.09 % de CO_2 y 19.00 % de O_2; posteriormente, los valores alcanzaron 20.61 % de CH_4, 3.00 ppm de H_2S, 17.86 % de CO_2 y 1.40 % de O_2. El aumento de CH_4 y la disminución de O_2 sugieren condiciones anaerobias favorables para la producción de biogás. Además, el pH, la salinidad y el potencial de óxido-reducción se mantuvieron en rangos adecuados para una DA estable. Estos resultados resaltan la importancia de la evaluación fisicoquímica para verificar la estabilidad del biodigestor y favorecer el aprovechamiento del estiércol bovino para la producción de biogás y mitigación de GEI.

Palabras clave: estiércol, digestión anaerobia, biogás.

Abstrac

The increase in livestock production has intensified environmental impacts associated with inadequate cattle manure management, including greenhouse gas (GHG) emissions and soil contamination. Anaerobic digestion (AD) is a biotechnological alternative for treating livestock waste, stabilizing organic matter, and producing biogas as a renewable energy source. Therefore, this study evaluated the performance of a biodigester fed with cattle manure through the analysis of physicochemical parameters in the gaseous and liquid phases. The study was conducted at the biodigester unit of the Colegio de Postgraduados, Montecillo Campus. Measurements were performed before biodigester feeding and during the following five days using Optima 7 Biogas® and Horiba® equipment. Before feeding, gas concentrations were 7.54% CH_4, 10.00 ppm H_2S, 3.09% CO_2, and 19.00% O_2; after feeding, values reached 20.61% CH_4, 3.00 ppm H_2S, 17.86% CO_2, and 1.40% O_2.

[1] PREGP-G, Colegio de Postgraduados, carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, CP: 56230, Texcoco, Estado de México, México.
[2, 3] DIA, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera. Federal México-Texcoco Km 38.5, El Cooperativo, CP: 56230, Texcoco, Estado de México, México. cervantes.mauricio@colpos.mx; CALVAREZM@chapingo.mx; jgarciama@chapingo.mx

The increase in CH_4 and the decrease in O_2 suggest favorable anaerobic conditions for biogas production. Additionally, pH, salinity, and oxidation-reduction potential remained within suitable ranges for stable AD. These results highlight the importance of physicochemical evaluation to verify biodigester stability and support cattle manure use for biogas production and GHG mitigation.

Keywords: manure, anaerobic digestion, biogas.

Introducción

Los productos pecuarios, como la carne, la leche y los huevos, constituyen fuentes importantes de proteína animal para el consumo humano; además, otros productos derivados de la ganadería, como la lana y las pieles, representan materias primas de interés industrial. En este contexto, el crecimiento de la población mundial y el aumento en la demanda de productos de origen animal han intensificado la producción ganadera, particularmente en países en desarrollo. Sin embargo, esta expansión también incrementa la generación de excretas pecuarias, principalmente heces y orina, lo que representa un desafío ambiental cuando su manejo, almacenamiento o disposición final se realiza de manera inadecuada (Rodríguez-Mata et al., 2023; CE, 2023).

El estiércol bovino puede incorporarse a los sistemas suelo-planta como fertilizante orgánico, debido a su aporte de materia orgánica y nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal. No obstante, su aplicación directa o en exceso puede generar impactos negativos en el ambiente, tales como la acumulación de nitratos, nitritos, amonio, metales pesados, antibióticos residuales y microorganismos patógenos en suelos agrícolas y cuerpos de agua. Además, durante su almacenamiento, tratamiento y disposición, el estiércol puede contribuir a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), los cuales participan en el calentamiento global y en la alteración de los ciclos biogeoquímicos (Cai et al., 2021; Rivero et al., 2021).

A nivel ambiental, la ganadería tiene una participación relevante en la generación de GEI, ya que las emisiones asociadas con la fermentación entérica y el manejo de excretas representan una fracción importante de las emisiones del sector agropecuario. En México, los estados con alta densidad de población bovina, como Jalisco, Durango y Veracruz, concentran una proporción considerable de estas emisiones, lo que evidencia la necesidad de implementar estrategias de manejo que reduzcan el impacto ambiental de la producción pecuaria (INECC, 2015; Scarpelli et al., 2020).

El uso agrícola del estiércol, tanto en forma sólida como líquida, puede ser benéfico cuando se realiza bajo criterios técnicos; sin embargo, su aplicación excesiva puede convertirlo en una fuente de contaminación difusa. Diversos estudios han reportado que las zonas con alta aplicación de estiércol líquido presentan mayores concentraciones de antibióticos residuales en cuencas agrícolas, mientras que el uso continuo de estiércol y abonos orgánicos puede favorecer la acumulación de metales pesados como cobre (Cu), zinc (Zn), cadmio (Cd) y plomo (Pb) en suelos y cultivos (Hyun-Jeoung et al., 2020; Yao et al., 2022). Por ello, resulta necesario promover tecnologías que permitan aprovechar el valor agronómico y energético del estiércol, reduciendo al mismo tiempo sus riesgos ambientales.

Una alternativa para el tratamiento y aprovechamiento del estiércol bovino es la digestión anaerobia (DA), proceso biotecnológico mediante el cual la materia orgánica es degradada en

ausencia de oxígeno por consorcios microbianos especializados. Este proceso permite reducir la carga orgánica del residuo y generar biogás, compuesto principalmente por CH_4 y CO_2, el cual puede utilizarse como fuente de energía alternativa. Además, el digestato resultante puede emplearse como biofertilizante, siempre que cumpla con condiciones adecuadas de estabilidad y calidad. En este sentido, la DA representa una estrategia con potencial para disminuir la contaminación derivada del manejo de excretas y contribuir a la mitigación de emisiones de GEI.

Además de su importancia ambiental, los biodigestores alimentados con estiércol bovino pueden representar una alternativa técnica y económicamente viable para la generación de energía y biofertilizantes. Andreia et al. (2021) reportaron ventajas económicas en sistemas de biodigestión evaluados para el aprovechamiento energético del estiércol bovino, considerando factores como tipo y cantidad de materia prima, temperatura externa, tiempo de retención hidráulica, energía generada y reducción de costos energéticos.

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico complejo que ocurre en etapas secuenciales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (figura 1). En cada una de estas fases participan diferentes grupos microbianos, entre ellos bacterias hidrolíticas, acidogénicas y acetogénicas, así como arqueas metanogénicas responsables de la producción de CH_4. No obstante, la eficiencia del proceso puede verse afectada por factores como el pH, la temperatura, la salinidad, el potencial de óxido-reducción, la acumulación de ácidos grasos volátiles y la concentración de compuestos inhibidores, como el amoníaco. Por esta razón, la evaluación fisicoquímica del biodigestor es fundamental para verificar la estabilidad del proceso, identificar posibles desequilibrios y favorecer una producción eficiente de biogás (Rodríguez-Mata et al., 2023; Upadhyay et al., 2023). En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el funcionamiento de un sistema de biodigestor alimentado con estiércol bovino mediante el análisis de sus parámetros fisicoquímicos, con el propósito de valorar su estabilidad operativa, su capacidad para producir biogás y su importancia como alternativa para la mitigación de gases de efecto invernadero.

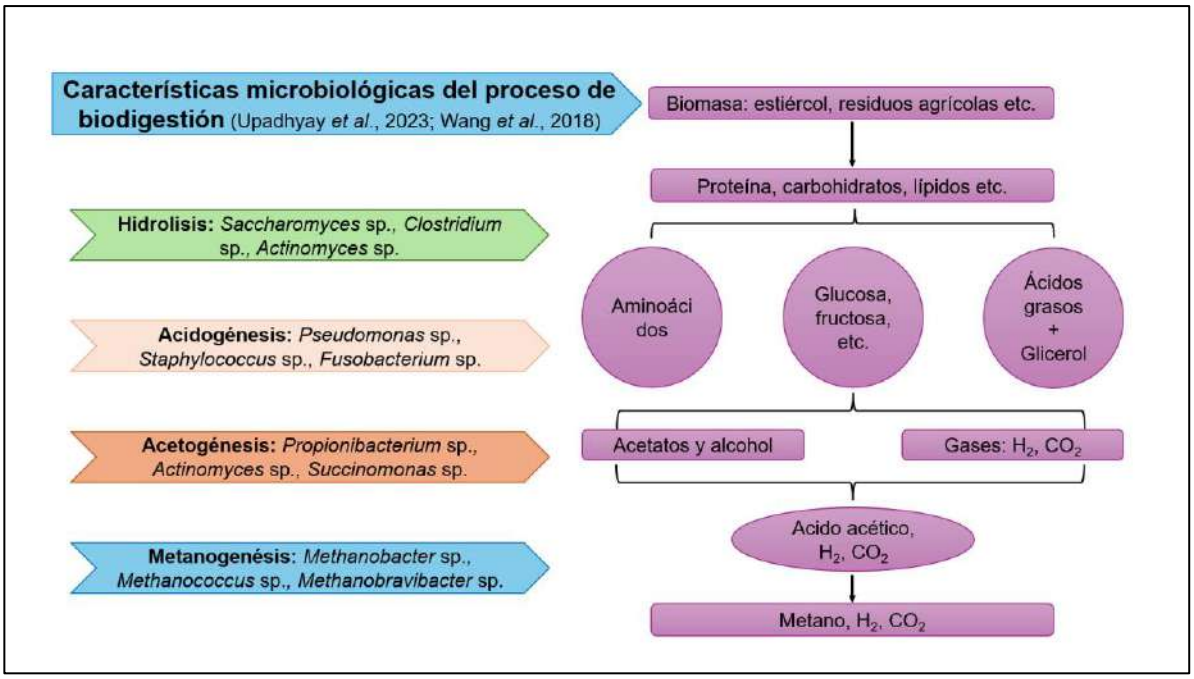


Figura 1. Esquema del proceso y las comunidades microbianas involucrada en la digestión anaerobia.

Materiales y métodos

El presente trabajo se realizó en la unidad de biodigestores, módulo de vacas lecheras Holstein y el laboratorio de Microbiología Ruminal y Genética Microbiana del programa de Ganadería del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Estado de México. Los materiales empleados se enlistan a continuación.

Materiales y equipos: para el desarrollo del estudio se utilizó un biodigestor experimental con capacidad total de 1000 L, el cual contenía aproximadamente 500 L de fase líquida. El biogás producido fue acumulado en un contenedor de geomembrana acoplado al sistema. Para la recolección, preparación y manejo del sustrato se emplearon cubetas de 20 L, carretilla y pala. Para la medición de la composición del biogás se empleó un analizador OPTIMA 7 Biogas®, MRU Instruments®, Alemania. Asimismo, para la evaluación de los parámetros fisicoquímicos de la fase líquida del biodigestor se utilizó un medidor multiparamétrico de calidad del agua Horiba®, serie U-50, fabricado por HORIBA, Ltd., Japón.

Preparación y alimentación del biodigestor: el biodigestor fue alimentado con estiércol bovino fresco recolectado en el módulo de vacas lecheras Holstein. Para la alimentación, se utilizó una cubeta de 20 L de estiércol bovino, la cual fue diluida con una cubeta de 20 L de agua, obteniendo una mezcla final de 40 L. Esta mezcla fue incorporada al biodigestor como sustrato para el proceso de digestión anaerobia.

Calibración de equipos: previo a las mediciones, el analizador OPTIMA 7 Biogas® fue calibrado de acuerdo con las especificaciones del fabricante, utilizando estándares relacionados con los gases de interés: metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y ácido sulfhídrico (H_2S). De igual manera, el medidor multiparamétrico Horiba® U-50 fue acondicionado y calibrado antes de su uso para la determinación de los parámetros de la fase líquida, incluyendo pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, turbidez, potencial de óxido-reducción, salinidad y sólidos totales disueltos. Las sondas fueron enjuagadas con agua destilada antes de cada medición para evitar contaminación cruzada entre muestras.

Procedimiento experimental: antes de la alimentación del biodigestor, se realizó una medición inicial de la composición del biogás y de los parámetros fisicoquímicos de la fase líquida. La composición gaseosa se evaluó con el analizador OPTIMA 7 Biogas®, registrando las concentraciones de CH_4, CO_2, O_2 y H_2S. Posteriormente, los parámetros de la fase líquida se determinaron con el equipo Horiba® U-50, considerando pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, turbidez, potencial de óxido-reducción, salinidad y sólidos totales disueltos (figura 2).

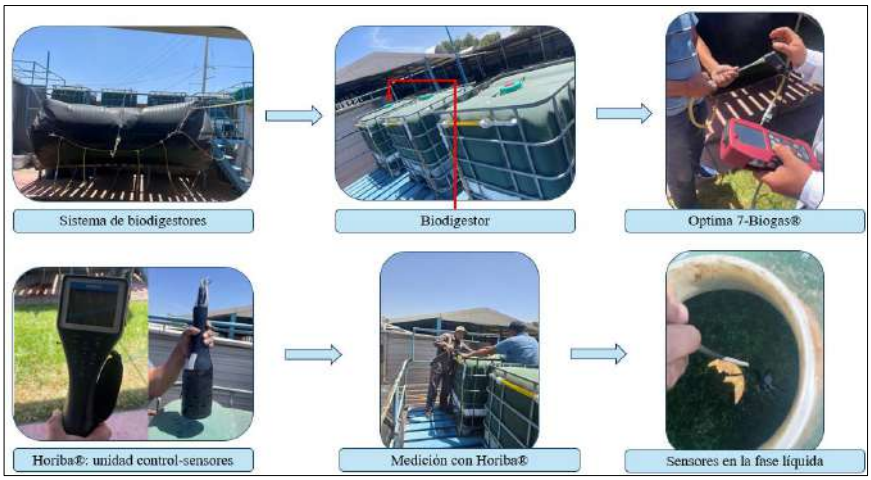


Figura 2. Esquema del proceso para la determinación de los parámetros del biodigestor.

Después de la medición inicial, el biodigestor fue alimentado con 40 L de mezcla compuesta por estiércol bovino y agua en proporción 1:1. Posteriormente, se realizaron mediciones a las 24, 48, 72, 96 y 120 h posteriores a la alimentación (figura 3). Este monitoreo permitió evaluar los cambios en la composición del biogás y en las condiciones fisicoquímicas de la fase líquida durante el proceso de digestión anaerobia. La evaluación de estos parámetros permitió valorar la estabilidad operativa del biodigestor, así como su importancia en el aprovechamiento del estiércol bovino para la producción de biogás y la mitigación de gases de efecto invernadero.

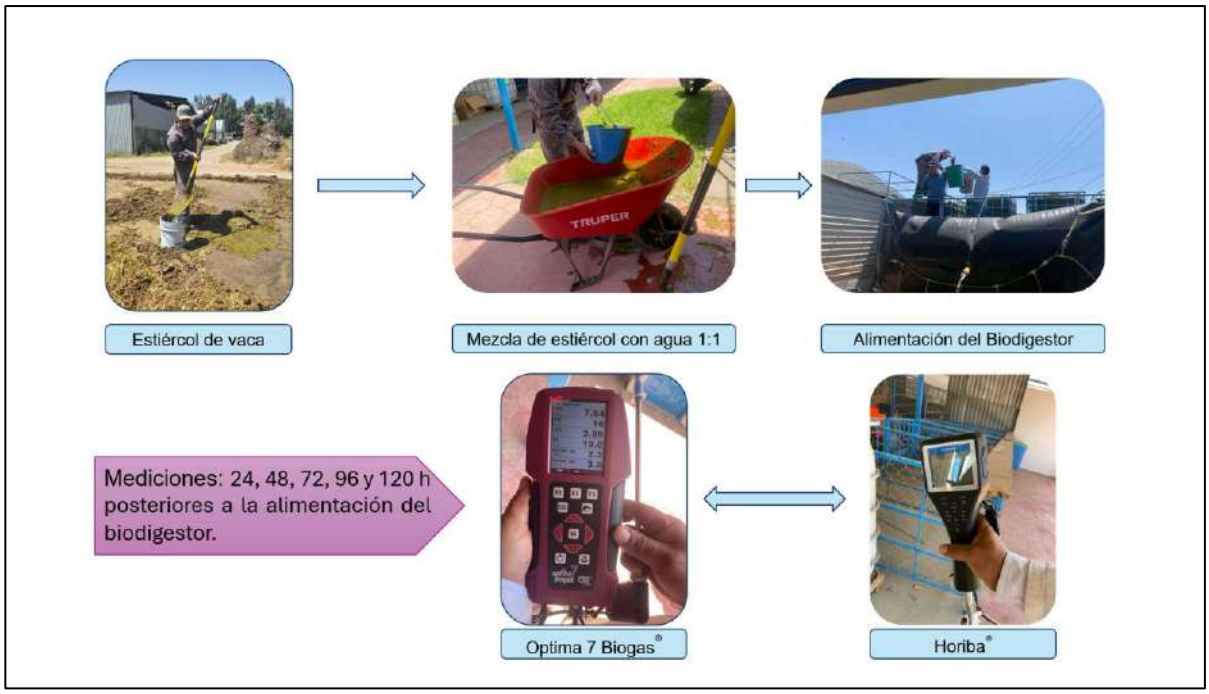


Figura 3. Alimentación del biodigestor y toma de datos.

Resultados y discusión

Los resultados de las mediciones realizadas en el biodigestor se presentan en el Cuadro 1. En este se muestran los parámetros correspondientes a la fase gaseosa y líquida antes de la alimentación del biodigestor (hora 0) y durante las 24, 48, 72, 96 y 120 h posteriores a la incorporación del sustrato. Por su parte, en el Cuadro 2 se presenta la proporción relativa de CH_4 y CO_2 respecto a la suma de ambos gases, con la finalidad de observar la composición predominante del biogás durante el periodo de evaluación.

Cuadro 1. Parámetros fisicoquímicos de la fase gaseosa y líquida del biodigestor alimentado con estiércol[z].

Análisis de gases (fase gaseosa)							
Variable	**Horas de medición**						**Observaciones (p. ej. Color, olor, horario)**
	0	**24**	**48**	**72**	**96**	**120**	
CH_4 (%)	7.54	20.61	20.05	19.21	20.40	45.18	Inoloro e inoloro, imperceptible.
H_2S (ppm)	10.00	3.00	4.00	11.00	5.00	1.00	
CO_2 (%)	3.09	17.86	17.02	17.43	16.04	32.12	
O_2 (%)	19.00	11.10	9.50	8.10	7.89	1.40	
Net cal. (MJ/kg)	2.30	6.30	6.10	5.90	4.60	14.30	
Net cal. Val. (MJ/cm3)	3.00	8.10	7.80	7.50	6.60	17.70	
Exe Air (°C)	31.40	24.30	27.10	27.00	27.30	26.30	
Air ratio (°C)	26.90	23.20	22.70	22.20	22.40	22.70	
Análisis de fluidos (fase líquida)							
Temperatura (°C)	21.52	20.36	20.51	20.58	20.58	18.28	Color verde olor a fermentación/color verde, estiércol en degradación con olor fuerte a estiércol.
pH	7.96	7.62	7.65	7.57	7.57	7.67	
pH MV	-50.00	-30.00	0.32	-27.00	-27.00	-32.00	
ORP Mv	-336.00	-363.00	-345.00	-257.00	-257.00	-333.00	
mS/cm	14.00	13.30	13.90	13.70	13.70	13.90	
ppm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Mg/L DO	4.17	5.07	4.85	10.75	10.75	1.51	
g/L TDS	8.67	8.23	8.62	8.43	8.43	8.07	
Salinidad	0.81	0.76	0.80	0.79	0.79	0.75	
t	4.70	4.10	4.30	4.20	4.20	2.90	

[z] CH_4: metano, H_2S: sulfuro de hidrógeno, CO_2: dióxido de carbono, O_2: oxígeno, Net cal: poder calorífico neto, pH: potencial de hidrogeno, ORP Mv: potencial de oxido-reducción, mS/cm: conductividad eléctrica, ppm: partes por millón, Mg/L DO: oxígeno disuelto, g/L TDS: solidos totales disueltos.

Cuadro 2. Proporción relativa de CH_4 y CO_2 respecto a la mezcla CH_4 + CO_2 del biogás[Z].

Biogás	0 h	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h
CH_4 (%)	70.75	53.57	54.01	52.43	55.98	58.45
CO_2 (%)	29.25	46.43	45.99	47.57	44.02	41.55
Total	10.60	38.47	37.12	36.64	36.44	77.30

[Z]CH_4: metano, CO_2: dióxido de carbono.

En la fase gaseosa se observó un incremento progresivo en la concentración de metano, pasando de 7.54 % antes de la alimentación a 45.18 % a las 120 h posteriores. Este comportamiento indica una respuesta favorable del biodigestor después de la incorporación del estiércol bovino diluido, ya que el aumento de CH_4 se asocia con la actividad de las arqueas metanogénicas durante la etapa final de la digestión anaerobia. De manera simultánea, la concentración de oxígeno disminuyó de 19.00 % a 1.40 %, lo cual evidencia el establecimiento de condiciones anaerobias dentro del sistema.

La concentración de CO_2 también aumentó de 3.09 % a 32.12 % durante el periodo de evaluación. Este incremento puede relacionarse con la degradación de la materia orgánica durante las etapas de hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis, en las cuales se generan compuestos intermedios y gases que posteriormente pueden ser utilizados por los microorganismos metanogénicos. En conjunto, el aumento de CH_4 y CO_2, acompañado de la reducción de O_2, confirma el desarrollo del proceso anaerobio posterior a la alimentación del biodigestor.

El sulfuro de hidrógeno presentó valores bajos debido a que el biodigestor cuenta con una trampa de rebabas de hierro, asi mismo, su variación durante el periodo de evaluación fue poca, con valores de 10 ppm al inicio, 3 ppm a las 24 h, 4 ppm a las 48 h, un aumento a 11 ppm a las 72 h y una reducción posterior hasta 1 ppm a las 120 h. Este comportamiento sugiere variaciones temporales en la degradación de compuestos azufrados presentes en el estiércol bovino. Aunque el H_2S forma parte de los gases traza del biogás, su monitoreo es importante debido a su efecto corrosivo y a su impacto sobre la calidad del biogás.

Respecto a la fase líquida, los valores de pH se mantuvieron en un intervalo cercano a la neutralidad y ligeramente alcalino, condición favorable para la estabilidad de la digestión anaerobia. Este comportamiento es relevante debido a que las comunidades metanogénicas son sensibles a cambios bruscos de pH, especialmente a condiciones ácidas ocasionadas por la acumulación de ácidos grasos volátiles. Asimismo, el potencial de óxido-reducción presentó valores negativos durante la medición del biodigestor, lo cual es característico de ambientes reductores y favorece el desarrollo de procesos anaerobios.

La salinidad, la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos presentaron valores relativamente estables durante el periodo de evaluación, lo que sugiere que la alimentación con estiércol bovino diluido no provocó alteraciones marcadas en la fase líquida del biodigestor. Por lo tanto, las condiciones fisicoquímicas observadas indican estabilidad operativa del sistema durante los cinco días posteriores a la alimentación.

En general, los resultados muestran que la alimentación del biodigestor con estiércol bovino favoreció el incremento en la producción de metano y la reducción del oxígeno en la fase gaseosa. Estos cambios, junto con la estabilidad del pH, la salinidad, la conductividad y el potencial de óxido-reducción, evidencian condiciones adecuadas para la digestión anaerobia. Por ello, la evaluación fisicoquímica del biodigestor permite verificar el funcionamiento del proceso y resalta su importancia como alternativa para el aprovechamiento energético del estiércol bovino y la mitigación de gases de efecto invernadero.

Para evaluar el funcionamiento de un biodigestor es necesario cuantificar sus variables fisicoquímicas y comparar los valores obtenidos con rangos reportados en investigaciones científicas. En el Cuadro 3 se presentan valores de referencia para variables de la fase gaseosa y líquida, los cuales permiten interpretar la estabilidad del proceso de digestión anaerobia y la calidad del biogás producido

Cuadro 3. Valores de referencia para la evaluación del proceso de DA en biodigestores[z].

Fase	Variable	Valor de referencia	Interpretación	Fuente
Gaseosa	CH_4 (%)	60–66	Concentraciones elevadas de CH_4 indican una metanogénesis eficiente y mayor calidad energética del biogás.	Valentino et al., 2019; Kalsum et al., 2020
Gaseosa	H_2S (ppm)	Hasta 3000	El H_2S es una impureza corrosiva que reduce la calidad del biogás y puede afectar su aprovechamiento energético.	Choudhury y Lansing, 2021
Gaseosa	CO_2 (%)	30–40	El CO_2 es un componente principal del biogás; concentraciones elevadas reducen el poder calorífico del gas.	Choudhury y Lansing, 2021
Líquida	pH	6.5–8.2	Valores cercanos a la neutralidad favorecen la actividad microbiana y la estabilidad de la digestión anaerobia.	Kalsum et al., 2020
Líquida	Salinidad	<15 g L^{-1}	Valores elevados pueden generar estrés osmótico e inhibir la actividad microbiana.	He et al., 2024
Líquida	ORP (mV)	< -300 mV	Indican condiciones reductoras favorables para el desarrollo de procesos anaerobios y metanogénicos.	Valentino et al., 2019; Kalsum et al., 2020
Líquida	TDS (g L^{-1})	<10	Valores moderados favorecen la estabilidad del medio líquido; cambios marcados pueden reflejar acumulación o degradación de compuestos disueltos.	Kalsum et al., 2020

[z]CH_4: metano, H_2S: sulfuro de hidrógeno, CO_2: dióxido de carbono, pH: potencial de hidrogeno, ORP: potencial de oxido-reducción, ppm: partes por millón, g/L TDS: solidos totales disueltos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el biodigestor presentó una respuesta favorable posterior a la alimentación con estiércol bovino, principalmente por el incremento en la concentración de CH_4 y la disminución de O_2. La concentración de metano aumentó de 7.54 % antes de la alimentación a 45.18 % a las 120 h, lo que indica una activación progresiva de la etapa metanogénica. Sin embargo, este valor aún se encuentra por debajo de los rangos de 60-66 % reportados para biogás con alta proporción de metano, por lo que el sistema mostró una tendencia positiva, aunque todavía no alcanzó una composición típica de biogás de un biodigestor maduro.

La concentración de CO_2 aumentó de 3.09 % a 32.12 %, ubicándose dentro del intervalo de referencia de 30-40 %. Este comportamiento es esperado durante la digestión anaerobia, debido a que el CO_2 se genera durante la degradación de la materia orgánica y participa como intermediario en algunas rutas metabólicas asociadas con la metanogénesis. Asimismo, la

reducción del O_2 de 19.00 % a 1.40 % evidencia el establecimiento de condiciones anaerobias, aspecto fundamental para el desarrollo de arqueas metanogénicas.

El H_2S presentó valores bajos durante el periodo de evaluación. Este gas es una impureza importante del biogás debido a su carácter corrosivo y a que puede afectar el aprovechamiento energético del gas en motores, calderas o sistemas domésticos. Los valores registrados fueron inferiores al valor de referencia de 3000 ppm, lo cual sugiere que, bajo las condiciones evaluadas, la concentración de H_2S no representó una limitante crítica para la calidad del biogás.

En la fase líquida, el pH se mantuvo dentro de un intervalo adecuado para la digestión anaerobia, con valores cercanos a la neutralidad y ligeramente alcalinos. Este comportamiento es relevante, ya que las arqueas metanogénicas son sensibles a descensos bruscos de pH ocasionados por la acumulación de ácidos grasos volátiles. Por ello, la estabilidad del pH observada en el biodigestor sugiere un equilibrio adecuado entre las etapas de acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

La salinidad y los sólidos totales disueltos se mantuvieron dentro de rangos aceptables, lo cual indica que no se presentaron condiciones evidentes de estrés osmótico o acumulación excesiva de sales en la fase líquida. De igual forma, los valores negativos de potencial de óxido-reducción evidenciaron un ambiente reductor, condición indispensable para el desarrollo de procesos anaerobios. En conjunto, estos parámetros indican que el biodigestor mantuvo condiciones fisicoquímicas favorables durante el periodo de evaluación.

El éxito de la digestión anaerobia depende de la interacción sintrófica entre bacterias hidrolíticas, acidogénicas y acetogénicas, así como arqueas metanogénicas. Las primeras degradan la materia orgánica y generan compuestos intermedios, como ácidos grasos volátiles, CO_2 e H_2, mientras que las arqueas metanogénicas transforman estos productos en CH_4. Cuando existe equilibrio entre estas poblaciones, el proceso se mantiene estable; sin embargo, una acumulación excesiva de ácidos grasos volátiles, cambios abruptos de pH, toxicidad por amonio o falta de sustrato pueden inhibir la metanogénesis y reducir la producción de biogás.

Durante el tiempo de monitoreo se observó la importancia de la alimentación periódica del biodigestor. Cuando el suministro de sustrato es constante, las comunidades microbianas mantienen una actividad metabólica más estable, lo que favorece una producción continua de biogás y evita acumulaciones repentinas de ácidos. En contraste, cuando el biodigestor permanece sin alimentación durante periodos prolongados, la actividad metanogénica puede disminuir. Al reanudar la alimentación, las bacterias fermentativas pueden activarse más rápido que las arqueas metanogénicas, generando acumulación de ácidos grasos volátiles, descenso del pH y posible inestabilidad del sistema.

Además de la estabilidad del proceso, un aspecto relevante para el aprovechamiento energético del biogás es su purificación. La remoción de H_2S es importante debido a su efecto corrosivo, mientras que la reducción de CO_2 permite incrementar la proporción de CH_4 y mejorar el poder calorífico del gas. Entre las alternativas empleadas para la remoción de H_2S se encuentran los filtros con óxidos de hierro o viruta de hierro, así como biofiltros con bacterias sulfo-oxidantes, capaces de transformar el H_2S en azufre elemental o sulfatos. Para la reducción de CO_2 pueden emplearse sistemas de lavado con agua a presión u otras tecnologías de purificación, con el propósito de obtener biometano de mayor calidad (Wang et al., 2018)..

Por lo tanto, los resultados obtenidos evidencian la importancia del monitoreo fisicoquímico en biodigestores alimentados con estiércol bovino. La evaluación de variables como CH_4, CO_2, O_2, H_2S, pH, salinidad, TDS y ORP permite interpretar la estabilidad del proceso, identificar posibles limitantes y valorar el potencial del biodigestor como alternativa para la producción de biogás y la mitigación de gases de efecto invernadero.

Conclusiones

El manejo inadecuado del estiércol bovino representa una fuente potencial de contaminación ambiental debido a la emisión de gases de efecto invernadero, generación de lixiviados, malos olores y posible dispersión de microorganismos patógenos. En este contexto, la digestión anaerobia constituye una alternativa tecnológica viable para el tratamiento de residuos pecuarios, ya que permite transformar la materia orgánica en biogás y reducir la carga contaminante del sustrato. La evaluación fisicoquímica del biodigestor permitió verificar la estabilidad del proceso posterior a la alimentación con estiércol bovino. El incremento en la concentración de CH_4, la disminución de O_2, la presencia de CO_2 en rangos esperados y la estabilidad del pH evidenciaron condiciones favorables para el desarrollo de la digestión anaerobia. Aunque la concentración de metano no alcanzó valores típicos de un biogás completamente maduro, la tendencia observada indicó actividad metanogénica y potencial de aprovechamiento energético. Los parámetros de la fase líquida, como pH, salinidad, sólidos totales disueltos y potencial de óxido-reducción, se mantuvieron en condiciones adecuadas para la estabilidad del sistema. Esto confirma la importancia del monitoreo continuo, ya que cambios abruptos en estas variables pueden afectar el equilibrio entre las comunidades microbianas involucradas en la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Finalmente, el uso de biodigestores alimentados con estiércol bovino representa una estrategia sostenible para el aprovechamiento energético de residuos pecuarios y la mitigación de gases de efecto invernadero. Sin embargo, para mejorar la eficiencia del proceso y la calidad del biogás, es recomendable mantener una alimentación periódica del sistema, monitorear sus variables operativas y considerar tecnologías de purificación que reduzcan impurezas como H_2S y CO_2.

Literatura citada

Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K. S., Buckley, D. H. y Stahl, D. A. (2015). Brock. Biología de los Microorganismos. 14va ED, *Pearson*, Madrid, España.

Acevedo, P. A. I., Leos, R. J. A., Figueroa, V. U., & Romo, L. J. L. (2017). Política ambiental: uso y manejo del estiércol en la Comarca Lagunera. *Acta universitaria*. 27(4): 3-12. https://doi.org/10.15174/au.2017.1270

Andreia, G. S., Donizetti de L. J., & Adamczuk, O. G. (2021). Techno-economic model to appraise the use of cattle manure in biodigesters in the generation of electrical energy and biofertilizer. *Biomass and Bioenergy*. 150: 106107. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106107

Cai, Y., Tang, R., Tian, L., & Chang, S. X. (2021). Environmental impacts of livestock excreta under increasing livestock production and management considerations: Implications for developing countries. *Current Opinion in Environmental Science & Health.* 24: 100300. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100300

Choudhury, A., & Lansing S. (2021). Adsorption of hydrogen sulfide in biogas using a novel iron-impregnated biochar scrubbing system. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 9(1): 104837. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104837

Comisión Europea, CE. (2023). "Treatment of Animal Waste to Reduce Gaseous Emissions and Promote Nutrient Reuse". *Web oficial de la Unión Europea*. Disponible en: https://cordis.europa.eu/article/id/443164-new-treatment-for-better-recycling-of-animal-manure/es [26/06/2026].

Hassaneen, F. Y., Abdallah, R. Z., Abdallah, M. S., Shereen, N. A., Elaziz, M. M. A., El-Mokhtar, M. A., et al. (2023). Impact of innovative nanoadditives on biodigesters microbiome. *Microbial Biotechnology*. 16(1): 128-138. https://doi.org/10.1111/1751-7915.14173

He, X., Deng, C., Li, P., Yu, W., Chen, H., Lin, R., et al. (2024). The impact of salinity on biomethane production and microbial community in the anaerobic digestion of food waste components. *Energy.* 294(1): 130736. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130736

Hyun-Jeoung, L., Hong-Duck, R., Young, L. D., Gene, C. E., Kim, K., & Kwan, L. J. (2020). Characteristics of veterinary antibiotics in intensive livestock farming watersheds with different liquid manure application programs using UHPLC-q-orbitrap HRMS combined with on-line SPE. *Science of The Total Environment*. 749: 142375. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142375

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC. (2015). "Inventario Nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero". *Web oficial de Gobierno de México.* Disponible en: https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero[26/06/2026].

Rivero, M. J., Evans, C. O. A., Berndt, A., Cartmill, A., Dowsey, A., Farruggia, A., et al. (2021). Taking the steps toward sustainable livestock: our multidisciplinary global farm platform journey. *Animal Frontiers*. 11(5): 52-58. https://doi.org/10.1093/af/vfab048

Rodríguez-Mata, A. E., Gómez-Vidal, E., Lucho-Constantino, C. A., Medrano-Hermosillo, J. A., Baray-Arana, R., & López-Pérez, P. A. (2023). State Estimation in a Biodigester via Nonlinear Logistic Observer: Theoretical and Simulation Approach. *Processes*. 11(4): 1234. https://doi.org/10.3390/pr11041234

Scarpelli, T. R., Jacob, D. J., Villasana, C. A. O., Hernández, I. F. R., Moreno, P. R. C., Alfaro, E. A. C., et al. (2020). A gridded inventory of anthropogenic methane emissions from Mexico based on Mexico's National Inventory of Greenhouse Gases and Compounds. *Environmental Research Letters*. 15(10): 105015. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb42b

Upadhyay, A., Kovalev, A. A., Zhuravleva, E. A., Kovalev, D. A., Litti, Y. V., Masakapalli, S. K., *et al*. (2023). A Review of Basic Bioinformatic Techniques for Microbial Community Analysis in an Anaerobic Digester. *Fermentation*. 9(1): 62. https://doi.org/10.3390/fermentation9010062

Valentino, F., Moretto, G., Gottardo, M., Pavan, P., Bolzonella, D., & Majone, M. (2019). Novel routes for urban bio-waste management: A combined acidic fermentation and anaerobic digestion process for platform chemicals and biogas production. *Journal of Cleaner Production*. 220: 368-375. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.102

Vingerhoets, R., Spiller, M., Schoumans, O., Vlaeminck, S. E., Buysse, J., & Meers, E. (2025). Economic potential for nutrient recovery from manure in the European union Author links open overlay panel. *Resources, Conservation and Recycling*. 215: 108079. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108079

Wang, P., Wang, H., Qiu, Y., Ren, L., & Jiang, B. (2018). Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production–A review. *Bioresource Technology*. 248: 29-36. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.152

Yao, C., Luo, F., Jin, Z., Lu, S., Li, J., Wang, X., & Hu, X. (2022). Effects of Application of Pig Manure on the Accumulation of Heavy Metals in Rice. *Plants*. *11*(2): 207. https://doi.org/10.3390/plants11020207

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Modelación Hidrogeológica del Acuífero de Cuxtal para la Gestión Sostenible del Recurso Hídrico

Mónica Marisol Carrillo Monsrreal[1], Iris Neri Flores[2], Bertha Hernández Aguilar[3], Didier Samayoa Ochoa[1]

Mesa1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La creciente demanda de agua y la contaminación del acuífero kárstico de Cuxtal, en Yucatán, amenazan su disponibilidad como fuente principal de abastecimiento. Esta investigación se centró en la modelación hidrogeológica del sistema para comprender su comportamiento y evaluar escenarios de gestión futura. Se desarrolló un modelo numérico de flujo utilizando MODFLOW, calibrado con datos de niveles piezométricos. El modelo reprodujo satisfactoriamente las condiciones hidrodinámicas, identificando las zonas de mayor recarga pluvial. Los resultados indican que la extracción excesiva en el poniente de la ciudad es el principal factor de la disminución de los niveles freáticos sin alterar el ciclo natural. Se concluye que la modelación hidrogeológica es una herramienta indispensable para la toma de decisiones y la implementación de políticas de manejo sustentable del acuífero de Cuxtal, priorizando la protección de las zonas de recarga y el control de las extracciones.

Palabras clave: Modelación hidrogeológica, acuífero kárstico, Cuxtal, gestión del agua, MODFLOW.

Abstract

The growing water demand and pollution of the karstic Cuxtal aquifer in Yucatán threaten its availability as the main source of supply. This research focused on the hydrogeological modeling of the system to understand its behavior and evaluate future management scenarios. A numerical flow using MODFLOW, calibrated with piezometric level. The model satisfactorily reproduced the hydrodynamic conditions, identifying the zones most vulnerable to contamination and the effects of rainfall recharge. The results indicate that excessive extraction in the western part of the city is the main factor in the decline of groundwater levels towards natural conditions. It is concluded that hydrogeological modeling is an essential tool for decision-making and the implementation of sustainable management policies for the Cuxtal aquifer, prioritizing the protection of recharge zones and the control of extractions.

Keywords: Hydrogeological modeling, karstic aquifer, Cuxtal, water management, MODFLOW.

[1]ESIME Unidad Zacatenco – Instituto Politécnico Nacional, mcarrillom2400@alumno.ipn.mx , dsamayoa@ipn.mx
[2]Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Mérida UNAM, iris.neri@enesmerida.unam.mx
[3]Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, una sede del Instituto de Ecología de la UNAM, bertha.hdz@iecologia.unam.mx

Introducción

El acuífero de Cuxtal es la principal fuente de agua dulce para la ciudad de Mérida y su zona conurbada, abasteciendo a más de un millón de habitantes. Sin embargo, este sistema kárstico, caracterizado por su alta vulnerabilidad a la contaminación y su dinámica compleja, enfrenta graves problemas debido a la sobreexplotación y la intrusión de contaminantes. La gestión actual del recurso se realiza con base en información limitada, lo que dificulta la implementación de estrategias efectivas para garantizar su sostenibilidad a largo plazo. La hipótesis de este trabajo plantea que la construcción de un modelo hidrogeológico numérico permitirá simular el comportamiento del acuífero bajo diferentes escenarios, identificando las causas de la problemática actual y evaluando las medidas de manejo más adecuadas. Por lo tanto, el objetivo general fue desarrollar un modelo de flujo y transporte que sirva como herramienta de apoyo para la gestión integral del acuífero de Cuxtal.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en el acuífero de Cuxtal, localizado al sur del estado de Yucatán, México, en el municipio de Mérida. Se recopiló información hidrogeológica de fuentes oficiales (CONAGUA) y estudios previos, incluyendo datos de 3 norias, 1 cenote y 1 piezometro de monitoreo. Para el modelo numérico se utilizó el código MODFLOW (versión 6) para el flujo subterráneo implementado en el software ModelMuse. Las condiciones de frontera se definieron como: nivel constante en la costa, recarga por infiltración de lluvia (estimada mediante el método de Thornthwaite) y extracciones por pozos de abastecimiento. La calibración del modelo se realizó en estado estacionario y transitorio (período 2010-2025), ajustando los parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica y porosidad) hasta minimizar la diferencia entre los niveles observados y simulados. La validación se llevó a cabo con datos de un período diferente (2018-2023). Se evaluó la sensibilidad del modelo a variaciones en la recarga y las extracciones.

Resultados y discusión

El modelo calibrado mostró un buen ajuste entre los niveles piezométricos observados y simulados, con un error cuadrático medio (RMSE) de 0.85 m y un coeficiente de correlación (R^2) de 0.89. La simulación histórica reveló una tendencia generalizada de descenso de los niveles freáticos, con una disminución promedio de 0.5 m por año en la zona de mayor extracción (poniente de Mérida). En la tabla 1 se observan los parámetros utilizados:

Cuadro 1.- Parámetros de calibración

No	ID	X	Y	Z (msnm) al brocal csnm	K Lluvias	K Nortes	K Promedio
1	P11	223635.87	2313336.39	9.795	0.447826087	0.44782609	0.447827205
2	N5-SPC	231549	2309359	11	0.35715	0.1023	0.418629167
3	C1-REC	230324.26	2300913.94	20.55	0.511892963	0.26	0.29523662
4	N13-REC	228638.9	2298415.27	26	0.91	0.82	0.862635445
5	N7-MOL	226099	2303898	17	0.30095	0.39	0.371478991

El análisis de sensibilidad demostró que la recarga es el parámetro más influyente en la dinámica del sistema. Estos resultados son consistentes con otros estudios en sistemas kársticos

de la península de Yucatán, que reportan una alta vulnerabilidad y una rápida respuesta a perturbaciones externas (Escolero et al., 2016). La modelación permitió, además, identificar que la disminución del nivel freático no solo se debe a la extracción, sino también a una reducción en la recarga efectiva asociada a cambios en el uso de suelo y a la impermeabilización de zonas de recarga. Siendo que el cenote es un punto de recarga que en un año efectivo cuenta con recarga no variable. En la figura 1 se observa la variación de carga hidráulica.

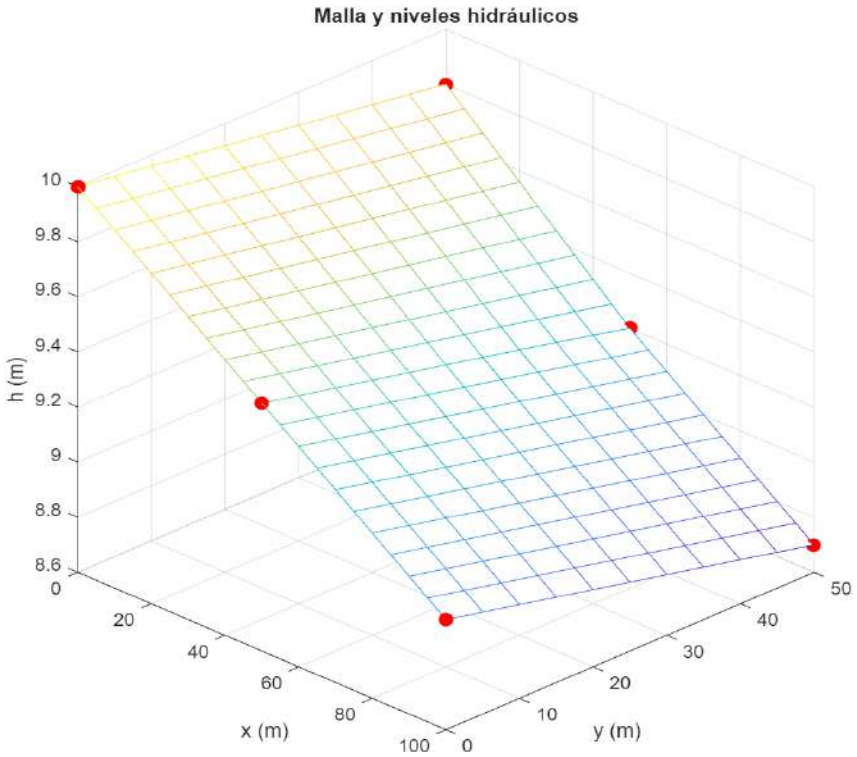


Figura 1. Variación de la carga hidráulica.

Conclusiones

El modelo hidrogeológico desarrollado para el acuífero de Cuxtal constituye una herramienta robusta y fiable para la gestión del agua subterránea. Los resultados confirman la sobreexplotación del acuífero, particularmente en el área urbana, y evidencian su vulnerabilidad a la contaminación. Las conclusiones más relevantes son: 1) La extracción de agua es el factor principal que controla la dinámica del sistema; 2) La recarga pluvial es esencial para la sostenibilidad del acuífero, por lo que su protección es prioritaria; y 3) La modelación es crucial para evaluar el impacto de políticas de manejo, como la reducción de extracciones o la creación de áreas de recarga. Se recomienda la implementación de un sistema de monitoreo continuo y la actualización periódica del modelo para mejorar la precisión de las predicciones y la toma de decisiones.

Literatura Citada

Escolero, O., Marín, L. E., & Steinich, B. (2016). *Hidrogeología de la Península de Yucatán*. Centro de Investigación Científica de Yucatán.

Marín, A. I., & Solís, J. A. (2021). Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero kárstico de Cuxtal. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(3), 45-

67. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-03-03
Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuxtal (3111)*. https://www.gob.mx/conagua/documentos/disponibilidad-de-agua-subterranea [Consultado el 15 de mayo de 2025].

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Análisis numérico de un sistema de ventilación forzada y geometría sobre el ambiente de una fábrica de plantas con luces artificiales (PFAL)

Oneyda Oyorzabal Marquez[1], Raquel Salazar Moreno[1], Jorge Flores Velázquez[2], Enrrique Álvarez Moreno[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La producción de lechuga (Lactuca sativa L.) en ambientes controlados, como una fábrica de plantas con luz artificial (PFAL), ha contribuida a reducir la demanda de alimentos frescos. Las ventajas de una PFAL consisten en la producción de cultivos continua en el tiempo, para lo cual es necesario proveer los requerimientos ambientales tales como: temperatura, humedad, intensidad lumínica, etc. El objetivo de este trabajo fue la construcción de un modelo basado en dinámica de fluidos computacionales (CFD) para simular el flujo de aire dentro de una fábrica de plantas con luz artificial (PFAL) sin cultivo, generado por el sistema de ventilación forzada. El modelo numérico fue construido basado en un prototipo de dimensiones 1.5x1.85x0.75m y usando el programa comercial ANSYS Fluent en su versión académica, se eligió Se eligió un *solver* basado en presión en estado estacionario y con el modelo de turbulencia k- ɯ SST. En el modelo numérico se incluyeron los ventiladores internos de forma tridimensional con un valor inicial de velocidad v=4.7m/s, los resultados de la simulación muestran que los componentes de velocidad del flujo alcanzaron una convergencia menor a $4x10^{-04}$ la validez física de la solución se sustentó mediante el cierre de balance global de masa con un desbalance neto inferior al 1% del caudal total de entrada. El modelo fue validado usando los valores experimentales de la velocidad del viento y su correspondiente simulada en FLUENT. A partir de los resultados obtenidos, se pretende continuar con la simulación del flujo de aire en sistemas de cultivo y modelo térmico generado por el sistema de iluminación LED.

Palabras clave: ANSYS Fluent, dinámica de fluidos, modelo de turbulencia

Abstract

Lettuce (*Lactuca sativa* L.) production in controlled environments, such as a plant factory with artificial lighting (PFAL), has helped meet the demand for fresh produce. A key advantage of a PFAL is continuous crop production, which requires maintaining specific environmental conditions—such as temperature, humidity, and light intensity. The objective of this study was to develop a Computational Fluid Dynamics (CFD) model to simulate airflow generated by a forced ventilation system within an empty PFAL (i.e., without crops). The numerical model was based on a prototype measuring 1.5 × 1.85 × 0.75 m; the academic version of ANSYS Fluent software was used, employing a steady-state, pressure-based solver and the k-ω SST turbulence model. Internal fans were modeled in three dimensions with an initial velocity of 4.7 m/s.

[1]Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.
[2] Colegio de posgraduados, Campus Montecillo, carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, CP: 56230, Texcoco, Estado de México, México. onemarqz@gmail.com; raquels60@hotmail.com; jorgelv@colpos.mx; calvarezm@chapingo.mx

Simulation results showed that flow velocity components achieved convergence below 4×10^{-4}, and the physical validity of the solution was confirmed by a global mass balance with a net imbalance of less than 1% of the total inlet flow rate. The model was validated by comparing experimental wind speed values with those simulated in FLUENT. Future work will involve simulating airflow within actual crop systems and modeling the thermal dynamics generated by the LED lighting system.

Keywords: ANSYS Fluent, fluid dynamics, turbulence model

Introducción

La producción de lechuga (Lactuca sativa L.) en sistemas de agricultura de ambiente controlado, como fábrica de con luz artificial (PFAL) y granjas verticales, ha crecido en la última década debido a la demanda de alimentos frescos y locales donde la producción de cultivos es continua con control automatizado y alta precisión de los factores ambientales internos incluyendo la temperatura, la humedad, la intensidad lumínica, la concentración de CO_2 y la solución nutritiva (Rodríguez-Delfín et al., 2022; Vásquez Bermúdez et al., 2023), las PFAL es una extensión del modelo de un cultivo hidropónico en un invernadero, los costes de transporte se pueden eliminar debido a la cercanía con el consumidor (Benke & Tomkins, 2017; Kozai, 2013; Yuan et al., 2025) .

Las condiciones ambientales interiores en una granja vertical son importantes ya que condicionan directamente la actividad fisiológica del cultivo, y por lo tanto influyen en el rendimiento y la calidad de este (Carotti et al., 2021; Lubna et al., 2022). Sin embargo, la uniformidad de las condiciones ambientales en una granja vertical puede ser deficiente debido a las estanterías de cultivo multicapa, la resistencia de las plantas al flujo de aire, el diseño del sistema de distribución de aire y el calor generado por la electricidad (Zhang et al., 2016; Zhang & Kacira, 2022).

El flujo del aire tiene un impacto en el crecimiento de las plantas, afecta en las tasas de fotosíntesis y traspiración de la planta (Yabuki & Miyagawa, 1970). El espesor de la capa limite laminar, una película de aire adyacente a la superficie foliar regula el intercambio de calor, vapor de agua y gases entre la planta y el ambiente, el espesor de esta capa depende principalmente de la velocidad del aire, las condiciones de turbulencia, donde influye también el calor sensible y latente, la transpiración y el intercambio de CO_2 y O_2 entre el dosel vegetal y el ambiente (Schuepp, 1993; Shibuya et al., 2006).

Por lo tanto, el movimiento de aire alrededor del dosel también determina el espesor de la capa, es decir cuando el movimiento es insuficiente la capa limite aumenta de espesor, generando zonas con escasa renovación de aire y elevada humedad relativa (Dupont et al., 2025) por lo que un diseño inadecuado del sistema de ventilación y el aumento de niveles pueden generar una zona de flujo de aire estancado, lo que podría inhibir el crecimiento de las plantas e inducir enfermedades fisiológicas, como la quemadura de las puntas (Zhang et al., 2025).

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta numérica utilizado ampliamente para predecir el flujo de fluidos, la transferencia de calor y masa, y fenómenos físicos relacionados y diseño de sistemas de distribución de aire para la agricultura en ambiente controlado (CEA)(Kang et al., 2024; Zhang et al., 2016), CFD, se presenta como una opción

para integrar el clima y la calidad del aire en un único modelo, mostrando su utilidad para optimizar el desempeño de sistemas fluidodinámicos en diversos campos de la ingeniería (Guzmán-Valdivia et al., 2019; Rong et al., 2016; Tan et al., 2021). Además, permite investigar las interacciones planta-ambiente para determinar las tasas de transferencia de calor y masa, y en qué medida estas tasas benefician la cantidad y calidad de la producción de alimentos (Bournet & Rojano, 2022).

Sin embargo, aún existe una limitada integración entre modelos CFD del flujo de aire y datos experimentales en fábricas de plantas, particularmente en el cultivo de lechuga bajo sistemas de Técnica de Película Nutritiva (NFT)(Palmitessa et al., 2024; Raza et al., 2019).

Por lo que el objetivo de este trabajo fue simular numéricamente mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), en una fábrica de plantas con luz artificial (PFAL) sin cultivo, con el fin de analizar el efecto un sistema de ventilación mecánica sobre la geometría de una PFAL estableciendo una base para futuras simulaciones que incorporen el dosel vegetal.

Materiales y métodos

En este estudio, se llevaron cabo simulaciones numéricas en ANSYS Fluent con enfoque de volumen finito para resolver las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía en la PFAL, para predecir la velocidad del aire en una PFAL.

El experimento para validación del modelo se realizó en la Universidad Autónoma Chapingo donde se cuenta con un módulo rack de 1.5m x1.85m x 0.75m, con tres niveles por cada nivel se cuenta con 4 ventiladores de corriente directa a 12V y 0.25a. Para la entrada de aire se tiene un ventilador y un extractor del lado opuesto para la salida de este como parte de la instrumentación se tienen 18 lámparas Hytekgro GL225RBW con 225 LED con 163 LED rojos (620-660 nm), 58 LED azules (450-460 nm) y 4 LED blancos (6500 k) y con 45 vatios.

También se usaron 5 sensores de temperatura infrarrojo GY-906 MLX90614, es un dispositivo digital que permite medir la temperatura sin contacto físico, utilizando la radiación infrarroja emitida por los objetos. Este módulo integra el sensor MLX90614 de Melexis, que incluye una termopila para detectar la radiación IR y un procesador interno que convierte esta señal en valores de temperatura compensados, tanto del objeto como de la temperatura ambiente, ofrece mediciones de -70 °C a 380 °C para la temperatura del objeto y de -40 °C a 170 °C para la temperatura ambiente, con una precisión típica de ±0.5 °C. Estos sensores se ubicaron dos en el primer nivel, dos un segundo nivel y 1 sensor en el tercer nivel. Así mismo se usó un anemómetro digital para la velocidad del aire en m/s.

La toma de datos se realizó por ocho días, donde se tomaron temperaturas y velocidad del viento en horarios de 11:30am a 12:00, de 12:30pm a 1:00pm, en estos periodos se tomaron los datos tres veces promediando el resultado de cada periodo y velocidad del viento de cada ventilador a 10cm, 20cm y 50cm. Los datos obtenidos de las temperaturas se almacenaron en una SD para obtener sus promedios y los datos de las velocidades del viento se registraron en un archivo Excel para su procesamiento.

Ecuaciones de gobierno

El flujo de aire se modela mediante las ecuaciones de Navier–Stokes promediadas por Reynolds (RANS), acopladas con la ecuación de energía y un modelo de cierre de turbulencia. Para la conservación de la masa se tiene la ecuación 1(Norton & Sun, 2006)

$$\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{t}} + \nabla * (\mathrm{p}\vec{\mathrm{v}}) = 0 \quad (1)$$

Donde para flujo incompresible en estado estacionario la ecuación 1 se reduce a

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla * (p\vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla * (\rho\vec{v})(\vec{v}) = -\nabla\mathrm{p} * (\bar{\bar{\tau}}) + \rho(\vec{g}) + s_m \quad (3)$$

Donde ρ es la presión estática, $\bar{\bar{\tau}}$el tensor de esfuerzos viscosos, $\rho(\vec{g})$ la fuerza de flotación (gravedad, relevante por la convección natural generada por el calor de las lámparas), y s_m el término fuente de momento aplicado en las zonas de volumen que representan los ventiladores internos.

Conservación de energía

$$\frac{\partial(pE)}{\partial t} + \nabla * (\vec{v})(\rho E + \rho) = \nabla(k_{eff}\Delta\mathrm{T}-)\mathrm{p} * (\tau) + p(\vec{g}) + s_h \quad (4)$$

donde k_{eff} es la conductividad térmica efectiva y s_h es el término fuente de energía, correspondiente en este caso al calor disipado por las lámparas LED, aplicado como generación volumétrica en su zona de volumen.

Estas ecuaciones se aplican a cada uno de los volúmenes finitos, el proceso de cálculo conlleva tres etapas: definición del problema conocido como el preproceso, solución del problema definido como el proceso y el análisis de los resultados conocido como el postproceso.

Modelo numérico y condiciones de contorno

Se creo un modelo computacional tridimensional basado en las dimensiones 1.5m x 1.85m x 0.75m de la PFAL renombrada en el programa como domino del aire, realizando una discretización de lo que se quiere estudiar dentro del domino se dibujaron en 3D los doce ventiladores con una medida de 120mm de diámetro y 25mm de grosor, las lámparas Leds se ubicaron en los tres niveles representadas como superficie, la geometría de la PFAL fue

simplificada con el propósito de reducir el costo computacional y conservar los elementos relevantes para el análisis del flujo de aire. Figura 1.

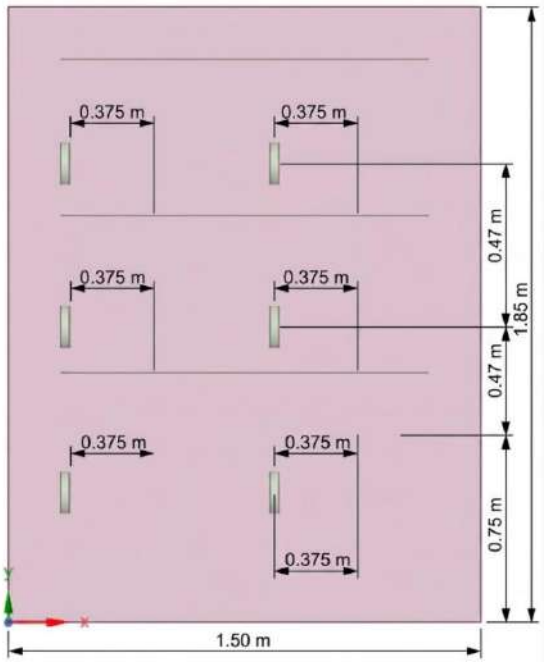


Figura 1. Generación de la geometría en el Space Claim y distancia de los puntos de medición

Generación de la malla

La discretización del dominio computacional se realizó mediante el método de elementos finitos utilizando ANSYS Meshing. Se empleó una malla no estructurada con refinamiento local creando un name selection y aplicando Sizing en las regiones donde se esperan mayores gradientes de velocidad y temperatura, particularmente en las proximidades de los ventiladores, el extractor y las lámparas. Para las superficies correspondientes a las lámparas se utilizó un refinamiento superficial, evitando discretizar innecesariamente su volumen y reduciendo el número total de elementos.

Así mismo, se verifico la calidad de la malla mediante los parámetros disponibles en ANSYS, considerando métricas como skewness y ortogonal quality, asegurando representar adecuadamente los fenómenos de flujo de aire manteniendo el numero de elementos dentro de las restricciones computacionales de la licencia utilizada, finalmente en la Figura 2 se muestra la malla constituida por 195658 nodos y 999319 elementos proporcionando una discretización suficientemente detallada del dominio computacional, la calidad de la malla se evaluó mediante los parámetros skewness con un máximo de 0.79831y un mínimo de $1.3057e^{-010}$ lo que indica la presencia de algunas celdas con mayor distorsión geométrica; sin embargo, este valor se encuentra dentro de un intervalo que permite realizar el cálculo numérico, por otra parte orthogonal quality presento un valor máximo de 0.99992 y con un mínimo de 0.22109. El valor máximo se aproxima a la condición ideal de 1, mientras que el valor mínimo evidencia la existencia de algunas celdas con menor grado de ortogonalidad.

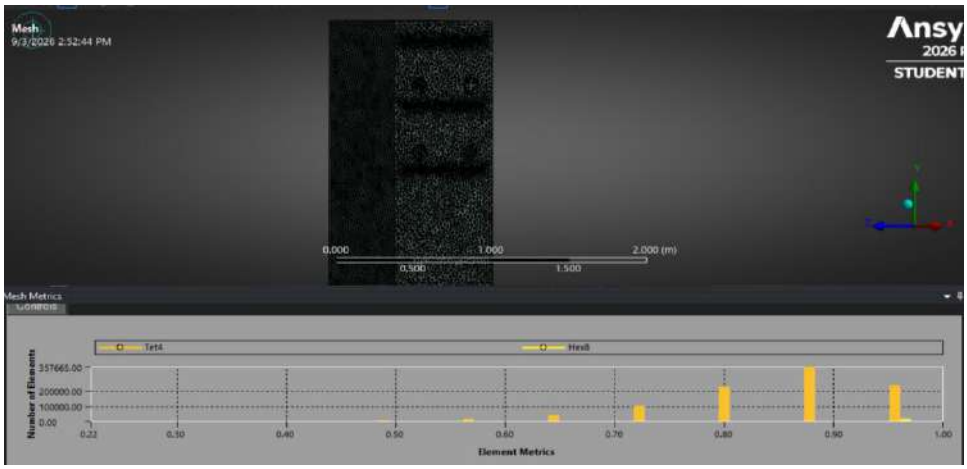


Figura 2. Mallado de la geometría y gráfica de percentiles con Orthogonal Quality con los valores máximos cercanos a 1.

Configuración del modelo CFD.

La entrada de aire al dominio y el extractor de salida, al encontrarse en la frontera exterior del dominio computacional, se definieron mediante condiciones de frontera estándar velocity-inlet y exhaust-fan, respectivamente, usando también la velocidad medida experimentalmente como dato de entrada con un valor de 4.7ms^{-1}.

El régimen de flujo se trató como turbulento, estacionario e incompresible, resolviendo adicionalmente la ecuación de energía para obtener el campo de temperatura resultante de la disipación de calor de las lámparas. Los resultados de velocidad de aire y temperatura obtenidos en los mismos puntos donde se realizaron las mediciones experimentales se compararán posteriormente para validar el modelo numérico.

Para el comportamiento del flujo de aire dentro de la PFAL se empleó el solucionador basado en condiciones estacionarias en el cual aire fue considerado como un fluido incompresible y se incorporó la ecuación de continuidad y las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento, también se representó la turbulencia con el modelo k- ω SST (Shear Stress Transport) por su desempeño en flujos internos con recirculaciones, gradientes de velocidad y efectos asociados a las superficies sólidas, resolviendo la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla * (\rho k \vec{v})(\vec{v}) = \nabla * (\Gamma_k \nabla \mathrm{k}) * \left(\tilde{G}\right) - Y_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla * (\rho \omega \vec{v}) = \nabla * (\Gamma_\omega \nabla \omega) * (G_\omega) - Y_\omega + D_\omega \quad (6)$$

donde k es la energía cinética turbulenta y la ω tasa de disipación específica; Γ representa la difusividad efectiva, G la generación, Y la disipación, y D el término de difusión cruzada propio del modelo SST.

Condiciones de frontera

Se establecieron a partir del experimento realizado de la toma de aire donde se consideró el ventilador como entrada de flujo indicando en el software como velocity-inlet y el extractor como la condición de salida exhaust-fan. Para los ventiladores internos al estar mallados como cuerpos de volumen el efecto del ventilador de introduce como una fuerza volumétrica constante en la dirección del flujo, calculada a partir de la presión dinámica asociada a la velocidad medida cuando no se dispone de su curva característica presión -caudal, sigue el principio empleado por Hurtado et al. (2021) para representar los ventiladores y aberturas de ventilación en ANSYS Fluent mediante una resistencia de flujo proporcional a la presión dinámica.

$$\nabla \mathrm{P} = \frac{1}{2}\rho_{aire} V^2 \quad (7)$$

$$s_m = \frac{\nabla \mathrm{P}}{L} \quad (8)$$

donde L es el espesor de la zona de volumen del ventilador en la dirección del flujo. Con v = 4.7 ms^{-1} y ρ = 1.225 kg/m^3.

Sustituyendo se obtiene una $s_m = 541.2\ N/m^3$ como fuente de momento aplicado de forma constante a cada ventilador interno en dirección normal a su superficie de descarga.

A continuación, se presenta Cuadro1 con las configuraciones realizadas del modelo y los métodos de solución

Cuadro 4. Configuraciones del modelo

Parámetro	**Configuración**
Solver	Pressure-Based
Regimen	Steady
Fluido	Aire
Densidad del aire	1.225 kg/m^3
Modelo de turbulencia	k- w SST
Gravedad	-9.81 eje y
Velocidad del ventilador	4.7m/s
Inicialización	Hybrid Initialization

Fuente: Elaboración propia

Criterios de convergencia

La convergencia de la solución se evaluó mediante los residuales de las ecuaciones gobernantes, cuando los residuales mostraron una tendencia descendente y las variables monitoreadas presentaron variaciones mínimas durante las iteraciones finales así mismo se verifico el balance de masa entre la entrada y la salida del dominio.

Resultados y discusión

La geometría tridimensional de la PFAL se creó representando las características principales que intervienen en el comportamiento del flujo del aire, conservando el modelo a la estructura correspondiente a los tres niveles.

En el Cuadro 2 se presentan los valores de temperaturas registrados durante el periodo de evaluación, así como el promedio obtenido para uno de los tres niveles de la PFAL, los resultados muestran una variación de la temperatura en los tres niveles, el nivel 1 se tiene un promedio de 29.65 °C, para el nivel 2 se obtuvo un promedio de 29.01 °C y para el nivel 3 presento un valor promedio de 27.81°C. Estos resultados muestran una disminución de la temperatura, estos datos son base para cuando se ingrese el modelo térmico del PFAL.

Cuadro 5. Temperatura promedio registrada en cada nivel de la PFAL durante el periodo de experimentación.

Dia	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
1	29.375	27.7625	26.3
2	30.7875	28.77125	27.175
3	29.8375	29.5625	28.3625
4	29.625	29.425	28.3875
5	29.4125	29.275	28.2
6	29.325	28.875	27.625
7	29.45	29.175	28.2375
8	29.425	29.2875	28.1625
Promedio	29.6546875	29.01671875	27.80625

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3 muestra los vectores de corriente del flujo de aire dentro de la fábrica de plantas, el flujo de aire ingreso por una entrada única del sistema de ventilación y se distribuyó y fragmentó por los tres niveles, la magnitud más presente en tono verde azul esta entre los valores de 3.65 ms^{-1} y 4.8 ms^{-1} comparado con el valor de 4.7 ms^{-1} tomado experimentalmente, se encuentra entre los valores de la simulación, los vectores muestra la velocidad que circula en un valor de 1.2 ms^{-1} mostrado en el color azul y de acuerdo conZhou et al. (2020) muestra los valores de salida de 1.1 ms^{-1} en su simulación de velocidad de aire en CFD.

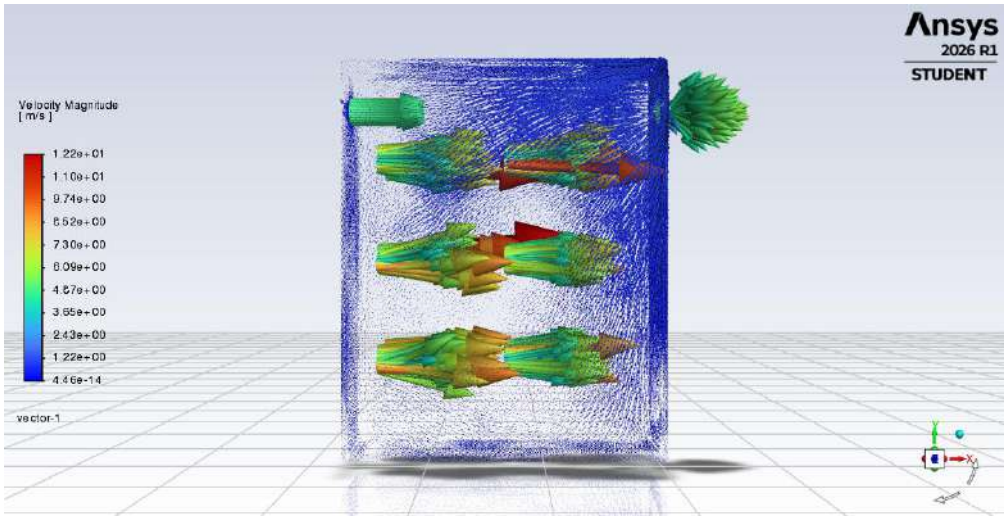


Figura 3. Vectores de flujo de aire dentro de la PFAL

Para la verificación del balance de masa se hizo una comparación de los flujos masicos en las superficies de entrada y salida del dominio computacional donde se obtuvo un flujo masico de 0.064529665 kgs^{-1} en la entrada y -0.064538176 kgs^{-1} en la salida con un flujo neto de -8.5112154e^{-06}, el error relativo de balance de masa fue de 0.0132 %. Y de acuerdo con (Simatupang et al., 2024) los criterios reportados en estudios CFD de flujo de aire toman como referencia un desequilibrio de masa inferior al 1% por debajo del criterio establecido.

Por otro lado, la Figura 4 muestra la evolución de los residuales escalados de continuidad, componentes de velocidad en *x, y* y *z* variables de turbulencia (k, ω), donde los componentes de la velocidad alcanzan una convergencia estable en *x* con un valor de $3x10^{-04}$, en con *y* $2x10^{-04}$ y en el eje z con un valor de $2x10^{-04}$, por otro lado, las variables de turbulencia k y ω se estabilizan en $5x10^{-04}$, el residual de continuidad se mantiene estable en $6x10^{-02}$. Los criterios de convergencia empleados son consistentes con los recomendados en la documentación de ANSYS, donde se indica que, para simulaciones en estado estacionario, los residuales deben reducirse al menos 3–4 órdenes de magnitud y estabilizarse(ANSYS, 2026).

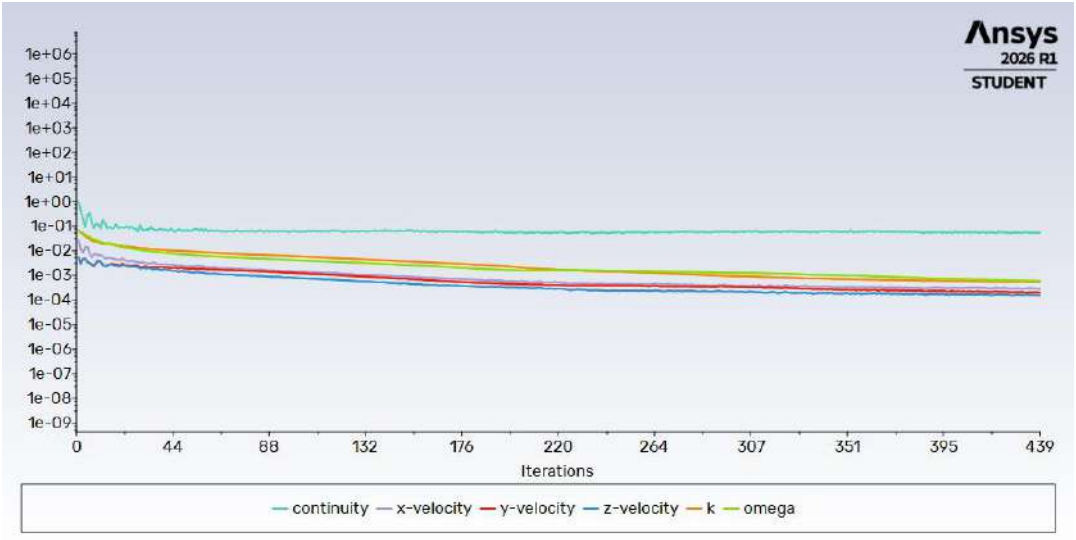


Figura 4. Evolución de los residuales con 500 iteraciones de continuidad y velocidad (x,y,z) y turbulencia en k ω.

Conclusiones

El análisis numérico en ANSYS Fluent permitió caracterizar el comportamiento del flujo del aire generado por el sistema de ventilación forzada de una fábrica de plantas con luz artificial, la simulación de la velocidad en la PFAL alcanzo convergencia adecuada en las tres componentes de la velocidad con residuales estabilizados por debajo de $4x10^{-04}$ lo que indica que el modelo es numéricamente estable donde se permitió representar de forma consistente el patrón de circulación de aire generado por el sistema de ventilación con un desbalance neto de 0.0132% respecto al caudal total de entrada, la solución mostró estabilidad parcial y la convergencia se verificó conjuntamente mediante residuales, variables monitoreadas y balance de masa, estos resultados constituyen una base numérica válido para la posterior incorporación de modelo térmico y su comparación con las mediciones experimentales de velocidad de aire temperatura registradas durante el experimento.

Literatura citada

ANSYS. (2026). *Ansys Help Center*. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/main_page.html?lang=en

Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, *13*(1), 13–26. https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054

Bournet, P.-E., & Rojano, F. (2022). Advances of Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: Research, applications and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, *201*, 107277. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107277

Carotti, L., Graamans, L., Puksic, F., Butturini, M., Meinen, E., Heuvelink, E., & Stanghellini, C. (2021). Plant Factories Are Heating Up: Hunting for the Best Combination of Light Intensity, Air Temperature and Root-Zone Temperature in Lettuce Production. *Frontiers in Plant Science*, *11*.https://doi.org/10.3389/fpls.2020.592171

Dupont, K., van Den Berg, T. E., Zhang, J., Moene, A. F., & Vialet-Chabrand, S. R. M. (2025). Beyond the boundary: a new road to improve photosynthesis via wind. *Journal of Experimental Botany*, *76*(20), 5791–5813. https://doi.org/10.1093/jxb/eraf325

Guzmán-Valdivia, C. H., Talavera-Otero, J., & Désiga-Orenday, O. (2019). Turbulent Kinetic Energy Distribution of Nutrient Solution Flow in NFT Hydroponic Systems Using Computational Fluid Dynamics. *AgriEngineering*, *1*(2), 283–290. https://doi.org/10.3390/agriengineering1020021

Hurtado, J. P., Reyes, G., Vargas, J. P., & Acuña, E. (2021). A Computational Fluid Dynamic Study of Developed Parallel Stations for Primary Fans. *Processes*, *9*(9), 1607. https://doi.org/10.3390/pr9091607

Kang, L., Zhang, Y., Kacira, M., & van Hooff, T. (2024). CFD simulation of air distributions in a small multi-layer vertical farm: Impact of computational and physical parameters. *Biosystems Engineering*, *243*, 148–174. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.05.004

Kozai. (2013). *Plant Factory in Japan-Current Situation and Perspectives*. http://www.miraibatake.net/

Lubna, F. A., Lewus, D. C., Shelford, T. J., & Both, A.-J. (2022). What You May Not Realize about Vertical Farming. *Horticulturae*, *8*(4), 322. https://doi.org/10.3390/horticulturae8040322

Norton, T., & Sun, D.-W. (2006). Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology*, *17*(11), 600–620. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.05.004

Palmitessa, O. D., Signore, A., & Santamaria, P. (2024). Advancements and future perspectives in nutrient film technique hydroponic system: a comprehensive review and bibliometric analysis. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 15). Frontiers Media SA. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1504792

Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. In *Plants* (Vol. 8, Number 2). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/plants8020034

Rodríguez-Delfín, A., de López-Herrera, A. J., Rojas-Rojas, V., García-Galindo, B. F., Molina, L., & Lima, L. M. (2022). Rendimiento de plantas de lechuga (Lactuca sativa) cultivadas con sistemas NFT modificados en tiempos de pandemia. *Current Topics in Agronomic Science*. https://doi.org/10.5154/r.ctas.01

Rong, L., Nielsen, P. V., Bjerg, B., & Zhang, G. (2016). Summary of best guidelines and validation of CFD modeling in livestock buildings to ensure prediction quality. *Computers and Electronics in Agriculture*, *121*, 180–190. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.12.005

Schuepp, P. H. (1993). Tansley Review No. 59 Leaf boundary layers. *New Phytologist*, *125*(3), 477–507. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03898.x

Shibuya, T., Tsuruyama, J., Kitaya, Y., & Kiyota, M. (2006). Enhancement of photosynthesis and growth of tomato seedlings by forced ventilation within the canopy. *Scientia Horticulturae*, *109*(3), 218–222. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.04.009

Simatupang, C. A., Strezov, V., Boontanon, S. K., Pongkiatkul, P., Boontanon, N., & Jindal, R. (2024). Numerical Analysis of Indoor Air Characteristics and Window Screen Influence on Particulate Matter Dispersion in a Childcare Center Using Computational Fluid Dynamics. *Environmental Health Insights*, *18*. https://doi.org/10.1177/11786302241259352

Tan, L., Yuan, Y., & Zhang, M. (2021). Hydraulic performance prediction and optimization of an engine cooling water pump using computational fluid dynamic analysis. *PLoS ONE*, *16*(6 June 2021). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253309

Vásquez Bermúdez, M. J., Hidalgo Larrea, J. W., Salavarría Melo, J. O., & Carchi, M. (2023). Monitoreo IoT en un Sistema Aeropónico para el cultivo de la Lechuga Orgánica. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, *4*(2). https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.618

Yabuki, K., & Miyagawa, H. (1970). Studies on the Effect of Wind Speed upon the Photosynthesis. *Journal of Agricultural Meteorology*, *26*(3), 137–141. https://doi.org/10.2480/agrmet.26.137

Yuan, X., Hu, J., Marcelis, L. F. M., Heuvelink, E., Peng, J., Yang, X., & Yang, Q. (2025). Advanced technologies in plant factories: exploring current and future economic and environmental benefits in urban horticulture. *Horticulture Research*, *12*(5). https://doi.org/10.1093/hr/uhaf024

Zhang, Y., Chen, C., Fang, H., & Tong, Y. (2025). Improving Air Distribution Within Lettuce Plant Canopy by Employing Double-Channel Ventilation Cultivation System: Simulation and Experiment Study. *Agronomy*, *15*(10). https://doi.org/10.3390/agronomy15102326

Zhang, Y., & Kacira, M. (2022). Analysis of climate uniformity in indoor plant factory system with computational fluid dynamics (CFD). *Biosystems Engineering*, *220*, 73–86. https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2022.05.009

Zhang, Y., Kacira, M., & An, L. (2016). A CFD study on improving air flow uniformity in indoor plant factory system. *Biosystems Engineering*, *147*, 193–205. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.04.012

Zhou, S., Zhang, X., He, Z., Liu, H., Liu, K., Chen, Y., Peng, F., Yang, Q., Zheng, Y., & Lu, W. (2020). Experimental validation of CFD model with the air velocity and temperature in the plant factory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *560*(1), 012089. https://doi.org/10.1088/1755-1315/560/1/012089

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

El docente en un contexto de gran influencia digital. El empleo del celular y uso de plataformas y simuladores. El caso del área de física de P.A de la UACh

Rafael Zamora Linares[1], Enrique Armando Gómez Lozoya[1], Donato Vázques Juárez[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Se aborda el contexto y el desempeño docente en un ambiente de aceleración digital, tomando como caso el área de Física de la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Se analiza el impacto de herramientas como celulares, computadoras, simuladores y plataformas digitales en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Los resultados de cuestionarios aplicados a docentes y alumnos muestran que la mayoría utiliza el celular como principal recurso, seguido de la computadora, aunque el uso de simuladores y bibliotecas virtuales sigue siendo limitado. Los maestros reconocen la utilidad de los instrumentos digitales, pero enfatizan la necesidad de supervisión para evitar distracciones y fomentar un uso responsable. Por su parte, los alumnos consideran las herramientas digitales necesarias y recurren a la inteligencia artificial para tareas e investigaciones, lo que plantea retos éticos y metodológicos. El estudio también revisa experiencias internacionales sobre la prohibición de celulares en escuelas, destacando que, aunque algunos países han optado por restringirlos, no siempre se observan mejoras significativas en el rendimiento académico. En conclusión, se subraya que la tecnología debe ser integrada de manera equilibrada, promoviendo la reflexión, el trabajo colaborativo y la responsabilidad en su uso. El docente, más que prohibir, debe guiar y enseñar a los estudiantes cómo aprovechar estas herramientas para fortalecer el aprendizaje y evitar abusos, consolidando así un modelo educativo adaptado a la era digital.

Palabras Clave: Enseñanza, Aprendizaje, Herramienta Digital

Summary

The document explores the role of teachers in a context of digital acceleration, focusing on the Physics area of the Agricultural Preparatory School at Universidad Autónoma Chapingo. It examines the impact of tools such as cell phones, computers, simulators, and digital platforms on teaching and learning. Surveys conducted with teachers and students reveal that most rely primarily on cell phones, followed by computers, while the use of simulators and virtual libraries remains limited. Teachers acknowledge the usefulness of digital instruments but stress the need for supervision to prevent distractions and encourage responsible use. Students, in turn, consider digital tools essential and increasingly employ artificial intelligence for assignments and research, raising ethical and methodological challenges. The study also reviews international experiences regarding cell phone bans in schools, noting that restrictions do not always lead to significant improvements in academic performance. In conclusion, the integration of technology must be balanced, fostering reflection, teamwork, and responsibility.

[1]Universidad Autónoma Chapingo, Preparatoria Agrícola, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México. rzamoral@chzpingo.mx, egomezl@chapingo.mx, dvasquezj@chapingo.mx

Teachers should guide students in making effective use of digital tools rather than prohibiting them, thereby strengthening learning and adapting education to the demands of the digital era.

Keyword: Teaching, Learning, Digital tool

Introducción

Estamos en una época en que la tecnología repercute en una gran parte de la sociedad y claramente está presente en la educación. En la mayoría de los recintos escolares la tendencia de hacer uso de herramientas tecnológico y digitales se enmarca en el uso frecuente de proyectores, computadoras, celulares, el uso de simuladores, bibliotecas digitales etc. La universidad Autónoma Chapingo y en particular el área de Física de la Preparatoria agrícola, no son ajenas a esta situación.
Los cursos a distancia, el uso de las TICS, las bibliotecas virtuales y los simuladores educativos en diversas áreas del conocimiento, son elementos interrelacionados en los cursos que conforman nuestra realidad educativa
Por otro lado, actualmente se ha desatado una polémica en el sentido de considerar lo importante de contar con herramientas tecnológico y digitales y aprovecharlo para el mejor desarrollo del proceso de enseñanza y aprendizaje y por otro lado la posibilidad de que con el uso de esta tecnología como el celular o la computadora pueda controlarse el ocasionar distracciones, que los alumnos escriban poco, no exista retroalimentación, o que se incrementen diferencias académicas y materiales.

Objetivo general

Analizar el papel del docente en el uso de la tecnología y particularmente, el uso del celular y la computadora en el proceso de Enseñanza- Aprendizaje, mediante información bibliográfica e indicadores obtenidos por medio de entrevistas a profesores y alumnos del área de Física para identificar ventajas y desventajas en las estrategias didácticas relacionadas con lo digital y exponer los resultados obtenidos.

Objetivos específicos

- Obtener información bibliográfica sobre recursos tecnológicos y el uso del celular
- Entrevistar docentes en relación al uso de tecnología del celular en el salón de clases
- Reconocer la situación de necesidad de manejo tecnológico y del uso del celular en el área de Física de Preparatoria Agrícola de la UACH.
- Reconocer a las herramientas tecnológico-didácticas como simulaciones de apoyo y de mejora educativa.

Metodología

1.-Obtener referentes bibliográficos relacionadas con recursos tecnológicos y el celular para el desarrollo del proceso de enseñanza y aprendizaje.
2.-Se aplicó una entrevista con una guía en donde se pregunta sobre el uso del celular, plataformas y la computadora en el salón de clase. Es decir, se trata de saber si es un problema o bien solo un distractor leve, si se aprovecha el dispositivo electrónico para complementar el curso o bien es auxiliar para trabajos y tareas.

3.-Finalmente se ordena y clasifica la información obtenida y se hacen las conclusiones respectivas.

Justificación Metodológica

Se trata de un estudio de caso, en una investigación mixta (cuanti-cualitativa), en donde la muestra es la mayoría de los integrantes de la población en estudio. Es una investigación acción porque el que estudia es parte de la muestra. Los alcances de la investigación son institucionales y es no probabilística por ser características de personas en una misma fuente de empleo, pero con particularidades y potencialidades de desarrollo propias, (San Pieri, 2014). Este instrumento se aplicará al final del semestre, Julio-diciembre de 2026 en el área de inscripción.

Marco Teórico

Hablar sobre esta temática implica, tomar puntos de vista de otros actores educativos nacionales e internacionales. Por ejemplo, Una publicación de la Escuela Preparatoria No 1 de Universidad Autónoma de Hidalgo en 2023, (Luz E. Mendoza Hernández, 2023) "El uso de Simuladores como estrategia de enseñanza- Aprendizaje en el Bachillerato", expone que los docentes apoyan que se trabaje en el proceso de enseñanza y aprendizaje usando recursos como plataformas educativas en distribución de contenidos y formas de experimentación y demostración.

Se comenta que el uso de simuladores como el PHET apoya en el área de las ciencias experimentales. Pero debe entonces quedar claro que la Introducción a la Simulación en las diferentes ciencias experimentales requiere que el docente organice su planeación y estrategia de enseñanza para generar habilidades y destrezas a partir de un entorno virtual adecuado. Se puede hablar de que el uso de simuladores implica una herramienta adicional a lo que pueda darse de manera práctica y presencial. Se busca tener elementos de autoconocimiento para el alumno. Sin embargo, sería cuestión de ver si en este contexto el alumno tenga la conciencia de compartir resultados y reflexionar en grupo, sobre la importancia de los mismos. La planeación del docente es importante para controlar el escenario presentado por las particularidades y alcances de la simulación

En los últimos años el uso de los celulares ha generado un intenso debate en la comunidad académica. Mientras algunos argumentos están en relación a que los celulares bien empleados, son herramientas de apoyo muy valiosas en el proceso de enseñanza y aprendizaje. Otros comentan que son elementos de distracción y que esto afecta el rendimiento académico.

Se resalta que el 82% de la población aprueba la prohibición de teléfonos móviles en las escuelas. Se reconocen los riesgos de la tecnología digital. Por ejemplo, la adicción y la falta de concentración.

Notas sobre el uso de celulares en escuelas de suiza y noruega.

Noruega. Prohibió el uso de celulares en el 80% de las escuelas (desde febrero de 2024) al entrar a clase los guardan en un cajo llamado hotel de teléfonos. Se comenta que los alumnos son más capaces y reflexivos.

Sin embargo, los alumnos dicen sentirse inseguros y han perdido comunicación con sus padres. La distracción digital de los estudiantes y su profesores son motivos para la prohibición en centros educativos.

Pero hay otras investigaciones que no coinciden con la prohibición de los celulares. Consideran que la prohibición de celulares no tienen un impacto significativo en el desempeño académico, ni en la reducción del ciberacoso escolar. Puede haber limitación en la comunicación entre

padres e hijos y la preocupación por seguridad. Por ejemplo, en Suecia muestran pocas diferencias en cuanto a calificaciones de estudiantes antes y después de prohibir el uso del celular.

Y ¿que se debe o puede hacer? Existe la necesidad de adaptarse a las nuevas tecnologías ya que han llegado para quedarse y no pueden ser prohibidas por completo.

Es importante adaptarse a la tecnología de manera equilibrada al docente y al alumno. La Dra. Verónica María del Consuelo Alcalá Herrera de la facultad de Psicología de la UNAM, comenta:

" Si analizamos detenidamente a las investigaciones , es claro que , las variables utilizadas quizás no sean las mas adecuadas", por ejemplo, como se evalúa el rendimiento escolar, como se mida el uso del celular en el aula y sus consecuencias" Prohibir No. Mejor enseñar para que sirve.

Es importante que el alumno comprenda que, aunque el celular es una herramienta útil. No debe utilizarse durante las clases si no se requiere y su uso irresponsable y puede afectar su propio aprendizaje como el de sus compañeros y su relación o comunicación con sus padres.

Los Simuladores

En relación con el uso de simuladores como estrategia de aprendizaje en niveles educativos como el Bachillerato, Mendoza (2023), nos aporta que, la educación actual requiere del uso de recursos digitales y estrategias innovadoras que facilitan el proceso de enseñanza y aprendizaje además, aprovechan los avances científicos y tecnológicos para lograr cumplir objetivos educativos.

El uso de simuladores en asignaturas como Física, Química, Biología o Matemáticas es importante como herramientas de apoyo. Es el caso de Phet.

En el siguiente esquema, podemos apreciar los beneficios del uso de simuladores

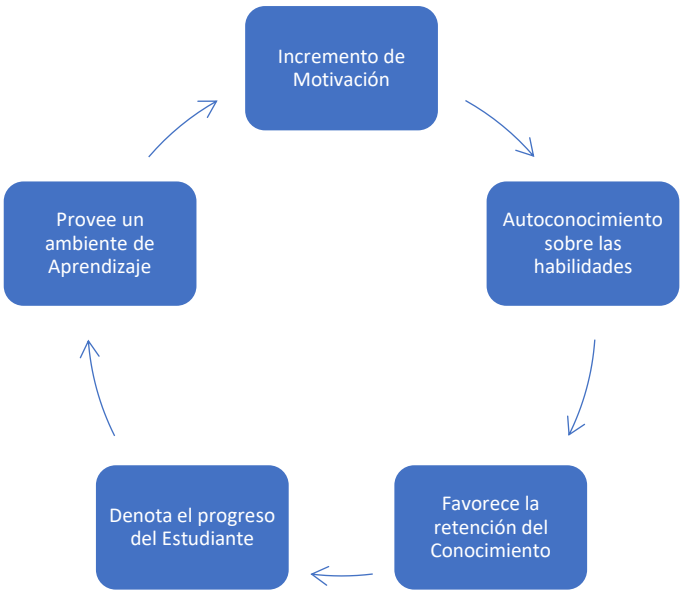


Figura 1. ITESM (2016)

También, es claro que actualmente se tiene la presencia de la Inteligencia Artificial (I.A) en la sociedad y lógicamente en el plano educativo.

El alumno tiene la posibilidad de hacer sus tareas, trabajo e investigaciones, con esta herramienta. El tener este instrumento educativo tan cercano, en un celular o computadora permite mejorar el desarrolla para lograr el cumplimiento de tareas específicas. Permite también que el docente aproveche estas herramientas para lograr los objetivos educativos que

seguramente incluyen conocimientos, razonamientos y formas de compartir información. Se trata entonces que el docente conozca hasta donde el alumno se debe involucrar y actuar de manera individual y como equipo de trabajo.

La importancia o de la inteligencia artificial en el desarrollo en los trabajos académicos y en investigaciones desarrolladas en las diferentes asignaturas han revolucionado la forma de trabajar el marco educativo. Se puede tener facilidad para trabajos y tareas. Sin embargo, el papel del docente adquiere una importancia aun mayor para jerarquizar la información que se procesa y la forma en que se debe reflexionar y concretizar lo investigado y lo que se aprovecha de la información. Estamos en una época en que se puede observar si hay abusos en el aprovechamiento de la información y fraudes que se convierten en cuidados para trabajar de manera más honesta con la presencia de la I. A

El uso del celular concentra muchas de las propiedades de la tecnología actual, logrando con él, una gran cercanía a las herramientas de la comunicación, la educación, la economía, la ciencia, los deportes, etc. Sin embargo, puede ser también, una gran fuente de distracción que debe ser supervisado y limitado al menos en el salón de clases.

El uso del celular en la escuela tiene ventajas y desventajas educativas, sociales y de seguridad. Este dispositivo, permite la búsqueda de información, el uso de herramientas tecnológicas, el registro de actividades y de revisión de contenidos. También, facilita el trabajo en equipo, la comunicación con los padres y el manejo de ansiedades. (Cruz J.J. (2025)). Sin embargo, el uso del celular debe ser supervisado por el docente para evitar distracciones y abusos. Se ha documentado que 9/10 alumnos a nivel preparatoria tienen celular y el 88% de los alumnos de preparatoria que tienen celular siempre van con él a la escuela. Según (Hernández, Capetillo y Soto, 2024) en una entrevista a los alumnos, indico que el uso de redes sociales en el aula si afecta “un poco” sus calificaciones, 12% señalo que afecta mucho y 2% muchísimo y 39% dijo que nada. Lo cual contrasta con lo que dicen sus profesores.

Según los datos de la UNESCO al 25 de enero, un total de 79 países ha implementado medidas para limitar el uso de celulares en la escuela (Herrera P. 2025)

En los últimos años, la sociedad ha avanzado en el área de la tecnología y particularmente en el proceso de enseñanza aprendizaje. En este sentido el estudiante se convierte en mayor protagonista, aunque el docente no debe ser ajeno en el entendimiento y manejo de estas herramientas tecnológicas. Se trata de aprovechar los conocimientos que se tienen sobre las herramientas didácticas en condiciones de tecnología de avance rápido. Parte de la teoría del aprendizaje resalta que se puede pretender formar un alumno constructivista buscando significado y promoviendo un aprendizaje situado, promueven el uso de las TICS. (Romero, T 2023)

Se trata entonces de proyectar un estudio sobre el uso de la tecnología en el proceso enseñanza aprendizaje. Para ello, plantearemos una encuesta a docentes y a estudiantes que nos permitan construir referentes de opinión sobre el papel del profesor y la opinión de los alumnos. También se hará una revisión bibliográfica que nos permita opiniones más respaldadas y coherentes.

Referentes sobre Simulaciones

En relación con el uso de simuladores como estrategia de aprendizaje en niveles educativos como el Bachillerato, Mendoza (2023), nos aporta que, la educación actual requiere del uso de recursos digitales y estrategias innovadoras que facilitan el proceso de enseñanza y aprendizaje y aprovechan los avances científicos y tecnológicos para lograr cumplir objetivos educativos.

En la revista ciencia latina: Nos muestra que la abundancia de uso de herramientas digitales en niveles iniciales dentro del aula, es un gran desafío para los docentes en la actualidad, se

pretenden alcanzar aprendizajes significativos, tratando de mejorar las estrategias en donde los elementos digitales estén presentes.

Obtención de Datos Indicadores

A partir de: Cuestionario para Docentes del Área de Física de PA de la UACH

1. Uso del celular, computadora u otros, en el desarrollo de sus cursos

A).- Celulares (5/20) B).-Computadora + Celular (10/20) C.- Otros (5/20)



Figura 2. Elaboración propia: Se aprecia que, en los profesores, la herramienta que más sirve de apoyo es también el celular, pero, el respaldo del trabajo en la computadora o tabletas es importante.

2.- Uso del celular para transmitir información de los cursos

A) (13/20) Si. B).- (5/20) No C (2/20) en Ocasiones

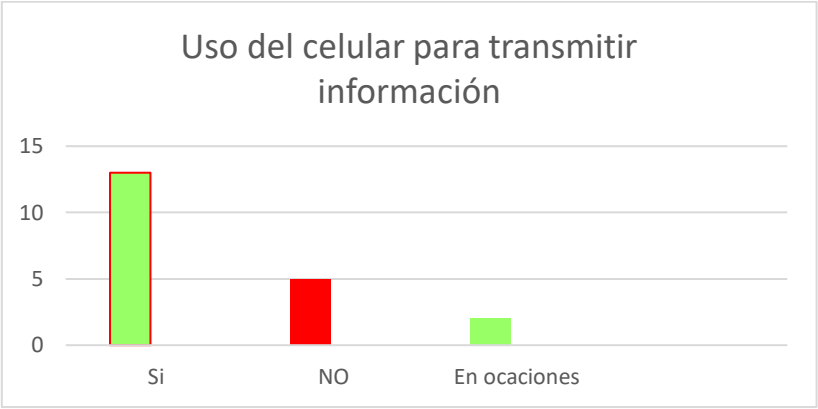


Figura 3. Elaboración Propia. Se puede apreciar que los docentes tienen como principal al celular. También, la computadora es referente

3. Uso de Simuladores para avanzar en sus cursos

A) (5/20) Si B) (15/20) No Gráficamente:

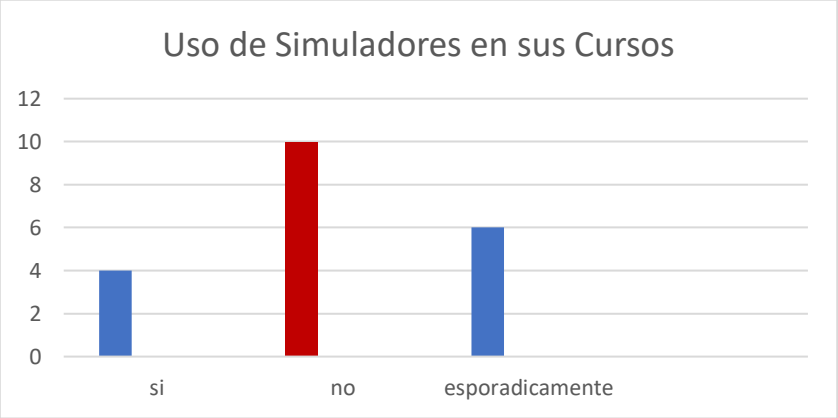


Figura 4. Elaboración Propia. El uso de simuladores es una situación que se empieza a concretizar, sin embargo, Aun se trabaja con herramientas más tradicionales.

4. ¿Utiliza usted Bibliotecas Virtuales en sus cursos?

A) Si (3/20) B) (7/20) muy Poco C) (10/20) NO

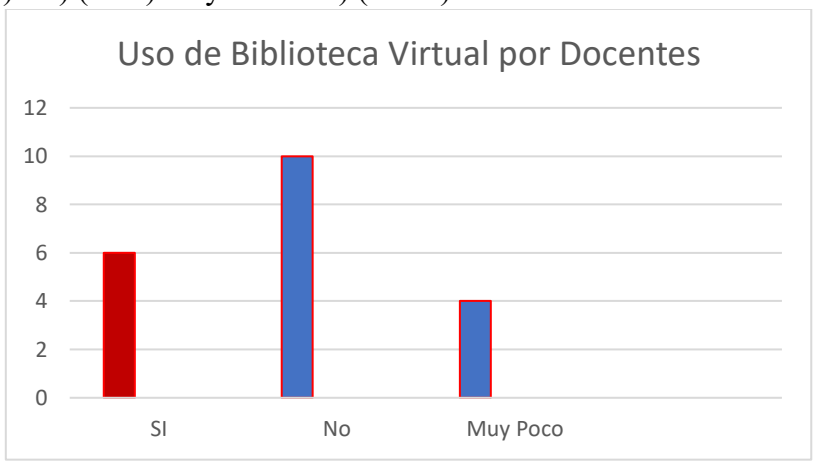


Figura 5. Elaboración Propia. El Uso de bibliotecas virtuales aun no son tan populares y los profesores prefieren trabajar en la mayoría de los casos con la bibliografía predestinada.

5. Opinión sobre el uso de Instrumentos Digitales

A) Necesario pero con supervisión (15/20) B).-Útiles (4/20) C) Por revisar (1/20)

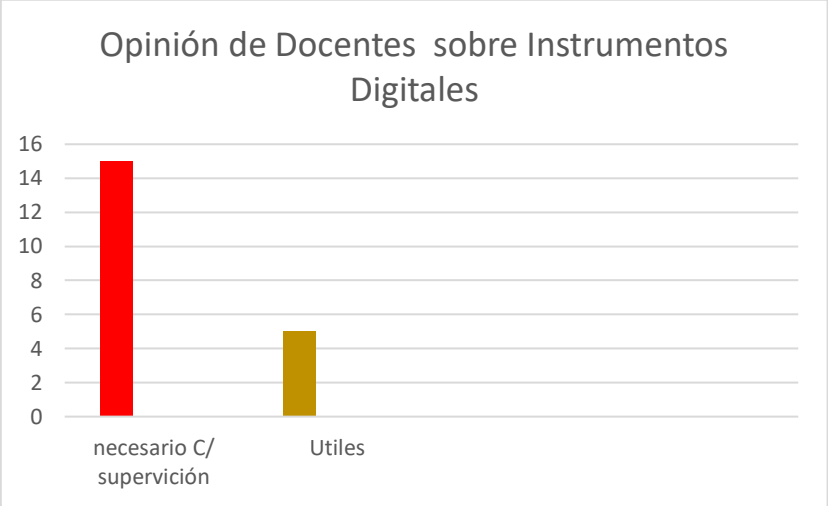


Figura 6. Elaboración Propia. Los docentes reconocen los instrumentos digitales como herramientas de apoyo útiles y necesarios. Sin embargo, se aclara la necesidad de supervisar el trabajo del alumno al usarlos.

6. ¿Tiene registrado algún programa de I,A en su computadora o Celular?
   A) Si (12/20) B) No (8/20)

Cuestionario Para Alumnos del Área de Física

RESPUESTAS

1. ¿De qué dispositivos se apoya el alumno para avanzar en sus cursos?
   A) Celular (80/100) B). Celular +Computadora (20/100)

2. ¿En qué casos o situaciones utilizas la computadora para el desarrollo de los cursos de Física?

   A) (70/100) Reportes e investigaciones B) Tareas y graficas (20/100) C (10/100) no tienen computadora usan el celular.

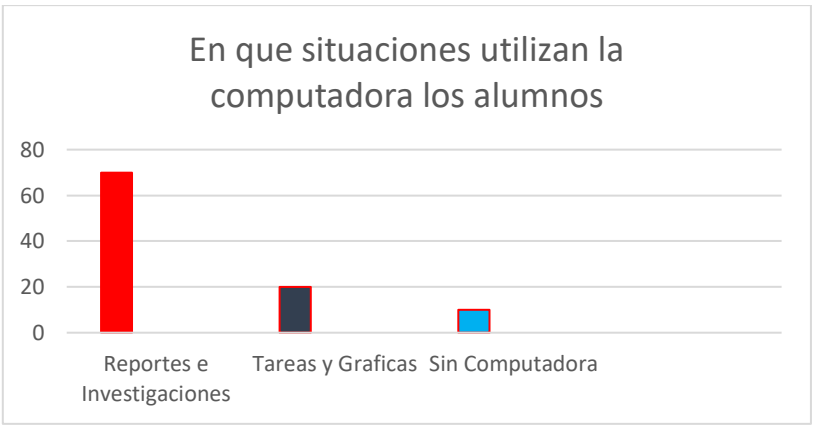


Figura 7. Elaboración Propia. Los alumnos saben que con el uso del celular y la computadora se puede trabajar en forma individual y en grupo en el avance de sus cursos.

3. ¿Te has apoyado en Bibliotecas Virtuales para hacer tareas o investigaciones relacionadas con tus cursos?

A) (80/100) No B) 20/100) Si

4. ¿Que opinas de las herramientas digitales?

A) (85/100) son buenas y necesarias B (15/100) Son útiles

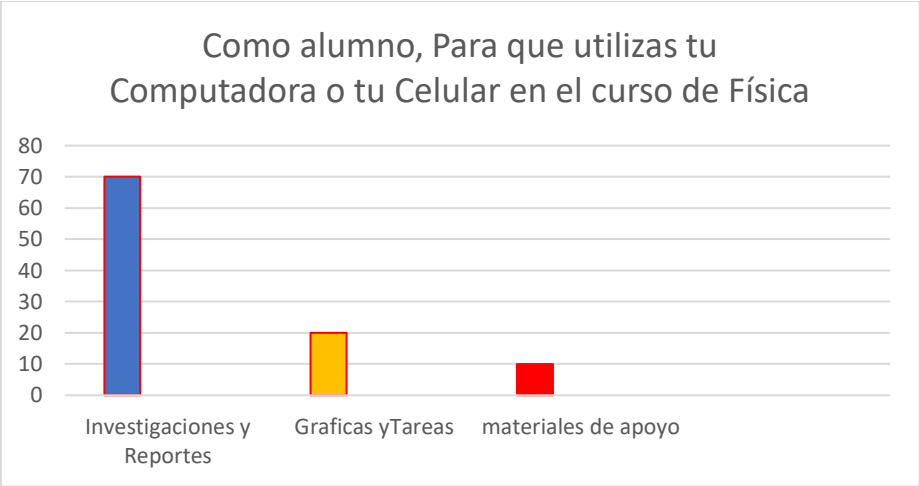


Figura 8. Elaboración Propia. Los alumnos utilizan sus herramientas digitales para Investigaciones y reportes además de sus tareas

5.- Que sabes de la Inteligencia Artificial (I.A)

A (60/100) Herramienta de apoyo B) (35/100) Programas para trabajar tareas y reportes C (5/100) No sabe

6.-Utiliza algún tipo de I.A.?

A).(60/100) Si GPT B) (40/100) No

Se pretende obtener información para reflexionar sobre el Papel del Docente en este contexto de influencia tecnológico digital y su natural relación con la educación.

Conclusiones

Los docentes en su mayoría están conscientes de que el uso de tecnología es el proceso de enseñanza aprendizaje es una realidad que por un lado permite facilitar ejemplos temáticos, conocimientos relativos adicionales, manejo adecuado de los datos gráficos, etc. Por otro lado, el comentario de que los alumnos se distraen a la hora de trabajar con este tipo de herramientas (celulares y computadoras portátiles).
Los profesores están en el proceso de utilizar herramientas como bibliotecas virtuales e incluso Inteligencia Artificial. Sin embargo, lo que más utilizan son los celulares con información preestablecida, las computadoras y tabletas. También existen profesores que se apoyan en plataformas educativas como la Phet para trabajar con simulaciones relacionados a las temáticas establecidas.

El profesor está claro en qué se debe procurar la reflexión para los alumnos, además, de promover el trabajo en equipo. Por lo que debe equilibrar manejo de las herramientas tecnológicas y digitales y por otro lado el trabajo cercano con los alumnos en el seguimiento de herramientas como el celular y la computadora.
Se puede comentar que algunos docentes prefieren enseñar y fomentar el respeto, antes que prohibir el uso del celular. También se debe resaltar el hacer un buen uso de la tecnología para mejorar la adquisición de datos e indicadores para lograr un avance en los cursos de Física.
Es importante adaptarse a la tecnología de manera equilibrada y cercana al docente y al alumno,

Literatura Citada

Álvarez C. Del Arco I (2024) Prohibición del Móvil en Centros Educativos. España. Revista complutense de Educación.

Herrera P. (2025) Celulares en las Aulas: ¿Herramienta Educativa o Distracción? México. UNAM

Mendoza, Luz E. (2023) El uso de Simuladores como Estrategia de Enseñanza-Aprendizaje en el Bachillerato. UAEH. UNO Sapiens. . México. Boleta Científica de la Escuela preparatoria 1

Pascuas-R (2020) Dispositivos Móviles en la Educación: Tendencias e Impacto para la Innovación. Florencia, Colombia. Universidad de la Amazonia

Rivera P. Borja M. (2023) Digitalización de los Centros Educativos y Uso de Teléfonos Móviles en el Aula. España. REICE 2023.

Rodríguez K. (2022) El uso de Celulares como Herramienta Educativa. México, Milenio.

Romero. D.T (2023) Uso de las TIC en la Enseñanza de la Física en la Secundaria de Nicaragua. Nicaragua, Universidad Autónoma de Nicaragua

San Pieri, R (2014). Metodología de la Investigación. México, MC Graw Hil

Villamarin K (2023) Herramientas Digitales para Preparatoria. Ecuador, Universidad Tecnológica de Guayaquil

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Predicción del caudal medio diario del Río Tequisistlán, Oaxaca, México mediante el uso de redes neuronales artificiales

Ricardo Álvarez López[1], Laura Alicia Ibáñez Castillo[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La complejidad del proceso lluvia escurrimiento hace que la necesidad de estimación y predicción de esta variable sea tema de suma importancia en la hidrología, uno de los métodos recientes y de continuo desarrollo es el de las redes neuronales artificiales. En este trabajo se hace uso de una red NARX para predecir el caudal del Río Tequisistlán, Oaxaca, México, en el punto de aforo correspondiente a la estación hidrométrica 22015 Tequisistlán, mediante datos meteorológicos (2001-2014) de tres estaciones dentro de la cuenca delimitada hasta dicho punto de aforo. Las variables de entrada a la red son en total 9, contemplando la precipitación, la temperatura máxima y mínima en tres estaciones meteorológicas, se consideró una capa oculta donde el número optimo de nodos resulto de 5, se consideró un retraso de capa de entrada a capa oculta de [0 1] y un retraso de [1 2] de capa oculta a capa de salida. El entrenamiento de la red obtuvo un RMSE= 23.3430, una eficiencia de EF=0.6692 y un R^2=0.7198. La red entrada permite el pronóstico aproximado de los escurrimientos medios y bajos que se pueden producir por lluvias normales, tendiendo a dar predicciones erróneas de caudales de alta magnitud causados por lluvias excedentes.

Palabras clave: predicción, escurrimiento, red NARX, variables meteorológicas, Río Tequisistlán.

Abstract

Due to the complexity of the rainfall-runoff process, estimating and predicting this variable is a matter of importance in hydrology; artificial neural networks represent one of the recent and continuously evolving methods used for this purpose. In this study, a NARX network is employed to predict the discharge of the Tequisistlán River in Oaxaca, Mexico, at the gauging point corresponding to hydrometric station 22015 Tequisistlán, using meteorological data (2001–2014) from three stations within the basin delineated up to the gauging point. The network utilizes a total of nine input variables, including precipitation and maximum and minimum temperatures from the three meteorological stations; a hidden layer with an optimal number of five nodes was used, along with an input-to-hidden layer delay of [0 1] and a hidden-to-output layer delay of [1 2]. Network training yielded an RMSE= 23.3430, an efficiency EF = 0.6692, and an R^2= 0.7198. The network allows forecasting of average and low magnitude runoff levels resulting from normal rainfall, though it tends to produce erroneous predictions for high-magnitude flows caused by excessive rainfall.

Keywords: prediction, runoff, NARX network, meteorological variables, Río Tequisistlán.

[1]Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México, C.P. 56230

Introducción

El escurrimiento superficial es influenciado por factores humanos y naturales en procesos no lineales y no estacionarios con características complejas que varían en el tiempo (Nourani et al., 2014). El obtener predicciones del flujo en un río es de gran significancia para el manejo de recursos hídricos, en el control de caudales para la reducción de desastres y la generación de energía (Zhang et al., 2022). Analizando y aplicando la conservación del agua basada en los descubrimientos más recientes en el área de la información, es una meta mayor del desarrollo de la ingeniería hidráulica inteligente para dar soluciones (Yang et al., 2023). De acuerdo con Besaw et al. (2010), la estimación de caudales en área aforadas o no aforadas pueden ser desarrolladas con métodos en base conceptual, métrica, de base física y basada en datos.
Los modelos basados en datos son empíricos, se desarrollan a partir de datos históricos y no requieren información de procesos físicos (Liu et al., 2015). La regresión lineal múltiple (MLR), variaciones de la regresión por media móvil (ARMA) o redes neuronales artificiales (ANN) son ejemplos de modelos basados en datos. Las redes neuronales artificiales son un tipo especial de métodos de machine learning, las cuales han sido usados extensamente en la estimación de escurrimientos con resultados prometedores en la ultima década debido a la no linealidad natural de la relación lluvia-escurrimiento y la disponibilidad de registros históricos extensos (ASCE, 2000).
En la revisión escrita por Maier et al. (2010) se menciona que de 21 artículos publicados usando ANN en el campo de la hidrología entre 1990 a 2007, el 90% son relacionados a estudios con meta a predicción de caudales, el restante es relacionado a variables de calidad. En los últimos años, los hidrólogos han continuado investigando la capacidad de las redes neuronales (NN) para predecir caudales en ríos. Esta gran variedad de estudios que se pueden encontrar en la literatura permite inferir que este tipo de modelos han sido muy utilizados en las ciencias hidrológicas, representando una herramienta prometedora para aplicarse bajo diferentes condiciones; sin embargo, la gran mayoría de estudios, la existencia de soluciones diferentes, y en ocasiones, la vaga descripción de soluciones y la dispersión de información causa que la curva de aprendizaje sea difícil y tardada (Oliveira et al., 2023). En este trabajo se propone utilizar una es Red Autorregresiva no Lineal con Entrada Exógena (NARX), para predecir el caudal del Rio Tequisistlán, Oaxaca, México, en el punto de aforo correspondiente a la estación hidrométrica 22015 Tequisistlán, mediante datos meteorológicos, evaluar su entrenamiento con parámetros estadísticos y analizar su efectividad de predicción.

Materiales y Métodos

El área de estudio se encuentra en la Región hidrológica 22 Tehuantepec, Oaxaca, México, en la Región hidrológica administrativa V Pacífico Sur, la cuenca RH23Be o el Marques tiene como afluente el Río Tequisistlán, aguas abajo se encuentra la presa Benito Juárez o el Marques. Abarca principalmente parte de los municipios San Carlos Yautepec, Magdalena Tequisistlán, Santa María Ecatepec, Santa María Quiegolani, Asunción Tecolulitla, San Carlos Yautepec, San Juan Lajarcia (INEGI, 2025). El área de la cuenca es de 2,251.099 km^2.
La temperatura en la cuenca va de 10 a 18 °C en las partes altas y de 20 a 28 °C en las partes bajas. La precipitación va de los 800 a los 1500 mm sobre la cuenca. Los climas más comunes son semiseco muy cálido (BS1(h')w(w)), semicálido muy húmedo (A(C)w0(w)), y templado subhúmedo (C(w2)(w)).

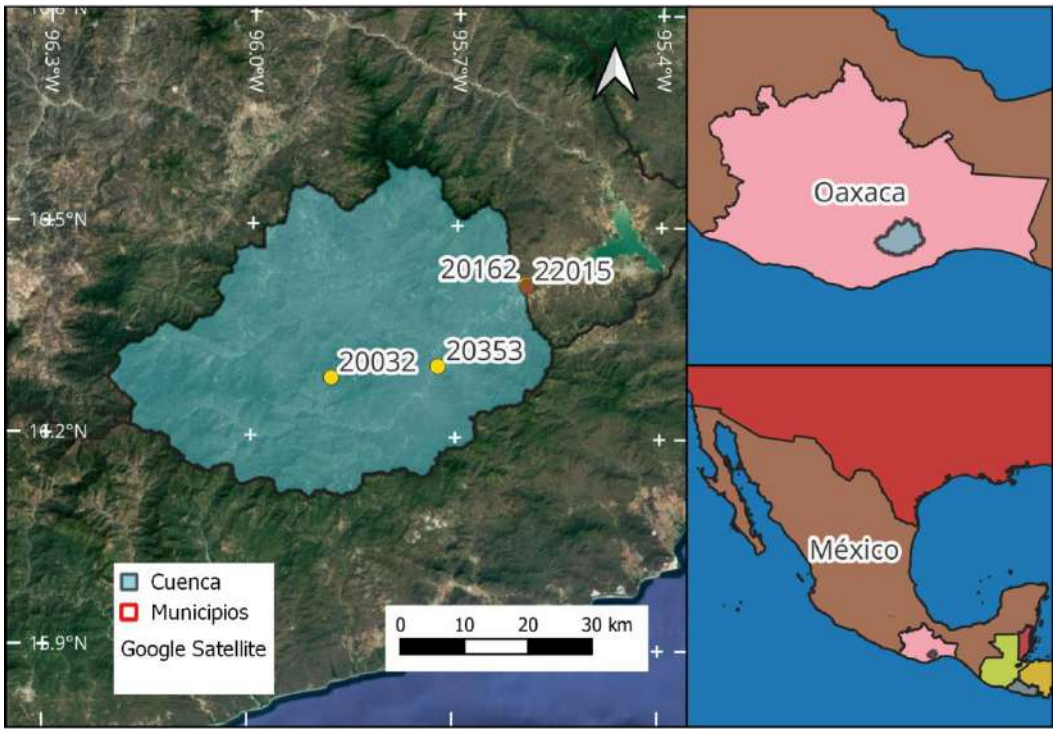


Figura 5. Ubicación de la cuenca RH23Be o El Marques.

Para predecir los escurrimientos en el punto de aforo mediante una red neuronal se obtuvieron los datos de precipitación (mm), temperatura máxima y mínima (°C) de tres puntos correspondientes a estaciones meteorológicas dentro de la cuenca, así como los datos de escurrimiento medidos en la estación de aforo (m^3/s), todos en el periodo 2001-2014 para cubrir la serie actual más larga de escurrimientos posible sin datos faltantes. Los datos meteorológicos correspondientes a dos estaciones, la 20353 Tlacolulita y 20162 Tequisistlán se descargaron del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (SMN, 2025); para la estación 20032 Santa María Ecatepec, las variables de precipitación, temperatura máxima y mínima se obtuvieron de la plataforma Climate Engine (Huntington et al., 2017), específicamente del modelo DAYMET (Thornton et al., 2022) a resolución espacial de 1.0 km. Los datos hidrométricos de escurrimiento se obtuvieron del catálogo de estaciones hidrométricas del Sistema de Información Hidrológica (SIH) de Conagua (Conagua, 2026) para la estación 22015 Tequisistlán. Los datos de las estaciones se muestran en la Tabla 1.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas y estación hidrométrica usadas.

Clave	Latitud	Longitud	Nombre	Municipio	Elevación (msnm)	Inicio de serie	Final de serie
20032	16.2830556	-95.8830556	Santa María Ecatepec	Santa María Ecatepec	1869	1/1/2001	31/12/2014
20162	16.4175000	-95.5988889	Tequisistlán	Magdalena Tequisistlán	182	1/1/2001	31/12/2014
20353	16.3005556	-95.7266667	Tlacolulita	Asunción Tlacolulita	353	1/1/2001	31/12/2014
*22015	16.4138890	-95.5972220	Tequisistlán	Magdalena Tequisistlán	170	1/1/2001	31/12/2014

Estación hidrométrica marcada con *.

Los datos faltantes de las series obtenidas del SMN se generaron a partir del método del inverso de la distancia y los faltantes de la estación 20032 se generaron con la función "pchip" de MATLAB (Mathworks, 2026). La serie de escurrimientos medidos no presento datos faltantes en el periodo seleccionado. La serie de precipitación se revisó para evitar la presencia de precipitaciones negativas, y datos anormales que sean posible identificar viendo las gráficas de cada variable.

La red seleccionada para realizar la predicción de escurrimientos es una Red Autorregresiva no Lineal con Entrada Exógena (NARX), la red se probó con diferentes configuraciones de número de nodos o neuronas en la capa oculta, los diferentes criterios para la determinación de los números de nodos se muestran en la tabla 2.

Cuadro 2. Criterios utilizados para la determinación del número de nodos en la capa oculta.

Criterio	Método	No. De nodos
Primero	Regla de la pirámide Geométrica	3
Segundo	Promedio entre la capa de entrada y salida	5
Tercero	Regla Empírica	9
Cuarto	Teorema de Kolmogorov	19

Se estableció un tiempo de retraso de [0 1] de la capa de entrada a la capa oculta y de [1 2] de la capa oculta a la capa de salida. Se utilizó la tangente sigmoidal (tansig) como función de transferencia de las entradas a la capa oculta y la función de transferencia lineal (purelin) para la capa oculta a la capa de salida. Se utilizo el algoritmo de optimización de Levenberg-Marquardt (trainlm) para el entrenamiento y el algoritmo del Gradiente con Momento (learngdm) como función de aprendizaje. El Error Cuadrático Medio (MSE) y la Eficiencia de Nash (EF) se utilizaron como medida del error, así como se fijó 1000 iteraciones como límite del entrenamiento. Toda la configuración de la red se realizó en MATLAB.

Resultados y discusión

En el entrenamiento de la red con los diferentes números de nodos en la capa oculta para diferentes segmentaciones de la serie de datos, se obtuvo los mejores parámetros considerando 7 años de datos para el entrenamiento de la red y 7 años para la validación, los resultados se muestran en la tabla 3 para la fase de entrenamiento y en la figura 2 la gráfica de Eficiencia de Nash (EF) vs Error Absoluto Medio (MAE). La iteración con 15 nodos se decidió realizar para contemplar un punto intermedio entre el numero dado por el tercer y cuarto criterio.

Cuadro 3. Métricas estadísticas para evaluación del entrenamiento de la red a diferentes números de nodos en la capa oculta.

Criterio	Nodos	Media	MSE	EF	R^2	RMSE	MAE
Primero	3	8.2555	184.6079	0.6896	0.8324	13.5870	6.1097
Segundo	5	8.2255	137.5227	0.7686	0.8027	11.7270	4.4635
Tercero	9	8.2255	132.3075	0.7773	0.9126	11.5025	5.4564
	15	8.2555	160.1297	0.7305	0.7971	12.6542	4.3043
Cuarto	19	8.2555	140.3574	0.7638	0.8202	11.8473	4.0990

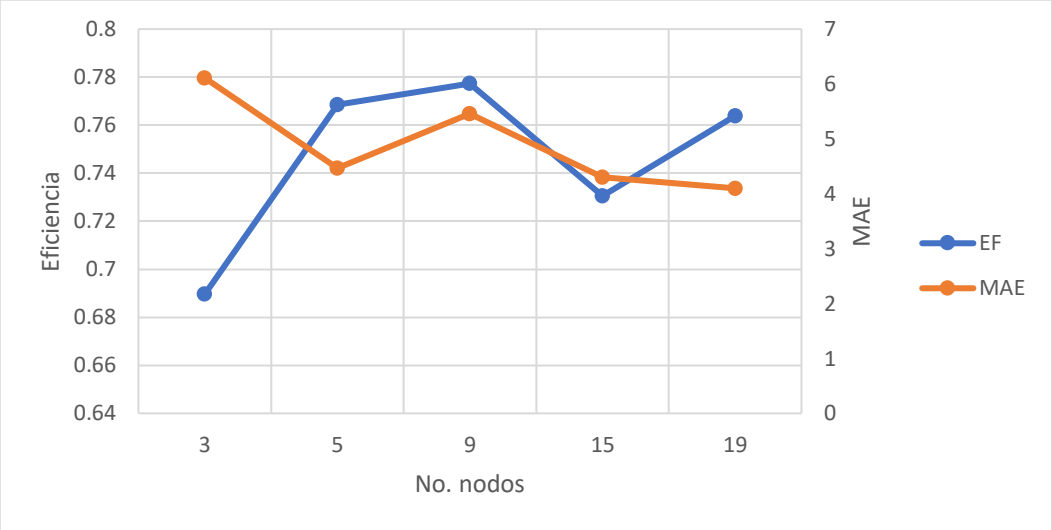


Figura 6. EF y MAE de la red NARX con diferentes números de nodos en capa oculta.

Al ser 5 nodos en la capa oculta la cantidad donde la red obtiene un MAE bajo y una eficiencia alta, se tomó esta como la cantidad optima de nodos en capa oculta.
El entrenamiento con 5 nodos y la configuración indicada anteriormente se muestra en la figura 3 en la gráfica 1 a 1.

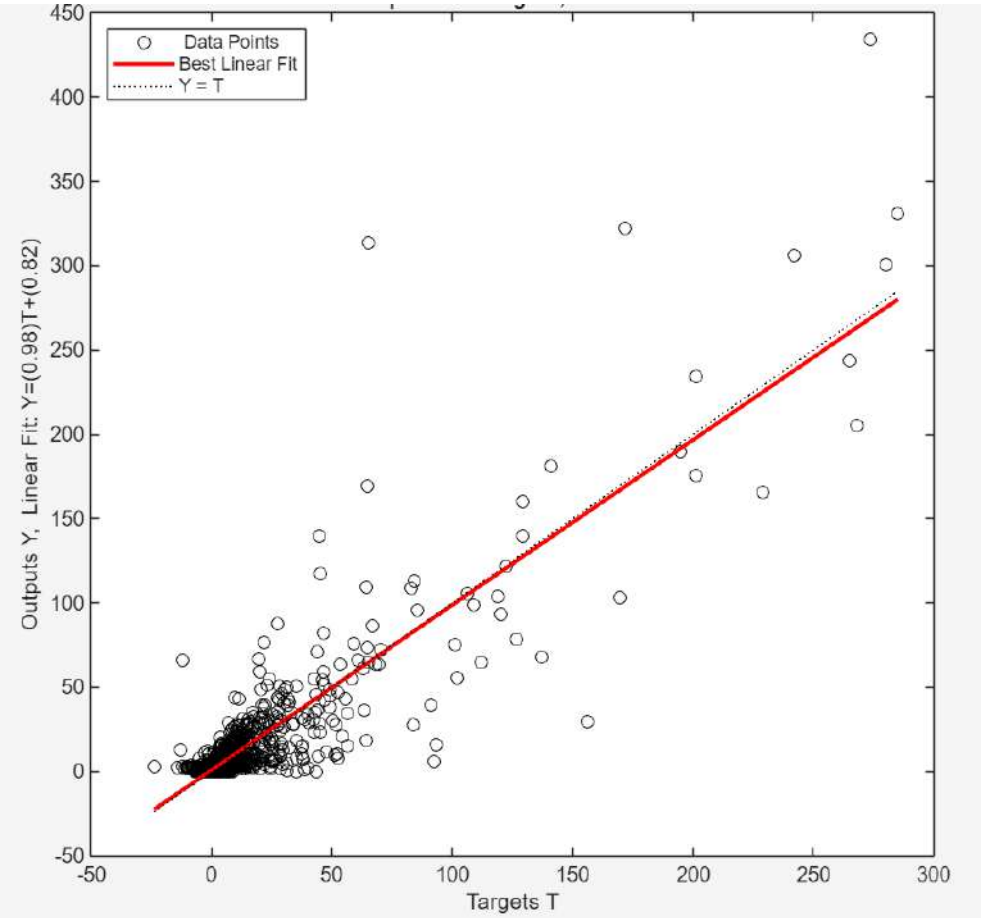


Figura 7. Gráfica 1 a 1 entre los escurrimientos simulados (Y) y los medidos (X) durante el entrenamiento de la red NARX con 5 nodos en la capa oculta y [0 1] [1 2] tiempos de retraso.

Durante la fase de evaluación, realizada con los 7 años restantes de la serie de datos (datos no

vistos por la red), se obtiene los siguientes parámetros estadísticos.

Cuadro 4. Estadísticos obtenidos en fase de validación.

Fase	Nodos	Media	MSE	EF	R2	RMSE	MAE
Validación	5	16.3497	554.8948	0.6692	0.7198	23.3430	8.4171

Moriasi et.al (2007) menciona que el modelo usado para simular cuencas puede juzgarse como satisfactorio si la EF>0.50, por lo que teniendo un EF=0.6692 en la validación, se puede considerar que la red neuronal entrenada es satisfactoria.
El R=0.7198 muestra un ajuste aceptable de los datos medidos con los simulados, indicando que la red NARX logra representar buena parte de la variabilidad del comportamiento de los datos de escurrimiento. Los escurrimientos medidos graficados junto a los simulados a través del tiempo en la figura 4, muestran que la red no representa de manera correcta los caudales pico como el ocurrido el 09/04/2010, aunque aproxima de buena manera los anteriores y posteriores a estos eventos.



Figura 8. Caudal escurrido medido y caudal escurrido simulado de gran magnitud, fase de validación de la red.

Es posible observar que la red representa de buena manera caudales de baja magnitud, como el dato 1590 correspondiente 07/16/2011 y el del 09/06/2011 del dato 1643 en la figura 5.

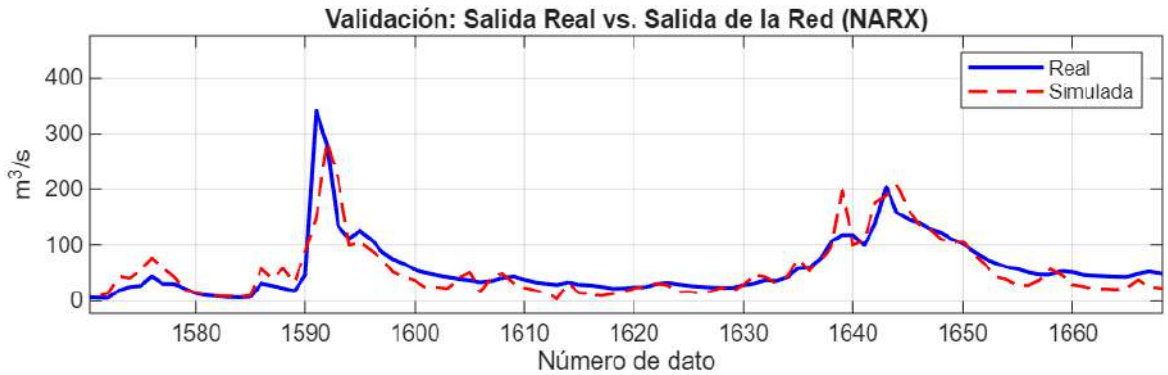


Figura 9. Caudal escurrido medido y caudal escurrido simulado de baja magnitud, fase de validación de la red.

Esto indica que la red entrenada puede ser usada para predecir caudales bajos y medios causados por lluvias no excedentes con buena precisión, pero el pronóstico de caudales altos puede tener un alto margen de error de predicción.

Conclusiones

Es posible entrenar una red que presente buenas estadísticas de ajuste de datos simulados y medidos para predecir escurrimiento superficial de una cuenca a partir de datos meteorológicos. La cantidad de datos de entrada debe delimitarse a puntos correspondientes a estaciones meteorológicas de forma que se logre representar la superficie de la cuenca, así como las variaciones de elevaciones y vegetación. La red NARX entrenada es de utilidad para representar escurrimientos de baja y media magnitud, pero subestima escurrimientos de alta magnitud causados por lluvias excedentes, lo cual puede ser de utilidad en predecir escurrimiento superficial usado para planeación del aprovechamiento hídrico, pero se descarta su uso para prevención de eventos que puedan presentar riesgos de inundación.

Literatura Citada

Revistas científicas

ASCE, N. (2000). Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts. Journal of Hydrologic Engineering, 5(2), 115–123. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(115)

Besaw, L. E., Rizzo, D. M., Bierman, P. R., & Hackett, W. R. (2010). Advances in ungauged streamflow prediction using artificial neural networks. Journal of Hydrology, 386(1), 27–37. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.037

Huntington, J. L., Hegewisch, K. C., Daudert, B., Morton, C. G., Abatzoglou, J. T., McEvoy, D. J., & Erickson, T. (2017). Climate Engine: Cloud Computing and Visualization of Climate and Remote Sensing Data for Advanced Natural Resource Monitoring and Process Understanding. Bulletin of the American Meteorological Society, 98(11), 2397–2410. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00324.1

Liu, Z., Zhou, P., Chen, X., & Guan, Y. (2015). A multivariate conditional model for streamflow prediction and spatial precipitation refinement. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120(19), 10,116-10,129. https://doi.org/10.1002/2015JD023787

Maier, H. R., Jain, A., Dandy, G. C., & Sudheer, K. P. (2010). Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems: Current status and future directions. Environmental Modelling & Software, 25(8), 891–909. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.02.003

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmer, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. 50(3), 885–900. https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.23153

Nourani, V., Hosseini Baghanam, A., Adamowski, J., & Kisi, O. (2014). Applications of hybrid wavelet–Artificial Intelligence models in hydrology: A review. Journal of Hydrology, 514, 358–377. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.057

Oliveira, A. R., Ramos, T. B., & Neves, R. (2023). Streamflow Estimation in a Mediterranean Watershed Using Neural Network Models: A Detailed Description of the Implementation and Optimization. Water, 15(5). https://doi.org/10.3390/w15050947

Thornton, M. M., Shrestha, R., Wei, Y., Thornton, P. E., & Kao, S. C. (2022). Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 4 R1 (Version 4.1). ORNL Distributed Active Archive Center. https://doi.org/https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/2129
Yang, S., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2023). Runoff Prediction Based on Dynamic Spatiotemporal Graph Neural Network. Water, 15(13). https://doi.org/10.3390/w15132463

Zhang, X., Deng, L., Wu, B., Gao, S., & Xiao, Y. (2022). Low-Impact Optimal Operation of a Cascade Sluice-Reservoir System for Water-Society-Ecology Trade-Offs. Water Resources Management, 36, 6131–6148. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03345-4

Referencia electrónica y bases de datos

Conagua. (2026, abril 28). SIH. Sistema de Información Hidrológica. https://sih.conagua.gob.mx/hidros.html

INEGI. (2025). Hidrografía. Geografía y Medio Ambiente. https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/

Mathworks. (2026, mayo 5). Pchip—Polinomio de interpolación cúbica de Hermite por tramos (PCHIP)—MATLAB. Centro de ayuda de Matlab. https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/pchip.html

SMN. (2025). Normales Climatológicas por Estado [Agencia de Gobierno]. Servicio Meteorológico Nacional. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Comparación de la huella hídrica azul y verde del mango Ataúlfo en el occidente y sur de México

Ricardo Álvarez López[1]

Mesa: Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Se ha incremento en la demanda de agua, en México, el sector agrícola ocupa cerca 77% del volumen de agua consumida. Es posible utilizar la huella hídrica para evaluar el consumo de agua de los productos agrícolas. Se obtuvo la huella hídrica azul y verde del mango Ataúlfo para la estación meteorológica 1862 E.T.A 041 Guadalupe Victoria ubicado en San Blas, Nayarit y la estación 07164 Tapachula (obs) ubicado en Tapachula, Chiapas para el año 2024. En San Blas se obtuvo una huella hídrica total (azul y verde) bajo riego de 1.5928 m^3/kg y de temporal (verde) de 0.8109 m^3/kg; en Tapachula una huella hídrica total bajo riego de 3.3626 m^3/kg y de temporal (verde) de 1.9263 m^3/kg para el 2024. Esto indica que en San Blas el año 2024 se utilizó un 49.7% menos de agua para producir un kilogramo de mango Ataúlfo en comparación con Tapachula, en temporal se utilizó un 56.6% menos de agua. Estas variaciones de deben principalmente a la variabilidad climática entre regiones y el suelo que causa diferencias en el rendimiento del cultivo. Se presentan variaciones respecto al promedio mundial de 1.8 m^3/kg, en San Blas se tiene un valor cercano bajo riego y por debajo en temporal, mientras Tapachula se encuentra por encima en riego y temporal. Es necesario seguir invirtiendo en la tecnificación de sistemas de riego, eficientizando tanto la conducción como la aplicación, manteniendo la producción, mejorando el rendimiento y eficientizando el agua.

Palabras clave: huella hídrica, mango, Nayarit, Chiapas.

Abstract

Water demand has increased; in Mexico, the agricultural sector accounts for approximately 77% of total water consumption. The water footprint can be used to assess the water consumption associated with agricultural products. The blue and green water footprints for the Ataúlfo mango were calculated for the year 2024 using data from two weather stations: 1862 E.T.A 041 Guadalupe Victoria (located in San Blas, Nayarit) and 07164 Tapachula (obs) (located in Tapachula, Chiapas). For 2024, the total water footprint (blue and green) under irrigation was 1.5928 m^3/kg in San Blas and 3.3626 m^3/kg in Tapachula, while the rain-fed (green) footprint was 0.8109 m^3/kg in San Blas and 1.9263 m^3/kg in Tapachula. This indicates that, in 2024, producing one kilogram of Ataúlfo mango in San Blas required 49.7% less water under irrigation and 56.6% less water under rain-fed conditions compared to Tapachula. These variations are primarily due to climatic differences between the regions and soil characteristics, which influence crop yields. When compared to the global average of 1.8 m^3/kg, the values for San Blas are close to the average under irrigation and below it under rain-fed conditions, whereas the values for Tapachula exceed the average in both scenarios.

[1]Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México, C.P. 56230

Continued investment in the modernization of irrigation systems is essential to improve the efficiency of both water conveyance and application, thereby maintaining production levels, enhancing yields, and optimizing water use.

Keywords: water footprint, mango, Nayarit, Chiapas.

Introducción

En respuesta a la escases global de agua, la contabilización del agua se ha vuelto una práctica más común para varias naciones e industria (Hossain et al., 2020). La contabilización del agua, como la medición de los volúmenes de agua que se utilizan para alguna actividad y su comparación con la disponibilidad, es importante para la disponibilidad del recurso en el futuro y la sustentabilidad económica (Vardon et al., 2007). Realizando la medición y el seguimiento del consumo del agua puede determinar las áreas donde se tiene un consumo excesivo (Hossain et al., 2020).

El conflicto de los recursos hídricos en México está entre los agricultores, la industria y la población, ya que demandan más y más agua para satisfacer sus crecientes demandas (Lopez & Bautista-Capetillo, 2015). El uso intensivo del agua en las diversas actividades socioeconómicas ha dado lugar a la consecuente contaminación, sobre explotación de las aguas superficiales y subterráneas, sobre concesión, deterioro de los ecosistemas, etc., lo cual evidencian en México una problemática que pone en riesgo la seguridad hídrica del país (IMTA, 2017). Sobre todo, cuando se estima que el 77% del volumen de agua consumido en nuestro país se destina al riego, el 14 % al uso público urbano y el 9% a las industrias autoabastecidas y termoeléctricas (IMTA, 2017). Siendo la agricultura un sector a eficientizar en el uso del agua.

En fruticultura mexicana, el país destaca por ser el principal exportador de mangos a los mercados mundiales, aunque estas disminuyeron un 7.7% durante el 2024, esto es cerca de 440,000 toneladas. El sector productivo informó condiciones de sequía, que provocaron una contracción en la producción nacional (FAO, 2025b). El mango se cosecha en 23 estados, siendo Sinaloa, Guerrero, Nayarit y Chiapas los principales productores generando dos terceras partes del volumen cosechado a nivel nacional, siendo de los más populares el mango Ataúlfo (SADER, 2021).

El uso de la huella hídrica de un producto es una herramienta utilizada para conocer el volumen de agua dulce usado para producir dicho producto, medido sobre toda la cadena de producción (Hoekstra et al., 2012). Esta herramienta es un indicador multidimensional que muestra los volúmenes consumidos por fuente y los volúmenes contaminados por tipo de contaminante: todos estos componentes están especificados geográfica y temporalmente (Hoekstra et al., 2012).

El objetivo de este trabajo es comparar la huella hídrica azul y verde del cultivo de mango Ataúlfo en dos locaciones altamente productivas de dicho cultivo en México para el año 2024, uno es la zona correspondiente a la estación meteorológica 1862 E.T.A 041 Guadalupe Victoria ubicado en San Blas, Nayarit y la estación 07164 Tapachula (obs) ubicado en Tapachula, Chiapas y ver como las condiciones ambientales, suelo y manejo causan un mayor o menor uso del agua en la producción agrícola en ese año en específico.

La huella hídrica en la agricultura

La huella hídrica de la agricultura se ha incrementado rápidamente, debido a la presión que la demanda de alimentos y energía ejerce por el crecimiento de la población, el cambio en las dietas y el incremento de consumo per cápita; este incremento se refleja en el uso del recurso

no sostenible del agua azul que lidera en la producción de alimentos a nivel mundial (Mekonnen & Gerbens-Leenes, 2020).

Para determinar la huella hídrica de un cultivo, es indispensable determinar los componentes agua azul, agua verde y agua gris. El cálculo de la evapotranspiración de agua verde y azul puede realizarse mediante el uso del modelo CROPWAT de la FAO (Smith & FAO, 1992). La forma más completa de estimar la evapotranspiración del agua verde y azul durante el desarrollo es realizando el calendario de riego en el modelo CROPWAT, este método utiliza un balance hídrico del suelo a largo plazo (Hoekstra et al., 2012).

En la clasificación espaciotemporal elaborada por Hoekstra et al. (2012), menciona que el uso de la huella hídrica para una explicación espacial de uso de agua a nivel nacional, regional o una cuenca en específico es necesario tener datos de paso de tiempo anual o mensual; obtenida de literatura y bases de datos o consumos o contaminación típicos por producto y proceso, especialmente de uso nacional, regional o de una cuenca en específico. Para una cuenca pequeña o sitio en específico se necesitan datos mensuales o diarios, obtenidos de datos empíricos (estimaciones en caso de no ser medidos directamente), especificados por localidad sobre el año; esto para ver la sustentabilidad de la huella hídrica, formulación de estrategias para reducir la huella hídrica y los impactos sociales asociados (Hoekstra et al., 2012).

La huella hídrica en la agricultura consiste en la estimación de evapotranspiración verde y azul de los cultivos sembrados, en un periodo de tiempo determinado (Figura 1). Para esto es necesario información de datos climáticos de precipitación para el periodo determinado, uso de suelo, datos sobre el riego de los cultivos y características del suelo (Zárate Torres et al., 2017).

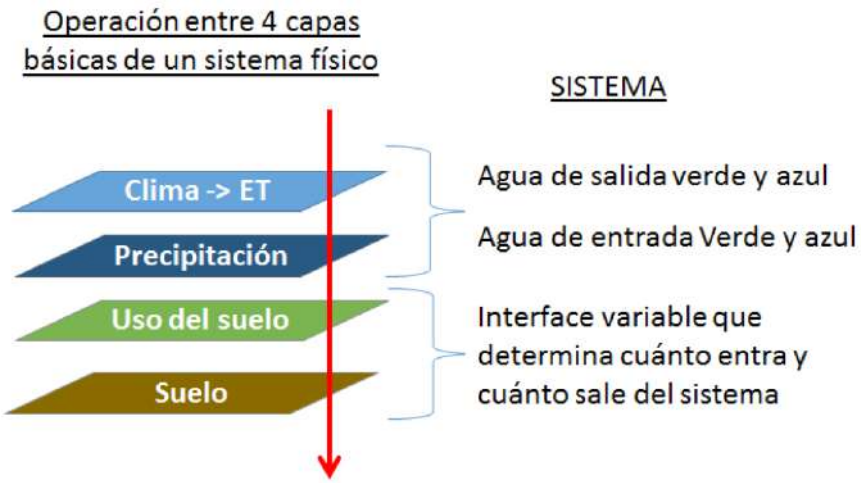


Figura 10. Esquema de cálculo para estimación de la huella hídrica verde y azul agrícola. Fuente: Zárate Torres et al. (2017).

El método más conocido para el cálculo de la evapotranspiración de un cultivo es el de Penman-Monteih, utilizado por la FAO. Entre las herramientas que se encuentran para el cálculo de la huella hídrica agrícola a nivel cuenca se encuentra el CROPWAT (Smith & FAO, 1992), el cual es un programa relativamente sencillo de manejar, sólido científicamente, bien documentado. Este programa incluye la posibilidad de realizar un balance diario de agua en el suelo y de incorporar datos de frecuencia y cantidad de riego; otras opciones en realizar las fórmulas para cálculo de evapotranspiración a nivel de celda en un sistema de información geográfico (SIG) o el modelo Aquacrop-GIS (FAO) (Zárate Torres et al., 2017).

La evapotranspiración del cultivo (ETc) se calcula como la evapotranspiración de referencia (ETc) multiplicada por el coeficiente de cultivo Kc:

$$ETc = Kc \times ET_0 \quad (1)$$

En donde ETc es la evapotranspiración potencial del cultivo, Kc es el coeficiente del cultivo, ET_0 es la evapotranspiración de referencia. Cuando se cuenta con datos más específicos sobre el tipo y características del suelo, es posible calcular la evapotranspiración real del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico, realizando un balance de agua diario en el suelo (Zárate Torres et al., 2017).

$$ETa = Kc \times ETc = Ks \times Kc \times ET_0 \quad (2)$$

En donde ETa es la evapotranspiración real del cultivo, Ks es el coeficiente de estrés hídrico, ETc es la evapotranspiración potencial del cultivo, Kc coeficiente del cultivo, ET_0 es la evapotranspiración de referencia. Este valor de ETa (mm/día) permite la estimación directa del Requerimiento Hídrico del Cultivo [m^3/ha] (CWR, por sus siglas en inglés).

Como en este caso queremos contabilizar las pérdidas de evaporación en las etapas de conducción y almacenamiento de agua, la huella hídrica se contempla con las siguientes expresiones.

$$Huella\ hídrica\ azul = HH_a = \frac{Lámina\ bruta\ (m^3/ha)}{Rendimiento\ (kg/ha)} \quad (3)$$

$$Huella\ hídrica\ verde = HH_v = \frac{Precipitación\ efectiva\ (m^3/ha)}{Rendimiento\ (kg/ha)} \quad (4)$$

Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio

El mango es de climas cálidos, requiere de un clima tropical con alternancia entre lluvia y sequía, con duración mínima de un mes para inducir floración en la planta, requiere de un suelo arenoso, limoso o arcilloso para que la planta tenga una rápida penetración y anclaje de las raíces (SADER, 2021).

El área de estudio comprende dos zonas correspondientes a los puntos definidos por las estaciones climatológicas 1862 E.T.A 041 Guadalupe Victoria ubicado en San Blas, Nayarit y la estación 07164 Tapachula (obs) ubicado en Tapachula, Chiapas. Ambas estaciones se encuentran cerca de zonas productoras de mango Ataúlfo tanto de riego como de temporal; en Nayarit se encuentran en el DR 043 Estado de Nayarit y en Chiapas se encuentran en el DTT No. 017 Tapachula.

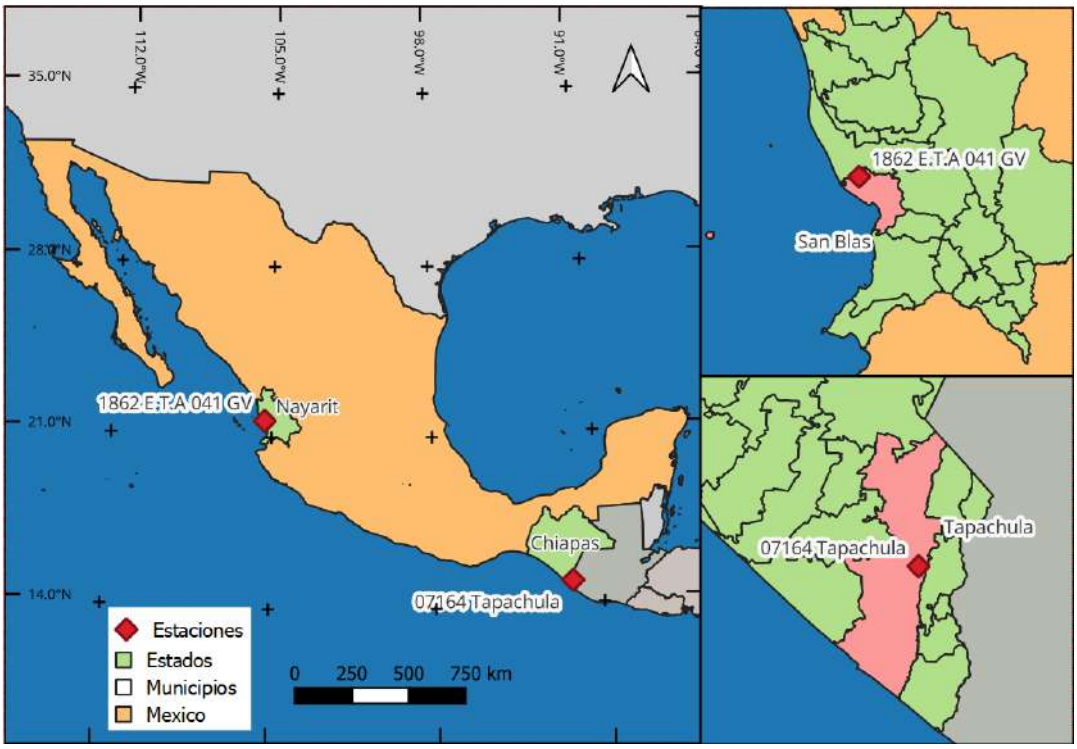


Figura 11. Ubicación de las estaciones seleccionadas.

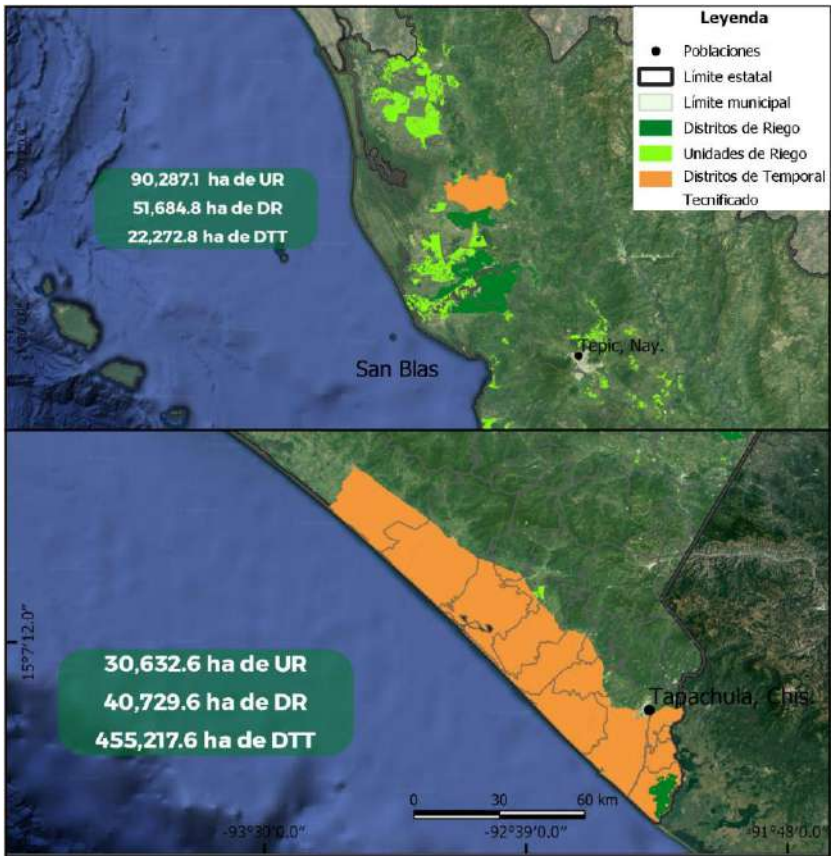


Figura 12. Superficie de distrito de riego (DR) y distrito de temporal tecnificado (DTT). Fuente: modificado de IMTA (2025).

Los datos de temperatura máxima, mínima, precipitación, velocidad del viento y la presión de vapor de agua actual (e) necesarios para el cálculo del requerimiento de riego en ambos puntos de las zonas de estudio, se obtuvieron de la plataforma Climate Engine (Huntington et al., 2017) del modelo TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018) a un paso de tiempo mensual para el año 2024, este modelo cuenta con una resolución de 4 km. La humedad relativa se obtuvo a partir de la humedad actual y la temperatura media a partir de las siguientes expresiones.

$$E = (6.11) * 10^{\frac{7.5\,T}{237.3\,T}} \quad (5)$$

$$HR = \frac{e}{E} * 100 \quad (6)$$

Donde E es la presión de vapor de agua a saturación, T es la temperatura media, e es presión de vapor de agua actual y HR es la humedad relativa. Las horas sol para la estación 1862 E.T.A 041 Guadalupe Victoria se obtuvieron de los registros históricos del CLIMWAT 2.0 (FAO, 2025a) para la estación No. 53 Tepic, Nayarit, ya que se encuentra cercana a la estación E.T.A 041 y a la poca variación latitudinal que hay entre las estaciones. Las horas sol para la estación 07164 Tapachula (obs) se obtuvieron de la estación No. 64 Tapachula, Chiapas del CLIMWAT. El método para obtener la precipitación efectiva es el del S.C del USDA.

Los volúmenes de producción, rendimiento y superficie sembrada y cosechada, tanto de riego como temporal, se obtuvieron del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) (Dgsiap, 2024) para el año 2024 en los municipios mencionados anteriormente. Las características del suelo se obtuvieron del Continuo Nacional de Datos Vectoriales Edafológicos del INEGI (INEGI, 2024), clasificando el suelo de la estación 1862 E.T.A 041 Guadalupe Victoria como "MEDIUM" según el suelo disponible en el CROPWAT y el de la estación 07164 Tapachula (obs) como "HEAVY". Las etapas fenológicas del mango Ataúlfo se obtuvieron de las preestablecidas por la FAO y disponibles en el CROPWAT, indicando como fecha de siembra el 10 de octubre.

El inventario de obras de distritos de riego para el estado de Nayarit del IMTA (2025) , se tiene una superficie dominada del distrito 043 Estado de Nayarit de 43,681.00 ha con una superficie regada de 43,237.00 ha, donde se tiene una presa de derivación y 47 pozos como fuentes de abastecimiento, la conducción se realiza en canales en su mayoría revestidos de concreto (486.63 de 499.67 km) en la red principal y secundarias (48.68 de 77.98 km), no presentando conducción entubada. Fira en su registro de Agrocostos (FIRA, 2025) menciona para el 2017 en Nayarit el uso de riegos por aspersión en la zona norte. Para Tapachula, Chiapas, la zona costa se encuentra con superficie perteneciente a distritos de temporal tecnificado (DTT), los 7 DTT son el DTT No. 006 Acapetahua, el DTT No. 011 Margaritas-Comitán, DTT No. 017 Tapachula, DTT No. 18 Huixtla, DTT No. 20 Margaritas-Pijijiapan, DTT No. 027 Frailesca, DTT No. 019 Jesús Diego (Arellano-Monterrosas, 2020). Por lo que estas zonas están enfocadas en aprovechar de mejor manera la precipitación y aplicar riegos suplementarios en caso de ser necesarios. Para la zona de Tapachula también se le considero el uso de sistemas de riego por aspersión. Con las características de conducción de ambas zonas de estudio y de los sistemas de riego se decidió dar una eficiencia global de aplicación del 70% para la zona de San Blas Nayarit y del 65% para Tapachula, Chiapas.

Resultados y discusión

Los datos necesarios para determinar el requerimiento de riego se muestran en la siguiente tabla por estación.

Cuadro 6. Datos climáticos de la estación 07164 Tapachula, Tapachula, Chiapas para el año 2024.

Latitud: 14.92083333		Longitud: -92.52		Nombre: Tapachula (obs)		Altitud: 193 msnm	
Fecha	**Tmin**	**Tmax**	**Hum relativa**	**Vel. viento**	**Horas sol**	**Rad solar**	**Precipitación**
	°C	°C	%	km/día	hr/día	MJ/m^2/día	mm
01/01/2024	20.8	35.7	67.070	224.64	6.34	17.185	3
01/02/2024	20	35.5	65.669	241.92	6.33	20.287	7
01/03/2024	22.1	37	64.896	241.92	5.4	20.460	17
01/04/2024	23.5	36.6	65.972	198.72	4.17	18.602	114
01/05/2024	24.2	36.1	73.280	172.8	4.93	19.561	183
01/06/2024	22.4	33.4	82.177	181.44	4.8	12.856	1342
01/07/2024	22.4	34.5	79.848	164.16	5.24	19.129	373
01/08/2024	22.1	34.1	80.700	164.16	5.39	19.734	431
01/09/2024	22.2	33.7	80.585	172.8	4.4	17.539	451
01/10/2024	22.5	33.6	76.742	190.08	5.14	16.122	451
01/11/2024	21	33.6	77.228	190.08	6.09	14.541	352
01/12/2024	20.6	34.1	70.162	216	5.96	16.131	26

Cuadro 7. Datos climáticos de la estación E.T.A 041 Guadalupe Victoria, San Blas, Nayarit para el año 2024.

Latitud: 21.67944444		Longitud: -105.32722222		Nombre: E.T.A 041 Guadalupe Victoria		Altitud: 10 msnm	
Fecha	**Tmin**	**Tmax**	**Hum relativa**	**Vel. viento**	**Horas sol**	**Rad solar**	**Precipitación**
	°C	°C	%	km/día	hr/día	MJ/m^2/día	mm
01/01/2024	16.4	29.9	65.484	172.8	5.75	13.660	3
01/02/2024	16.4	30.4	65.268	198.72	7.07	15.725	20
01/03/2024	16.5	30.9	61.131	216	7.63	20.425	0
01/04/2024	17.6	32.2	61.528	207.36	7.68	21.574	0
01/05/2024	20.4	33.8	67.600	198.72	8.1	22.015	0
01/06/2024	23.3	33.3	74.594	216	6.36	17.194	150
01/07/2024	24.5	34.4	73.782	190.08	5.83	19.138	299
01/08/2024	24.7	34.5	75.414	172.8	6.21	19.051	289
01/09/2024	25.5	34.5	73.583	172.8	5.51	18.567	213
01/10/2024	25	35.3	69.356	172.8	6.29	17.556	107
01/11/2024	20.8	32.8	65.482	172.8	6.66	15.725	26
01/12/2024	17.9	30.5	66.904	164.16	5.34	14.584	1

La precipitación del 01/06/2024 de la estación 07164 Tapachula (obs) se introdujo como 999 mm, debido a la limitación del CROPWAT a precipitaciones iguales o mayores a 1000 mm mensuales. La huella hídrica del mango Ataúlfo se compone de la huella hídrica azul, en el caso

del uso de riego, y de huella hídrica verde en el caso del cultivo de temporal. Para el caso de San Blas, Nayarit la huella hídrica se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 8. Superficie, rendimiento y huella hídrica azul y verde del cultivo de mango Ataúlfo en San Blas, Nayarit.

Cultivo	Superficie	Rendimiento	Lámina bruta	Precipitación efectiva	HH azul	HH verde	HH total
	ha	ton/ha	m	m	m^3/kg	m^3/kg	m^3/kg
Riego	1164.59	12.87	1.0063	1.0436	0.7819	0.8109	1.5928
Temporal	4019	12.47	0	1.0436	0	0.8369	0.8369

Para el caso de Tapachula, Chiapas, la huella hídrica se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 9. Superficie, rendimiento y huella hídrica azul y verde del cultivo de mango Ataúlfo en Tapachula, Chiapas.

Cultivo	Superficie	Rendimiento	Lámina bruta	Precipitación efectiva	HH azul	HH verde	HH total
	ha	ton/ha	m	m	m^3/kg	m^3/kg	m^3/kg
Riego	2063	8.1	0.7438	1.8204	0.9183	2.2474	3.3626
Temporal	6322	9.45	0	1.8204	0	1.9263	1.9263

De los resultados obtenidos, tomando como parámetro la huella hídrica total mayor (HH total), en el caso de cultivo de riego, se puede decir que en San Blas en el año 2024 se utilizó un 49.7% menos de agua para producir un kilogramo de mango Ataúlfo en comparación con Tapachula, en el caso de temporal se utiliza un 56.6% menos de agua. Estas diferencias se deben a la mayor precipitación que se presenta en Tapachula, Chiapas (2642 mm más que en San Blas), que representa una mayor huella hídrica verde y que contribuye a una mayor huella hídrica Total para esa estación. Además de la precipitación, las diferencias en características del suelo influyen en la cantidad de agua disponible del suelo, permitiendo un almacenamiento mayor en los suelos de la zona de la estación en San Blas (Suelo medio) a comparación de Tapachula (suelo pesado). Estas diferencias se reflejan en el rendimiento (12.87 kg/ha en San Blas a 8.1 kg/ha en Tapachula) bajo riego y bajo temporal (12.47 kg/ha en San Blas a 9.45 kg/ha en Tapachula) aunque con una diferencia menor.

En cuanto al manejo, como referencia, el portal del Agrocostos del Fira (FIRA, 2025) para el año 2024 en sus resúmenes de costos y memorias de cálculo muestran actividades de fertilización en ambas zonas, así como labores culturales, control de plagas, malezas y enfermedades.

El promedio global de huella hídrica total del mango es de 1.8 m^3/kg, del cual la huella hídrica azul es de 0.362 m^3/kg, la verde de 1.314 m^3/kg y la gris de 0.124 m^3/kg (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Para el 2024, San Blas en el mango Ataúlfo por riego se encuentra con una huella hídrica azul mayor al promedio global (0.4199 m^3/kg por encima), esto posiblemente compensando la huella hídrica verde menor al promedio mundial (0.5031 m^3/kg por debajo), en el caso de temporal se encuentra con una huella hídrica verde por debajo de promedio mundial (0.4771 m^3/kg por debajo). Para Tapachula en el 2024 para el caso bajo riego, la huella hídrica azul está por encima del promedio mundial (0.5563 m^3/kg por encima), al igual que la huella hídrica verde (0.9334 m^3/kg por encima), posiblemente atribuido a las causas mencionadas

anteriormente en comparación con San Blas, Nayarit. En mano Ataúlfo de temporal en Tapachula también se encuentra por encima de la huella hídrica verde promedio mundial (0.6123 m^3/kg por encima) para el 2024.
La Water Footprint Network (2025) menciona que los países con mayor producción de mango son la India, que cuenta con una huella hídrica total de 1.910 m^3/kg, en China y Tailandia con 1.430 m^3/kg y 2.860 m^3/kg respectivamente; se puede mencionar que, sin considerar la hulla hídrica gris, San Blas tiene valores similares a China y cercanas a la India en cultivo bajo riego, mientras que Tapachula, en temporal tiene valores similares a la India y bajo riego por encima de Tailandia.

Conclusiones

La huella hídrica del mango Ataúlfo obtenida para el año 2024 en San Blas, Nayarit y en Tapachula, Chiapas presentan diferencias en sus componentes de huella azul y verde, la huella hídrica verde y azul mayor en Tapachula se puede atribuir a las condiciones climáticas de la zona y del suelo, así como el manejo que afecta directamente en el rendimiento del cultivo. La huella hídrica azul en ambas zonas es mayor al promedio mundial genérico de mango, por lo que se deben de seguir invirtiendo en proyectos de tecnificación y aplicación oportuna del riego para permitir la sustentabilidad del agua y nos permita tener un incremento en el rendimiento, así como técnicas que nos permitan aprovechar de mejor manera la precipitación.

Literatura citada

Revistas científicas

Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, *5*(1), 170191. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191

Huntington, J. L., Hegewisch, K. C., Daudert, B., Morton, C. G., Abatzoglou, J. T., McEvoy, D. J., & Erickson, T. (2017). Climate Engine: Cloud Computing and Visualization of Climate and Remote Sensing Data for Advanced Natural Resource Monitoring and Process Understanding. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *98*(11), 2397–2410. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00324.1

Lopez, L. I. F., & Bautista-Capetillo, C. (2015). Green and Blue Water Footprint Accounting for Dry Beans (Phaseolus vulgaris) in Primary Region of Mexico. *Sustainability*, *7*(3), 3001–3016. https://doi.org/10.3390/su7033001

Mekonnen, M. M., & Gerbens-Leenes, W. (2020). The Water Footprint of Global Food Production. *Water*, *12*(10), 2696. https://doi.org/10.3390/w12102696

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, *15*(5), 1577–1600. https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011
Vardon, M., Lenzen, M., Peevor, S., & Creaser, M. (2007). Water accounting in Australia. *Ecological Economics*, *61*(4), 650–659. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.033

Libros y documentos científicos

Arellano-Monterrosas, J. L. (2020). *Hacia una reingeniería de los servicios de riego y drenaje: Una visión desde Chiapas*. COMEII.

FAO. (2025a). *CLIMWAT | Tierras y Aguas | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations*. https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/es/

FAO. (2025b). *Principales Frutas Tropicales. Análisis del Mercado 2024*. FAO. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd6428es

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2012). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Routledge.

Hossain, I., Imteaz, M. A., & Khastagir, A. (2020). Water footprint: Applying the water footprint assessment method to Australian agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*(10), 4090–4098.

IMTA. (2017). *Huella Hídrica en México: Análisis y perspectivas* (Rita Vázquez del Mercado y Javier Lambarri). https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/huella-hidrica/files/assets/basic-html/../../../index.html

Smith, M., & FAO. (1992). *CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management*. Food & Agriculture Org.

Zárate Torres, E., Fernández Poulussen, A., & Kuiper, D. (2017). *Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica* (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.). IICA. https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1710455/

Referencia electrónica y bases de datos

Dgsiap. (2024). *Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON)*. gob.mx. http://www.gob.mx/agricultura|dgsiap/prensa/sistema-de-informacion-agroalimentaria-de-consulta-siacon?idiom=es

FIRA. (2025, noviembre 15). *Portal FIRA - Perennes 2025*. https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/BusquedaArch

IMTA. (2025, noviembre 15). *Sistema de Información del Uso del Agua de Riego a Nivel Nacional*. https://sisuar.imta.mx/aplicacion/vista/inventario/inventario.php

INEGI. (2024). *Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo nacional*. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551131916

SADER. (2021). *El mango, producto estrella en México*. gob.mx. http://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-mango-producto-estrella-en-mexico

Water Footprint Network. (2025). *Galería de productos – Red de huella hídrica*. https://www.waterfootprint.org/resources/interactive-tools/product-gallery/

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Actividad insecticida de extractos hexánico y etanólico de semillas de guanábana (*Annona muricata* L.) contra el gorgojo asociado a maíz (*Sitophilus zeamais*)

Ricardo Hernández González[1,2]*; Ulises Murrieta Dionicio[1]; Emanuel Quintero Delgadillo[3]; Benito Reyes Trejo[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La familia de las anonáceas comprende numerosas especies de interés por su contenido de metabolitos secundarios con actividad biológica. Entre ellas, *Annona muricata* L., conocida comúnmente como guanábana, es una especie tropical ampliamente distribuida en América y utilizada en la medicina tradicional debido a sus propiedades farmacológicas. El uso intensivo de insecticidas sintéticos para el control de plagas agrícolas ha generado diversos problemas ambientales y el desarrollo de resistencia en numerosas especies de insectos. En este contexto, las semillas de *Annona muricata* L. representan una fuente potencial de compuestos bioactivos con actividad insecticida. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto insecticida de los extractos hexánico y etanólico obtenidos de semillas de *Annona muricata* L. sobre gorgojos, mediante bioensayos de mortalidad bajo condiciones controladas, con la finalidad de determinar su potencial para el control de estos insectos. Para ello, las semillas fueron sometidas a procesos de extracción con hexano y etanol, obteniéndose extractos que posteriormente fueron evaluados mediante bioensayos de toxicidad a diferentes concentraciones. Se registró el porcentaje de mortalidad del gorgojo. Como resultado, ambos extractos mostraron actividad insecticida, pero en particular el extracto etanólico tuvo mayor eficiencia que el extracto hexánico de acuerdo con la CL_{50} = 1 282.5 ppm del extracto hexánico en comparación la CL_{50} = 1 169.6 ppm del extracto etanólico. Los resultados obtenidos demuestran que extractos obtenidos de semillas de *A. muricata* L., poseen un importante potencial para el desarrollo de bioinsecticidas, constituyendo una alternativa sostenible para el manejo integrado de plagas agrícolas.

Palabra clave: *Annona muricata* L., semillas, extractos, acetogeninas, bioinsecticidas

Abstract

The Annonaceae family comprises numerous species of interest due to their content of secondary metabolites with biological activity. Among them, *Annona muricata* L., commonly known as soursop, is a tropical species widely distributed across the Americas and used in traditional medicine for its pharmacological properties. The intensive use of synthetic insecticides for agricultural pest control has led to various environmental problems and the development of resistance in numerous insect species.

[1]Laboratorio de Productos Naturales. Departamento de Preparatoria Agricola. Universidad Autónoma Chapingo. benijovi@yahoo.com,mx, Murrieta.dionicio091293@gmail.com
[2]Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria. Universidad Autónoma Chapingo. *richargonsalez100@gmail.com
[3]Departamento de Parasitología Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Emanuelqd91@outlook.com

In this context, **Annona muricata** L. seeds represent a potential source of bioactive compounds with insecticidal activity. The objective of this study was to evaluate the insecticidal effect of hexane and ethanol extracts obtained from **Annona muricata** L. seeds on weevils through mortality bioassays under controlled conditions, in order to determine their potential for controlling these insects. To this end, the seeds underwent extraction processes using hexane and ethanol, yielding extracts that were subsequently evaluated via toxicity bioassays at various concentrations. Weevil mortality rates were recorded. The results showed that both extracts exhibited insecticidal activity; however, the ethanol extract was more effective than the hexane extract, as indicated by an LC50 of 1,169.6 ppm for the ethanol extract compared to 1,282.5 ppm for the hexane extract. These findings demonstrate that extracts derived from **A. muricata** L. seeds hold significant potential for the development of bioinsecticides, offering a sustainable alternative for integrated agricultural pest management.
Keywords: *Annona muricata* L., sedes, extracts, acetogenins, bioinsecticides

Introducción

Las plagas de insectos representan uno de los principales factores limitantes para la producción agrícola mundial, ya que ocasionan pérdidas económicas significativas tanto en campo como durante el almacenamiento de productos agrícolas. Para reducir estos daños el control químico mediante insecticidas sintéticos ha sido una de las estrategias más utilizadas durante las últimas décadas. Sin embargo, el uso continuo e indiscriminado de estos compuestos ha generado problemas ambientales importantes, incluyendo contaminación de suelos y cuerpos de agua, afectación de organismos benéficos y desarrollo de resistencia en numerosas especies de insectos (Aktar, Sengupta, & Chowdhury, 2009). Como consecuencia, existe un creciente interés en la búsqueda de alternativas sostenibles y menos perjudiciales para el medio ambiente, entre las cuales destacan los insecticidas de origen vegetal.

Los bionsecticidas constituyen una fuente importante de compuestos bioactivos capaces de actuar como repelentes, inhibidores del crecimiento, antialimentarios o tóxicos para diversos insectos. Además, suelen presentar una menor persistencia ambiental y un menor riesgo para organismos no objetivo en comparación con los insecticidas sintéticos (Isman, 2006). Dentro de las familias botánicas con mayor potencial para el desarrollo de bioinsecticidas destaca la familia Annonaceae, reconocida por producir una amplia variedad de metabolitos secundarios con actividad biológica, particularmente las acetogeninas (Bermejo et al., 2005).

Las acetogeninas son derivados de ácidos grasos de cadena larga que han sido aislados principalmente de semillas, hojas, raíces y cortezas de especies pertenecientes a la familia Annonaceae. Estas moléculas han despertado gran interés debido a sus actividades citotóxicas, antiparasitarias, antimicrobianas e insecticidas. Su mecanismo de acción se basa principalmente en la inhibición del complejo I de la cadena respiratoria mitocondrial (NADH-ubiquinona oxidoreductasa), lo que provoca una disminución en la producción de ATP y, en consecuencia, alteraciones metabólicas que pueden conducir a la muerte celular (Bermejo et al., 2005). Debido a este mecanismo, las acetogeninas han sido consideradas compuestos prometedores para el desarrollo de nuevos agentes biológicos de control de plagas y para el desarrollo de compuestos con aplicaciones farmacológicas.

Dentro de las especies de Annonaceae presentes en México y Centroamérica, *Annona muricata* L.*,* conocida comúnmente como guanábana, ha sido objeto de numerosos estudios fitoquímicos debido a la diversidad de metabolitos presentes en sus semillas. Esta especie es originaria de

Mesoamérica y posee importancia económica por la producción de frutos comestibles, además de relevancia etnobotánica por sus aplicaciones en la medicina tradicional. En las semillas de *A. muricata* L. se han identificado de extractos de metanol y acetato de etilo numerosas acetogeninas (Aguilar-Hernández, et al 2022) como la annonacina y pseudoannonacina. Consideradas los principales metabolitos responsables de su actividad biológica, incluyendo efectos insecticidas, citotóxicos y antialimentarios. Entre las acetogeninas reportadas con mayor frecuencia se encuentran **a**nnonacina, muricatacina, muricatetrocinas A y B, muricinas A–G, corossolina y corossolona (Moghadamtousi et al., 2015). Asimismo, se ha observado que la acumulación de acetogeninas en especies de Annonaceae está estrechamente relacionada con el desarrollo de las semillas y constituye un mecanismo de defensa química frente al ataque de insectos, lo que refuerza su importancia ecológica y su potencial para el manejo de plagas (Durán-Ruiz et al., 2019).

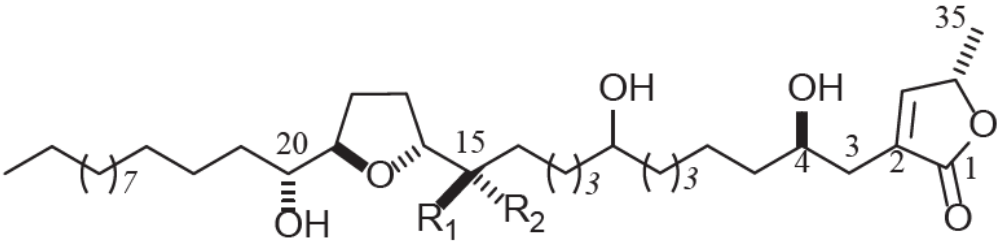


Figura 1. Annonacina R_1 = OH; R_2 = H, Pseudoannonacina R_1 = H; R_2 = OH

Además de ser metabolitos característicos de las Annonaceae, las acetogeninas presentes en las semillas de *Annona muricata* L. han demostrado una marcada actividad insecticida contra insectos de importancia agrícola, particularmente contra el gorgojo del maíz, *Sitophilus zeamais*. Hincapié-Llanos et al., (2008) reportaron que los extractos *A. muricata* L obtenidos con hexano y acetato de etilo presentaron la mayor toxicidad sobre adultos de *S. zeamais*, alcanzando valores El extracto de acetato de etilo mostró la mayor actividad por ingestión, con una concentración letal media (CL_{50}) de 2 542 ppm a las 72 h de exposición, mientras que el extracto hexánico presentó una toxicidad ligeramente menor, con una CL_{50} de 3 760 ppm y logrando una inhibición del 100 % de la emergencia de nuevos adultos a concentraciones de 2 500 ppm. Al respecto, do Prado Ribeiro et al., (2020) demostraron que la rolliniastatina-1, aislada de *Annona mucosa*, posee una mortalidad del 51.11 ± 5.40 % a una dosis de 57.7 mg kg^{-1}. Estos hallazgos sugieren que especies relacionadas, como *Annona muricata*, también representan una fuente prometedora de compuestos con potencial para el manejo de insectos plaga. (do Prado Ribeiro et al., 2020). Los autores atribuyeron este efecto principalmente a la presencia de acetogeninas en las fracciones menos polares de las semillas, las cuales actúan con mayor eficacia por ingestión que por contacto (Hincapié-Llanos et al., 2008). Asimismo, se ha descrito que las acetogeninas ejercen su acción insecticida mediante la inhibición del complejo I (NADH:ubiquinona oxidorreductasa) de la cadena respiratoria mitocondrial, provocando una disminución en la producción de ATP, lo que ocasiona parálisis y muerte de los insectos. Estas características respaldan el potencial de las semillas de *A. muricata* L. como una fuente prometedora de compuestos naturales para el desarrollo de bioinsecticidas destinados al manejo de plagas de granos almacenados, como *Sitophilus zeamais*. Estos hallazgos respaldan el interés científico por las acetogeninas como compuestos bioactivos de alto valor y fortalecen la investigación orientada a su aprovechamiento en el desarrollo de bioinsecticidas y otros productos de origen natural.

Materiales y métodos

Material Vegetal

Se colectaron a partir de residuos agroindustriales generados durante el procesamiento de frutos de la guanábana *(Annona muricata)* en la empresa Pulpas Esmeralda, S.A. de C.V. (Iztapalapa, Ciudad de México, México).

Tratamiento de semillas

Las semillas de *A. muricata* L., fueron retiradas del material de desecho (restos de pulpa, fibra, y semillas) de forma manual, se lavaron con agua y se eliminaron aquellas que presentaron deterioros físicos, daños por insectos o ausencia de desarrollo interno (sin endospermo). Posteriormente, las semillas se secaron a la sombra a temperatura ambiente durante siete días y la testa o cáscara fue separada empleando unas pinzas mecánicas, resultando una cantidad suficiente de almendras para continuar con el estudio.

Obtención de extractos

Se molieron 5.14 kg almendras de *A. muricata* L. en un procesador de alimentos NutriBullet (NBR-0804B, Los Ángeles, CA, E.U.A). Se colocaron en un recipiente de vidrio de 10 litros de capacidad, se agregaron 6 L de hexano y se mantuvo en maceración por tres días, posteriormente se filtró el disolvente, y se recuperó por evaporación a presión reducida en un rotaevaporador (Büchi R-300, Suiza). El disolvente recuperado se reincorporó al residuo vegetal, y se mantuvo en maceración por otros tres días más. El proceso de maceración se repitió en un tercer ciclo de extracción y finalmente se obtuvo el extracto hexánico (EH). Una vez desengrasadas las almendras con hexano, se efectuaron maceraciones con etanol siguiendo la secuencia de trabajo descrita de tres ciclos de extracción por disolvente para finalmente obtener un segundo extracto etanólico (EE), que se encuentra resumido en el esquema 1.

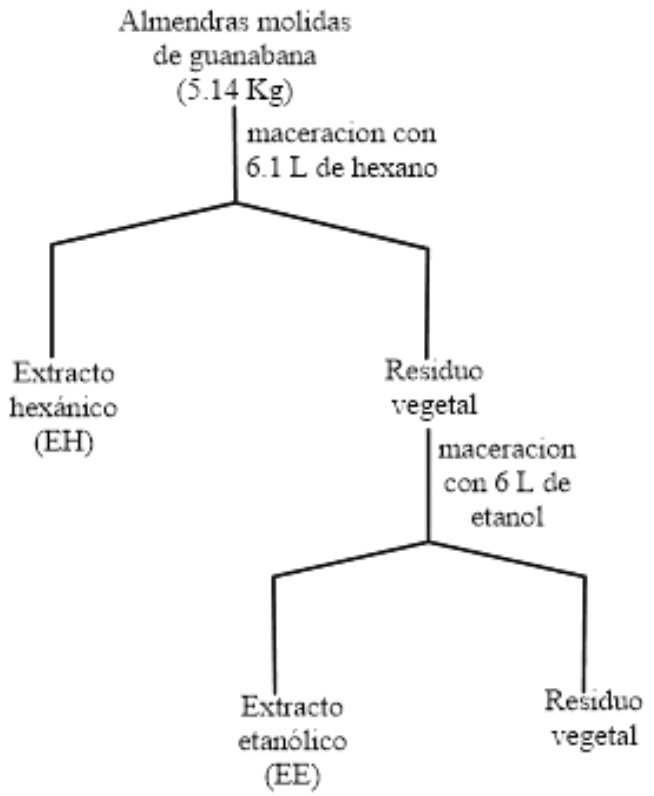


Figura 2. Diagrama de preparación de extractos de almendras de frutos de guanábana.

Evaluación de la actividad insecticida de los extractos hexánico y etanólico en gorgojo de maíz (Sitophilus zeamais)

Se pesaron 100, 50, 10 y 1 mg de cada extracto en una balanza analítica, correspondientes a las concentraciones de 10 000, 5 000, 1 000 y 100 ppm, respectivamente. Cada tratamiento se preparó por triplicado utilizando 10 g de maíz por unidad experimental. Los extractos se disolvieron con metanol, el volumen final se aforó a 10 mL. Posteriormente, se aplicaron 3 mL de cada solución sobre 10 g de maíz contenidos en frascos de vidrio con 50 mL de capacidad, procurando una distribución uniforme, y se dejaron evaporar durante 24 h a temperatura ambiente. Como control negativo, se aplicaron 3 mL de metanol sobre 10 g de maíz siguiendo el mismo procedimiento. El control positivo consistió en la aplicación de 3 mg del insecticida sintético Graneril® sobre 10 g de maíz, mientras que el control estuvo conformado únicamente por 10 g de maíz sin ningún tratamiento. Transcurrido el periodo de evaporación, se introdujeron 10 adultos de gorgojos (*Sitophilus zeamais*) en cada frasco y se registró el porcentaje de mortalidad durante 10 días. Con los datos obtenidos se estimó la concentración letal media (CL_{50}) mediante análisis Probit.

Resultados y discusión

La Figura 1 muestra el efecto de los extractos hexánico y etanólico obtenidos de almendras de *Annona muricata* L. sobre la mortalidad de *Sitophilus zeamais* durante un periodo de 10 días. Se observa una respuesta dependiente de la concentración, con un incremento en la mortalidad conforme aumentó la concentración de los extractos aplicados.

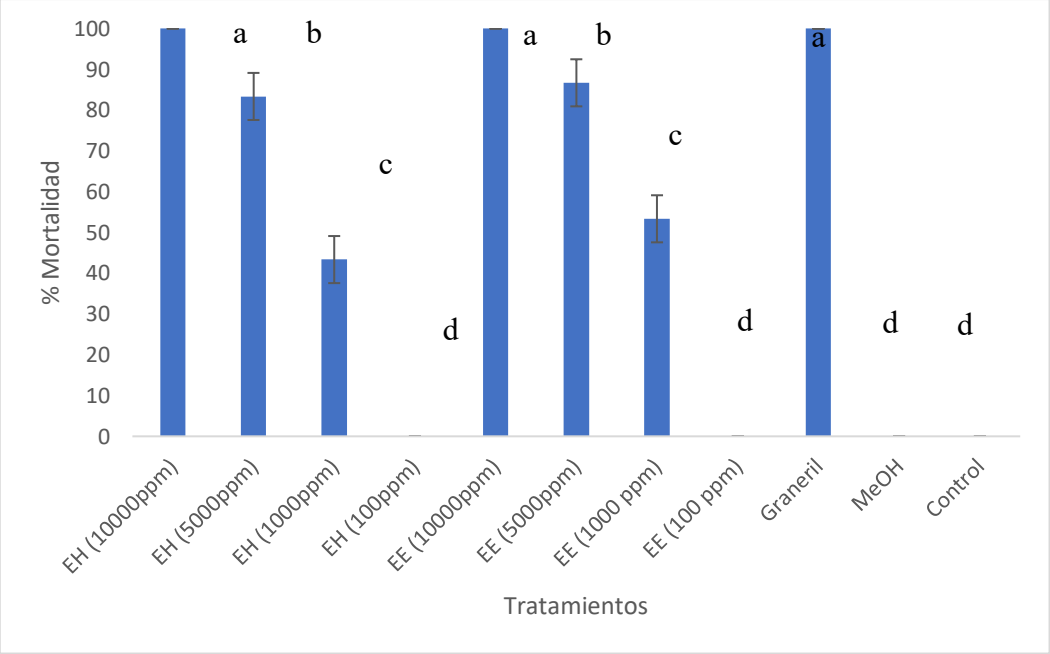


Figura 3. Efecto de los extractos hexánico y etanólico obtenidos de semillas de *Annona muricata* L. sobre la mortalidad (%) de *Sitophilus zeamais* durante un periodo de 10 días.

En la Figura 1 se observa que **ambos extractos (hexánico y etanólico) alcanzaron una mortalidad del 100 % a concentración de 10 000 ppm**, resultado equivalente al obtenido con el **control positivo Graneril** lo que indica una elevada actividad insecticida a esta concentración. Al disminuir la concentración a **5 000 ppm**, la mortalidad también disminuyó, registrándose **83.33 ± 0.06 para el extracto hexánico** y **86.67 ± 0.06 para el extracto etanólico**. A **1 000 ppm**, el efecto insecticida continuó reduciéndose, con valores de **43.33 ± 0.09 % para el extracto hexánico** y **53.33 ± 0.08 % para el extracto etanólico.**

Por otro lado, la concentración más baja (100 ppm) no produjo mortalidad en ninguno de los dos extractos, comportamiento similar al observado en los tratamientos con MeOH y en el control, en los cuales tampoco se registró mortalidad. Esto indica que el disolvente y las condiciones experimentales no influyeron en la muerte de los insectos, por lo que la mortalidad observada puede atribuirse a la actividad insecticida de los extractos. El análisis Probit mostró que el extracto hexánico presentó una CL_{50} de 1 282.5 ppm y una CL_{90} de 4 499.7 ppm, mientras que el extracto etanólico registró una CL_{50} de 1 169.6 ppm y una CL_{90} de 4 080.7 ppm. Estos resultados indican que el extracto etanólico requirió una menor concentración para provocar el 50 % y el 90 % de mortalidad, lo que sugiere una mayor toxicidad en comparación con el extracto hexánico.

Conclusión

Los extractos hexánico y etanólico obtenidos de semillas de *Annona muricata* L. exhibieron actividad insecticida frente al gorgojo (*Sitophilus zeamais*), demostrando por el incremento de la mortalidad a medida que aumentó la concentración de los extractos aplicados. El análisis de la concentración letal media (CL_{50}) presentó que el extracto etanólico demostró una mayor toxicidad frente a *Sitophilus zeamais* (CL_{50} =1 169.6 ppm) en comparación con el extracto hexánico (CL_{50} =1 282.5 ppm), ya que requirió una menor concentración para provocar el 50 % de mortalidad. Estos resultados sugieren que el proceso de extracción con etanol favoreció la obtención de metabolitos con mayor actividad insecticida, la actividad observada en ambos extractos indica que las semillas de *Annona muricata* L. contienen metabolitos bioactivos, entre ellos acetogeninas y otros compuestos de diferente polaridad, con potencial para el desarrollo de bioinsecticidas dirigidos al manejo de *S. zeamais*. Estos resultados confirman el potencial de *A. muricata* L. como fuente de compuestos bioactivos para el desarrollo de insecticida, ofreciendo una alternativa más sostenible y con menor impacto ambiental para el manejo integrado de plagas agrícolas.

Literatura citada

Aguilar-Hernández, G., Zepeda-Vallejo, L. G., García-Magaña, M. D. L., López-García, U. M., Aguilera-Aguirre, S., & Montalvo-González, E. (2022). Contenido de acetogeninas a partir de semillas del fruto de guanábana (Annona muricata L.): Evaluación de diferentes condiciones de extracción. *Biotecnia*, *24*(2), 12-19. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i2.1453

Aktar, M. W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, *2*(1), 1–12. https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7

Bermejo, A., Figadère, B., Zafra-Polo, M.-C., Barrachina, I., Estornell, E., & Cortes, D. (2005). Acetogenins from Annonaceae: Recent progress in isolation, synthesis and mechanisms of action. *Natural Product Reports, 22*(2), 269–303. https://doi.org/10.1039/B500186M

do Prado Ribeiro, L., Gonçalves, G. L. P., Bicalho, K. U., Fernandes, J. B., & Vendramim, J. D. (2020). Rolliniastatin-1, a bis-tetrahydrofuran acetogenin: The major compound of A*nnona mucosa* Jacq. (Annonaceae) has potent grain-protective properties. *Journal of Stored Products Research*, *89*, 101686. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101686

Durán-Ruiz, C. A., Cruz-Ortega, R., Zaldívar-Riverón, A., Zavaleta-Mancera, H. A., De-la-Cruz-Chacón, I., & González-Esquinca, A. R. (2019). *Ontogenic synchronization of Bephratelloides cubensis, Annona macroprophyllata seeds and acetogenins from Annonaceae*. *Journal of Plant Research, 132*(1), 81–91. https://doi.org/10.1007/s10265-018-01078-3

Hincapié-Llanos, C. A., Lopera-Arango, D., & Ceballos-Giraldo, M. (2008). Actividad insecticida de extractos de semilla de *Annona muricata* (Annonaceae) sobre *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Revista Colombiana de Entomología, 34*(1), 76–82. https://doi.org/10.25100/socolen.v34i1.9254

Isman, M. B. (2006). Botanical insecticides, deterrents and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annual Review of Entomology, 51*(1), 45–66. https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151146

Moghadamtousi, S. Z., Fadaeinasab, M., Nikzad, S., Mohan, G., Ali, H. M., & Kadir, H. A. (2015). *Annona muricata* (Annonaceae): A review of its traditional uses, isolated acetogenins and biological activities. *International Journal of Molecular Sciences, 16*(7), 15625–15658. https://doi.org/10.3390/ijms160715625

Rendón-Barrón, M. J., Pérez-Arteaga, E., Delgado-Waldo, I., Loissell-Baltazar, Y. A., Jacobo-Herrera, N., Martínez-Vázquez, M., Pérez-Yépez, E. A., Coronel-Hernández, J., Dokudovskaya, S., & Pérez Plasencia, C. (2024). *Laherradurin inhibits tumor growth in an azoxymethane/dextran sulfate sodium colorectal cancer model in vivo*. *Cancers, 16*(3), 573. https://doi.org/10.3390/cancers16030573

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

La Deducción de Euler–Lagrange y una Interpretación Variacional de la Fuerza Emocional en Equipos Humanos de dos Integrantes.

Abraham Rojano Aguilar[1], Raquel Salazar Moreno[1], Irineo López Cruz [1], Jorge Flores Velázquez[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La ecuación de Euler–Lagrange representa una de las transformaciones conceptuales más profundas en la historia de la ciencia, al sustituir la descripción mecánica basada exclusivamente en fuerzas por una formulación basada en principios variacionales. Este cambio permitió comprender que los sistemas físicos evolucionan siguiendo trayectorias que optimizan una cantidad global denominada acción. En este artículo se desarrolla la deducción matemática de la ecuación de Euler–Lagrange y se propone una extensión conceptual hacia la dinámica de equipos humanos de dos integrantes, incorporando variables emocionales, comunicativas y motivacionales como coordenadas generalizadas. Bajo esta perspectiva, la cooperación, el conflicto y la alineación de objetivos pueden interpretarse como componentes de un campo potencial emocional que condiciona la evolución del sistema colectivo. El modelo establece un puente entre la mecánica analítica, la teoría de sistemas complejos y los modelos contemporáneos de inteligencia emocional.

Palabras clave: principio variacional, dinámica de equipos, inteligencia emocional, cooperación, sistemas complejos.

Abstract

The Euler–Lagrange equation represents one of the deepest conceptual shifts in the history of science, replacing the purely force-based mechanical description with a formulation based on variational principles. This change made it possible to understand that physical systems evolve by following paths that optimize a global quantity called action. This article develops the mathematical derivation of the Euler–Lagrange equation and proposes a conceptual extension to the dynamics of two-person human teams, incorporating emotional, communicative, and motivational variables as generalized coordinates. From this perspective, cooperation, conflict, and goal alignment can be interpreted as components of an emotional potential field that shapes the evolution of the collective system. The model bridges analytical mechanics, complex systems theory, and contemporary models with emotional intelligence.

Keywords: variational principle, team dynamics, emotional intelligence, cooperation, complex systems

[1]Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México Texcoco. Chapingo México, abrojano@hotmail.com, raquels60@hotmail.com, loci61@hotmail.com
[2]Colegio de Posgraduados. Campus Montecillo, carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, CP: 56230, Texcoco, Estado de México, México. jorgelv@colpos.mx

Introducción

La evolución histórica de la mecánica clásica estuvo marcada por una transición desde una visión basada en fuerzas locales hacia una descripción más abstracta fundamentada en principios globales. Isaac Newton estableció en el siglo XVII una formulación donde el movimiento de un cuerpo era consecuencia directa de la acción de fuerzas externas mediante la ecuación $F = ma$. Esta interpretación permitió explicar una gran cantidad de fenómenos físicos; sin embargo, durante el siglo XVIII surgió una nueva perspectiva matemática impulsada por Leonhard Euler y Joseph-Louis Lagrange, quienes demostraron que los sistemas mecánicos podían describirse mediante principios de optimización de trayectorias (Euler, 1744; Lagrange, 1788).
El trabajo de Lagrange transformó la mecánica al introducir una función escalar denominada Lagrangiano, definida como la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial:

$$L = T - V \tag{1}$$

La dinámica de un sistema dejó entonces de depender exclusivamente del conocimiento de las fuerzas individuales y pasó a formularse como una búsqueda de la trayectoria que hace estacionaria la acción:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L\,(q, \dot{q}, t)dt \tag{2}$$

Esta idea constituye un cambio epistemológico fundamental, porque permite estudiar sistemas complejos mediante variables internas y restricciones globales. Posteriormente, la formulación lagrangiana fue extendida por Hamilton hacia una estructura geométrica del espacio de fases, dando origen a importantes desarrollos en mecánica cuántica, teoría de control, geometría diferencial y sistemas dinámicos (Goldstein, Poole y Safko, 2002).

Actualmente, muchos sistemas sociales y biológicos presentan características similares a los sistemas físicos: poseen estados internos, interacciones, restricciones y procesos de adaptación. Un equipo humano puede considerarse un sistema dinámico compuesto por agentes que evolucionan mediante intercambio de información, energía emocional y objetivos compartidos. Desde esta perspectiva, la ecuación de Euler–Lagrange puede interpretarse como un modelo matemático para describir la trayectoria óptima de cooperación entre individuos.

Deducción matemática de la ecuación de Euler–Lagrange

La deducción de Euler–Lagrange parte del principio variacional de mínima acción. Consideremos un sistema descrito por una coordenada generalizada $q(t)$. La acción asociada al movimiento está dada por:

$$S[q] = \int_{t_1}^{t_2} L\,(q, \dot{q}, t)dt \tag{3}$$

donde $L(q, \dot{q}, t)$representa el lagrangiano del sistema.

El objetivo es encontrar la trayectoria $q(t)$para la cual una pequeña perturbación no modifica la acción de primer orden. Se introduce entonces una variación:

$$q(t) + \epsilon\eta(t) \tag{4}$$

donde $\eta(t)$representa una perturbación infinitesimal y cumple:

$$\eta(t_1) = \eta(t_2) = 0 \tag{5}$$

La variación de la acción queda expresada como:

$$\delta S = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L}{\partial q}\eta + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\dot{\eta}\right) dt \tag{6}$$

Aplicando integración por partes al segundo término:

$$\int \frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\dot{\eta}dt = \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\eta\right]_{t_1}^{t_2} - \int \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right)\eta dt \tag{7}$$

El término de frontera desaparece debido a las condiciones impuestas sobre la variación. Por lo tanto:

$$\delta S = \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right)\right]\eta dt \tag{8}$$

Como la variación ηes arbitraria, el integrando debe ser igual a cero, obteniéndose:

$$\boxed{\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0} \tag{9}$$

Esta ecuación constituye la base matemática de la mecánica analítica y permite describir cualquier sistema donde exista una función de energía o costo asociada a su evolución (Lagrange, 1788; Lanczos, 1949).

3. Extensión del principio variacional hacia un equipo humano de dos integrantes

Un equipo humano puede representarse como un sistema formado por dos agentes dinámicos:

$$E = \{1, 2\} \tag{10}$$

donde cada integrante posee un conjunto de variables internas:

$$q_i = (x_i, c_i, m_i, e_i) \tag{11}$$

Estas variables representan la posición funcional dentro del equipo, la comunicación, la motivación y el estado emocional respectivamente.

El estado colectivo del equipo se define como:

$$Q(t) = (q_1, q_2) \tag{12}$$

De manera análoga a un sistema físico, la evolución del equipo puede formularse mediante una función lagrangiana:

$$L(Q, \dot{Q}) = T_h - V_h \tag{13}$$

donde $T_h$representa la capacidad dinámica del equipo y $V_h$representa las tensiones internas.

La energía dinámica humana puede expresarse como:

$$T_h = \frac{1}{2} M_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} M_2 \dot{q}_2^2 \tag{14}$$

donde $M_i$representa la capacidad individual de adaptación, aprendizaje y respuesta.

La interacción emocional se modela mediante un potencial:

$$V_h = V_c + V_e + V_m \tag{15}$$

El término comunicativo puede representarse como:

$$V_c = \frac{k_c}{2}(c_1 - c_2)^2 \tag{16}$$

indicando que diferencias grandes en la comunicación generan tensión dentro del sistema.

La diferencia emocional entre los integrantes puede expresarse como:

$$V_e = \frac{k_e}{2}(e_1 - e_2)^2 \tag{17}$$

donde $k_e$representa la sensibilidad emocional del equipo.

Finalmente, la diferencia de motivaciones u objetivos se representa como:

$$V_m = \frac{k_m}{2}(m_1 - m_2)^2 \tag{18}$$

Este modelo establece que la fuerza emocional aparece como un gradiente del potencial:

$$F_e = -\nabla V_h \tag{19}$$

de manera semejante a una fuerza física que modifica la trayectoria del sistema.

La fuerza emocional como equivalente dinámico de una fuerza restauradora

En un sistema mecánico, una fuerza restauradora busca regresar al equilibrio. De manera equivalente, en un equipo humano la comunicación efectiva, la empatía y la alineación de objetivos actúan como mecanismos restauradores.

Aplicando Euler–Lagrange al sistema colectivo:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \tag{20}$$

se obtiene:

$$M_i \ddot{q}_i = -\nabla_i V_h \tag{21}$$

Esta expresión indica que el cambio del estado individual depende de la interacción con el resto del sistema. Por ejemplo, para la variable emocional:

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{e}_1 &= -k_e(e_1 - e_2) \\ M_2 \ddot{e}_2 &= -k_e(e_2 - e_1) \end{aligned} \tag{22}$$

Cuando ambos integrantes poseen estados emocionales cercanos:

$$e_1 \approx e_2 \tag{23}$$

el potencial emocional disminuye y el sistema alcanza estabilidad. Por el contrario, cuando existe una separación emocional elevada, aumenta la energía potencial y aparecen dinámicas de conflicto.

Este planteamiento coincide con los estudios de inteligencia emocional desarrollados por Goleman (1995), quien señala que la capacidad de reconocer, regular y comprender emociones influye directamente en la cooperación y el desempeño colectivo.

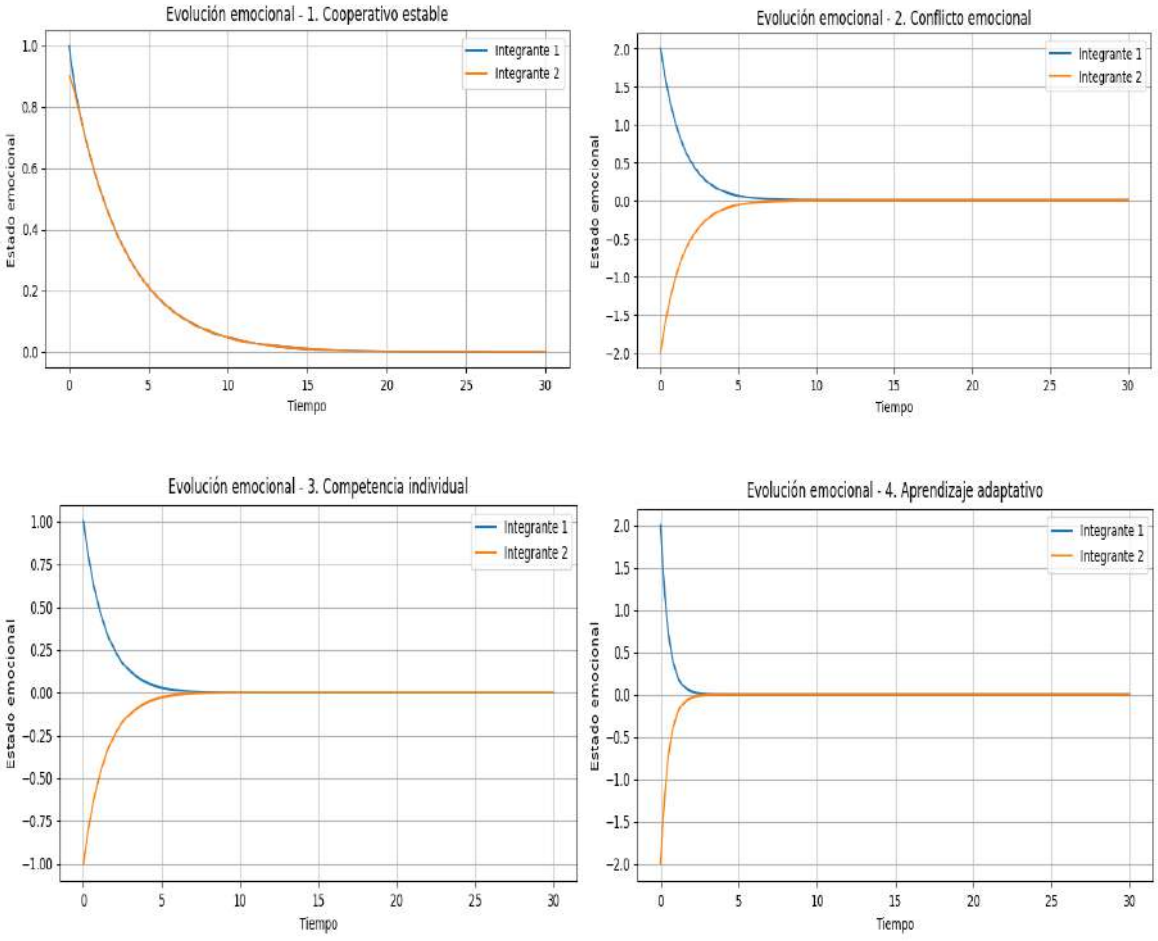
Resultados

Para evaluar la dinámica emocional y colaborativa de un equipo compuesto por dos integrantes, se desarrolló una simulación computacional en Google Colab basada en la formulación variacional de Euler–Lagrange. El modelo representa a cada integrante mediante variables de estado asociadas con la emoción, motivación y comunicación, incorporando fuerzas restauradoras de cooperación y términos disruptivos asociados al conflicto, pérdida de confianza y desalineación de objetivos. A partir de la solución numérica del sistema de ecuaciones diferenciales se analizaron seis escenarios representativos: cooperación estable, conflicto emocional, competencia individual, aprendizaje adaptativo, disrupción progresiva y colapso del equipo.

Cuadro 1. Parámetros en los diferentes escenarios

Escenario	k emocional	k motivación	k comunicación	k disruptivo	Disipación
1. Cooperativo estable	2.0	2.0	2.0	0.0	0.3
2. Conflicto emocional	0.3	0.4	0.2	0.0	0.1
3. Competencia individual	0.5	2.5	0.3	0.2	0.1
4. Aprendizaje adaptativo	1.0	1.0	1.0	0.0	0.05
5. Disruptivo progresivo	0.2	0.2	0.1	2.0	0.02
6. Colapso del equipo	0.1	0.1	0.05	5.0	0.01
6. Colapso del equipo	0.1	0.1	0.05	5.0	0.01

Cuadro 1 presenta los parámetros del modelo para cada escenario, incluyendo los coeficientes de interacción emocional ((k_e)), motivación ((k_m)), comunicación ((k_c)), fuerza disruptiva ((k_d)) y disipación del sistema ((\gamma)). Estos parámetros permiten caracterizar la intensidad de las relaciones internas del equipo y determinar las condiciones bajo las cuales el sistema evoluciona hacia estados de cooperación o inestabilidad.



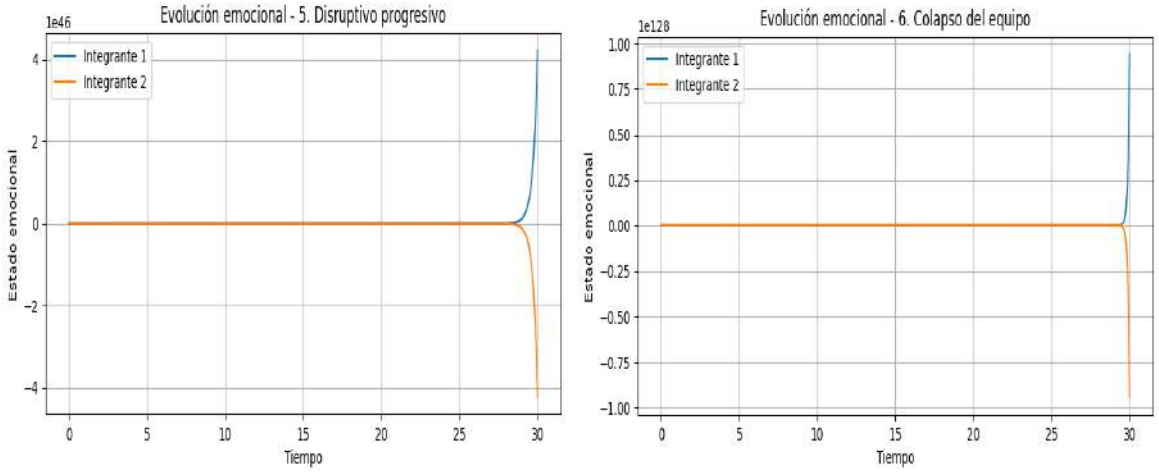


Figura 1. Diferentes escenarios relacionados con la dinámica de evolucion de los equipos

La Figura 1 muestra la evolución temporal del estado emocional de ambos integrantes durante la simulación, evidenciando cómo las interacciones internas modifican la trayectoria del sistema. En los escenarios cooperativos se observa una convergencia hacia estados emocionales cercanos, mientras que en los escenarios disruptivos la diferencia entre integrantes aumenta debido al predominio de fuerzas de separación. Finalmente, la Figura 7 presenta una comparación global de la separación emocional y la cohesión del equipo, mostrando que el parámetro disruptivo actúa como un punto crítico que puede transformar una dinámica colaborativa en una trayectoria de conflicto o ruptura organizacional.

Estos resultados muestran que la ecuación de Euler–Lagrange, originalmente desarrollada para describir sistemas físicos, puede emplearse como una herramienta matemática para estudiar sistemas humanos complejos, donde las emociones, la comunicación y los objetivos compartidos funcionan como variables dinámicas que determinan la evolución colectiva.

Discusión: de la mecánica clásica a la dinámica humana

La importancia filosófica de Euler y Lagrange consiste en cambiar la pregunta fundamental de la dinámica. Newton preguntaba: ¿qué fuerza produce el movimiento? La mecánica analítica pregunta: ¿qué trayectoria optimiza la evolución del sistema?

Aplicada a equipos humanos, esta transformación conduce a una nueva pregunta: ¿qué configuración emocional permite que dos individuos alcancen un objetivo común con menor conflicto y mayor cooperación?

Desde esta perspectiva, un equipo estable no es aquel donde desaparecen todas las diferencias, sino aquel donde las interacciones internas permiten transformar las diferencias en una trayectoria colectiva. La cooperación puede interpretarse como un estado de mínima tensión emocional y máxima eficiencia organizacional.

Este enfoque también puede relacionarse con la teoría de sistemas complejos, donde los patrones globales emergen de interacciones locales entre agentes individuales (Prigogine,

1980). Un equipo humano, al igual que un sistema físico, desarrolla propiedades emergentes que no pertenecen a un solo integrante, sino a la estructura completa de relaciones.

Conclusiones

La ecuación de Euler–Lagrange constituye una herramienta matemática que supera la descripción tradicional basada únicamente en fuerzas externas y permite estudiar sistemas mediante principios variacionales. Su estructura puede extenderse conceptualmente hacia sistemas humanos donde existen variables internas como emociones, comunicación y motivación.

En un equipo de dos integrantes, la fuerza emocional puede modelarse como un campo potencial que regula la distancia entre estados individuales. La cooperación aparece cuando la trayectoria colectiva minimiza tensiones internas y maximiza la sincronización de objetivos.

Este modelo establece una conexión interdisciplinaria entre la mecánica analítica, la inteligencia emocional y la teoría matemática de sistemas complejos, mostrando que los principios desarrollados por Euler y Lagrange pueden ofrecer nuevas perspectivas para comprender la evolución dinámica de los grupos humanos.

Literatura Citada

Euler, L. (1744). Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes. Lausanne.

Lagrange, J. L. (1788). Mécanique Analytique. Paris: Desaint.

Lanczos, C. (1949). The Variational Principles of Mechanics. Toronto: University of Toronto Press.

Goldstein, H., Poole, C., & Safko, J. (2002). Classical Mechanics. San Francisco: Addison Wesley.

Hamilton, W. R. (1834). On a general method in dynamics. Philosophical Transactions of the Royal Society.

Goleman, D. (1995). Emotional Intelligence: Why It Can Matter More Than IQ. New York: Bantam Books.

Prigogine, I. (1980). From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences. San Francisco: Freeman.

Taylor, F. W. (1911). The Principles of Scientific Management. New York: Harper & Brothers.

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Del Teorema de Pitágoras a la Inteligencia Artificial: la Evolución de la Sistematización del Conocimiento Matemático

Abraham Rojano Aguilar[1]

Mesa 1: Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen
La historia de las matemáticas suele narrarse como una sucesión de descubrimientos individuales, teoremas y avances técnicos. Sin embargo, esta perspectiva deja en un segundo plano un fenómeno igualmente decisivo: la evolución de los mecanismos mediante los cuales el conocimiento matemático ha sido organizado, preservado, validado y transmitido entre generaciones. El presente trabajo propone interpretar la historia de las matemáticas como una secuencia de grandes proyectos de sistematización del conocimiento, cuya finalidad ha sido construir estructuras intelectuales capaces de integrar resultados dispersos dentro de marcos conceptuales coherentes.

Palabras clave: Historia de las matemáticas; Euclides; Biblioteca de Alejandría; sistematización del conocimiento; Bourbaki; *Principia Mathematica*; Inteligencia Artificial; ciencia abierta.

Abstract
The history of mathematics is usually told as a succession of individual discoveries, theorems, and technical advances. However, this perspective leaves in the background an equally decisive phenomenon: the evolution of the mechanisms through which mathematical knowledge has been organized, preserved, validated, and transmitted across generations. This paper proposes interpreting the history of mathematics as a sequence of major projects to systematize knowledge, whose aim has been to build intellectual structures capable of integrating scattered results within coherent conceptual frameworks.

Keywords: History of Mathematics; Euclid; Library of Alexandria; systematization of knowledge; Bourbaki; Principia Mathematica; Artificial Intelligence; open science.

Introducción

El estudio inicia con el pensamiento pitagórico, donde la existencia de relaciones numéricas universales introdujo la idea de que el orden natural podía expresarse mediante principios matemáticos. Posteriormente se analiza la contribución de Euclides, cuya obra *Los Elementos* constituyó el primer sistema axiomático completo de la historia y estableció un métododeductivo que permaneció vigente durante más de dos milenios. La Biblioteca y el Museo de Alejandría representan la primera institución dedicada a concentrar, preservar y producir conocimiento científico mediante una comunidad internacional de investigadores.
El artículo continúa examinando la evolución de este proceso a través de la *Encyclopédie* de Diderot y d'Alembert, la formalización lógica desarrollada en *Principia Mathematica* por Russell y Whitehead, y la reorganización estructural de la matemática impulsada por el colectivo Bourbaki durante el siglo XX.

[1] Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México Texcoco. Chapingo México, abrojano@hotmail.com

Finalmente, se estudia la transformación provocada por Internet, Wikipedia, arXiv y los principios de ciencia abierta, culminando con la Inteligencia Artificial como una nueva infraestructura para la organización, recuperación y generación asistida de conocimiento matemático.

Se concluye que la historia de las matemáticas puede comprenderse como una evolución continua de sistemas destinados a aumentar la capacidad humana para estructurar el conocimiento, pasando de los manuscritos y bibliotecas a los sistemas digitales colaborativos y, más recientemente, a modelos de inteligencia artificial capaces de apoyar procesos de investigación y descubrimiento científico.

Las matemáticas constituyen una de las formas de conocimiento más estables y acumulativas desarrolladas por la humanidad. A diferencia de otras disciplinas, donde los paradigmas pueden sustituirse radicalmente, los resultados matemáticos permanecen válidos una vez demostrados, integrándose en una estructura conceptual que continúa expandiéndose con el tiempo. Esta característica ha permitido que el conocimiento matemático se acumule durante más de dos milenios, convirtiéndose en uno de los ejemplos más notables de construcción colectiva del conocimiento científico.

Tradicionalmente, la historia de las matemáticas ha sido presentada como una sucesión cronológica de descubrimientos, biografías de grandes matemáticos y desarrollo de nuevas teorías. Aunque esta aproximación resulta indispensable para comprender la evolución de la disciplina, existe una dimensión menos explorada: la historia de los sistemas utilizados para organizar dicho conocimiento. Desde esta perspectiva, el verdadero progreso no depende únicamente de la producción de nuevos resultados, sino también de la capacidad para clasificarlos, preservarlos, relacionarlos y transmitirlos de manera sistemática.

La organización del conocimiento constituye un problema tan antiguo como las propias matemáticas. Cada incremento en la cantidad de información generó la necesidad de desarrollar mecanismos más eficientes de clasificación y síntesis. El surgimiento de sistemas axiomáticos, bibliotecas, enciclopedias, tratados, revistas científicas, repositorios digitales y plataformas colaborativas puede interpretarse como respuestas históricas a un mismo desafío: evitar la fragmentación del conocimiento y facilitar su transmisión entre generaciones.

Este artículo propone una interpretación histórica basada en esa continuidad. La hipótesis central sostiene que la evolución de las matemáticas puede entenderse como una sucesión de grandes proyectos de sistematización del conocimiento. Bajo esta perspectiva, el pensamiento pitagórico representa el descubrimiento de relaciones universales; Euclides introduce la organización deductiva mediante axiomas; la Biblioteca de Alejandría institucionaliza la conservación y producción científica; la *Encyclopédie* organiza el saber ilustrado; *Principia Mathematica* formaliza los fundamentos lógicos; Bourbaki reorganiza la matemática mediante estructuras abstractas; Internet y la ciencia abierta democratizan el acceso al conocimiento; mientras que la Inteligencia Artificial inaugura una nueva etapa caracterizada por la organización dinámica y la generación asistida de información científica.

Más que una historia de personajes o descubrimientos aislados, este trabajo plantea una historia de las infraestructuras intelectuales que han permitido construir, preservar y expandir el conocimiento matemático a lo largo de veinticinco siglos.

Del Teorema de Pitágoras al método axiomático

La historia de la sistematización del conocimiento matemático puede situar uno de sus primeros momentos decisivos en la escuela pitagórica, fundada en Crotona durante el siglo VI a. C. Aunque numerosos aspectos históricos permanecen envueltos en la tradición, existe un amplio consenso en que el pitagorismo introdujo la idea de que las relaciones numéricas constituyen el

fundamento del orden natural, expresada en la célebre afirmación de que “todo es número” (Burkert, 1972; Boyer & Merzbach, 2011; Heath, 1981).

El llamado Teorema de Pitágoras representa mucho más que una relación geométrica entre los lados de un triángulo rectángulo. Civilizaciones anteriores, como la babilónica y la egipcia, conocían relaciones equivalentes para aplicaciones prácticas; sin embargo, la tradición pitagórica fue la primera en incorporarlas dentro de un sistema racional basado en demostraciones matemáticas (Boyer & Merzbach, 2011; Katz, 2009).

La verdadera revolución en la sistematización del conocimiento ocurrió aproximadamente dos siglos después con Euclides de Alejandría. Su obra Los Elementos, redactada alrededor del año 300 a. C., constituye el primer sistema axiomático completo de la historia de las matemáticas y uno de los tratados científicos más influyentes de todos los tiempos (Euclid, 2007; Heath, 1956; Netz, 1999).

Euclides organizó el conocimiento geométrico mediante definiciones, postulados, nociones comunes, proposiciones y demostraciones rigurosas, estableciendo un método deductivo que permitió construir resultados complejos a partir de un conjunto reducido de principios fundamentales (Knorr, 1975; Mueller, 1981). Esta estructura lógica convirtió a Los Elementos en el modelo metodológico dominante durante más de dos mil años.

La historia de la sistematización del conocimiento matemático puede situar uno de sus primeros momentos decisivos en la escuela pitagórica, fundada en Crotona durante el siglo VI a. C. Aunque numerosas atribuciones históricas permanecen envueltas en elementos legendarios, la tradición coincide en reconocer que la comunidad pitagórica introdujo una concepción profundamente novedosa: la naturaleza podía describirse mediante relaciones numéricas universales. El célebre teorema asociado a Pitágoras simboliza esta transición desde el conocimiento empírico hacia una comprensión racional basada en demostraciones y regularidades matemáticas.

El valor histórico del teorema no reside únicamente en su formulación geométrica —conocida ya por civilizaciones anteriores en contextos prácticos— sino en su incorporación dentro de un sistema filosófico donde las relaciones matemáticas adquirían un carácter universal. La afirmación de que "todas las cosas son número" expresaba la convicción de que la estructura del cosmos podía comprenderse mediante principios matemáticos. Esta idea marcó un cambio epistemológico fundamental: el conocimiento dejó de depender exclusivamente de la observación y comenzó a sustentarse en demostraciones racionales.

Sin embargo, el conocimiento pitagórico permanecía organizado principalmente dentro de una comunidad cerrada, transmitido mediante tradiciones orales y prácticas iniciáticas. La verdadera revolución en la sistematización matemática ocurrió aproximadamente dos siglos después con Euclides de Alejandría.

La obra *Los Elementos*, redactada alrededor del año 300 a. C., constituye probablemente el proyecto más influyente de organización del conocimiento matemático en la historia de la ciencia. En lugar de presentar una colección de resultados independientes, Euclides construyó un sistema deductivo completo basado en definiciones, postulados, nociones comunes, proposiciones y demostraciones rigurosas. Cada nuevo resultado dependía exclusivamente de proposiciones previamente demostradas, estableciendo una arquitectura lógica de extraordinaria coherencia.

Esta innovación transformó profundamente la producción del conocimiento científico. Por primera vez, la validez de una afirmación matemática dejó de depender de la autoridad del autor o de la experiencia práctica, descansando exclusivamente en la consistencia lógica del sistema deductivo. Durante más de dos mil años, *Los Elementos* constituyeron el modelo de referencia para la enseñanza de las matemáticas y el paradigma metodológico de numerosas disciplinas científicas.

Desde la perspectiva de la sistematización del conocimiento, Euclides no sólo organizó la geometría de su tiempo; estableció un método general para construir conocimiento verificable, reproducible y acumulativo. Este principio constituye el antecedente intelectual de todos los grandes proyectos posteriores de organización del saber, desde las bibliotecas helenísticas hasta los repositorios digitales y los sistemas contemporáneos de inteligencia artificial.

Alejandría: el primer gran centro internacional del conocimiento

La consolidación del método euclidiano coincidió con la creación del Museo y la Biblioteca de Alejandría durante el reinado de Ptolomeo I Sóter. Esta institución representa el primer gran esfuerzo estatal para organizar sistemáticamente el conocimiento científico mediante la reunión de investigadores, manuscritos y recursos intelectuales procedentes de todo el mundo helenístico (Casson, 2001; El-Abbadi, 1990).

Más que una biblioteca, Alejandría constituyó un centro permanente de investigación donde matemáticos, astrónomos, médicos y filósofos trabajaban colectivamente. Los catálogos bibliográficos elaborados por Calímaco mediante los Pinakes representan uno de los primeros sistemas conocidos de clasificación bibliográfica, antecedente directo de la organización documental moderna (Blum, 1991; Canfora, 1989).

En este ambiente florecieron figuras como Euclides, Eratóstenes, Apolonio e Hiparco, cuyas contribuciones fueron posibles gracias a una infraestructura dedicada no sólo a conservar manuscritos, sino también a facilitar su consulta, comparación y desarrollo (Casson, 2001; Netz, 1999).

La consolidación del método deductivo desarrollado por Euclides no habría tenido la trascendencia histórica que hoy posee sin la existencia de una infraestructura dedicada a preservar, organizar y difundir el conocimiento. Esa infraestructura fue el complejo científico formado por el Museo y la Biblioteca de Alejandría, fundados durante el reinado de Ptolomeo I Sóter a finales del siglo IV a.C. Bajo el patrocinio de la dinastía ptolemaica, Alejandría se convirtió en el primer gran centro internacional de investigación de la historia, reuniendo matemáticos, astrónomos, médicos, filósofos, ingenieros y filólogos provenientes de distintas regiones del mundo helenístico.

A diferencia de las escuelas filosóficas griegas tradicionales, centradas principalmente en la enseñanza, la Biblioteca de Alejandría constituyó una institución dedicada simultáneamente a la adquisición, conservación, clasificación, traducción y producción de conocimiento. Su propósito trascendía la simple acumulación de manuscritos; buscaba construir una representación integral del saber humano mediante la recopilación sistemática de las obras existentes. Diversas fuentes históricas estiman que llegó a albergar entre 400 000 y 700 000 rollos de papiro, convirtiéndose en el mayor repositorio documental de la Antigüedad (Casson, 2001).

La innovación más importante de Alejandría no fue únicamente el volumen de información reunida, sino la creación de procedimientos para organizarla. Los trabajos bibliográficos desarrollados por Calímaco de Cirene, particularmente los *Pinakes*, constituyen uno de los primeros catálogos bibliográficos sistemáticos conocidos. En ellos las obras eran clasificadas por disciplinas, autores y características bibliográficas, estableciendo principios que anticipan la catalogación moderna. Esta organización permitió transformar una colección de manuscritos en una verdadera infraestructura de investigación.

En este ambiente intelectual florecieron algunas de las figuras más influyentes de la ciencia antigua. Euclides sistematizó la geometría; Arquímedes desarrolló métodos matemáticos aplicados a la mecánica y la hidrostática; Eratóstenes estimó con notable precisión la circunferencia terrestre; Apolonio formalizó la teoría de las secciones cónicas; Hiparco estableció las bases de la trigonometría y la astronomía matemática. Aunque sus contribuciones

pertenecían a disciplinas distintas, compartían una misma característica: todas podían consultarse, verificarse y ampliarse dentro de una comunidad científica organizada.
Desde una perspectiva contemporánea, la Biblioteca de Alejandría representa el primer intento de institucionalizar la ciencia. El conocimiento dejó de depender exclusivamente de maestros individuales para convertirse en patrimonio de una comunidad internacional de investigadores. Este cambio modificó profundamente la dinámica de producción científica, pues permitió que los descubrimientos fueran acumulativos y susceptibles de revisión crítica.
La destrucción gradual de la Biblioteca, ocurrida durante varios siglos como consecuencia de conflictos políticos y transformaciones culturales, simboliza también la fragilidad de los sistemas de organización del conocimiento. Sin embargo, su legado sobrevivió mediante la tradición manuscrita, las escuelas bizantinas, el mundo islámico y, posteriormente, las universidades medievales, preservando el ideal de reunir el conocimiento humano dentro de una estructura organizada.
En consecuencia, Alejandría puede interpretarse como el primer gran antecedente histórico de las bibliotecas nacionales, las universidades modernas, las bases de datos científicas y los actuales repositorios digitales. Su importancia radica menos en la cantidad de manuscritos conservados que en haber demostrado que la producción científica requiere instituciones dedicadas a preservar y organizar el conocimiento colectivo.

La expansión del conocimiento organizado

Durante la Ilustración europea surgió uno de los proyectos editoriales más ambiciosos de la historia del conocimiento: la Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, dirigida por Denis Diderot y Jean le Rond d'Alembert entre 1751 y 1772 (Diderot & d'Alembert, 1751–1772).
Su objetivo consistía en organizar sistemáticamente el conocimiento humano mediante artículos interrelacionados, estableciendo conexiones entre disciplinas científicas, filosóficas y técnicas. El "Árbol del Conocimiento" propuesto por d'Alembert representa uno de los primeros intentos modernos de clasificar el saber mediante relaciones conceptuales, anticipando la estructura hipertextual de las actuales plataformas digitales (Darnton, 1979; Burke, 2000).

La Encyclopédie: organizar todo el conocimiento humano

Durante el siglo XVIII, el proyecto ilustrado retomó el ideal alejandrino bajo nuevas condiciones intelectuales. La expansión de las ciencias, el desarrollo de la imprenta y el incremento de la alfabetización hacían evidente la necesidad de reorganizar un volumen de información considerablemente mayor que el existente en la Antigüedad. En este contexto surgió la *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, dirigida por Denis Diderot y Jean le Rond d'Alembert entre 1751 y 1772.

La *Encyclopédie* representó un cambio radical en la forma de organizar el conocimiento. Mientras las bibliotecas reunían documentos completos, la enciclopedia reorganizaba el contenido mediante artículos temáticos interconectados. Diderot y d'Alembert concibieron el conocimiento como una red de relaciones intelectuales, en la cual cada disciplina podía comprenderse mediante sus vínculos con las demás. Este principio anticipa de manera notable la estructura de los actuales sistemas hipertextuales y de las bases de conocimiento digitales.
El célebre "Árbol del Conocimiento" elaborado por d'Alembert clasificó las ciencias de acuerdo con las facultades humanas —memoria, razón e imaginación—, proporcionando un mapa conceptual que facilitaba la navegación entre disciplinas. De este modo, la *Encyclopédie* no sólo recopiló información, sino que propuso un modelo de organización intelectual basado en conexiones sistemáticas.

Principia Mathematica: la formalización lógica del conocimiento matemático

A comienzos del siglo XX, la rápida expansión de las matemáticas generó una nueva necesidad de sistematización. El crecimiento de áreas como el análisis, la teoría de conjuntos y el álgebra abstracta planteó interrogantes sobre los fundamentos lógicos de la disciplina. En respuesta a esta situación, Bertrand Russell y Alfred North Whitehead emprendieron uno de los proyectos intelectuales más ambiciosos de la historia: *Principia Mathematica* (1910–1913).

Su objetivo consistía en demostrar que toda la matemática podía derivarse a partir de un conjunto reducido de axiomas y reglas de inferencia lógica. Aunque posteriormente los teoremas de incompletitud de Gödel mostraron las limitaciones de este programa formalista, *Principia Mathematica* transformó profundamente la filosofía y la lógica matemática. El énfasis dejó de estar únicamente en demostrar resultados particulares y pasó a centrarse en la coherencia estructural del sistema completo.

Este cambio representa una nueva etapa en la sistematización del conocimiento: ya no basta con organizar proposiciones, como hizo Euclides, sino que es necesario formalizar el propio lenguaje mediante el cual dichas proposiciones son construidas.

Bourbaki y la matemática estructural

La siguiente gran transformación ocurrió durante la primera mitad del siglo XX con la creación del colectivo Nicolas Bourbaki. Integrado por destacados matemáticos franceses, Bourbaki emprendió un proyecto destinado a reorganizar toda la matemática moderna desde una perspectiva estructural.

Su propuesta consistía en abandonar la clasificación tradicional basada en disciplinas independientes y reconstruir la matemática a partir de estructuras fundamentales, tales como conjuntos, grupos, anillos, espacios topológicos y espacios vectoriales. Bajo esta perspectiva, ramas aparentemente diferentes compartían principios abstractos comunes, permitiendo una visión unificada del conocimiento matemático.

La influencia de Bourbaki trascendió la investigación especializada y modificó profundamente la enseñanza universitaria durante la segunda mitad del siglo XX. Su enfoque consolidó la noción de que las matemáticas constituyen un sistema de relaciones estructurales más que una colección de técnicas aisladas.

Desde la perspectiva histórica propuesta en este artículo, Bourbaki representa la culminación de un proceso iniciado por Euclides: la búsqueda permanente de principios organizadores cada vez más generales. Si Euclides sistematizó la geometría mediante axiomas y Russell formalizó el razonamiento lógico, Bourbaki reorganizó el conjunto de las matemáticas alrededor del concepto unificador de estructura.

Esta evolución muestra que la historia de las matemáticas no ha consistido únicamente en descubrir nuevos resultados, sino también en desarrollar formas cada vez más poderosas de organizar el conocimiento existente. Sobre esta base surgiría, pocas décadas después, una transformación aún más profunda: la transición desde los sistemas impresos hacia las infraestructuras digitales globales, tema que constituye el objeto de la siguiente sección del artículo.

La era digital: la democratización del conocimiento matemático

La segunda mitad del siglo XX marcó el inicio de una transformación comparable, en términos históricos, a la ocurrida con la Biblioteca de Alejandría y la *Encyclopédie*. Mientras que durante más de dos milenios la organización del conocimiento dependió de manuscritos, libros impresos y bibliotecas físicas, el desarrollo de las tecnologías digitales modificó profundamente la forma en que el conocimiento científico es producido, almacenado, distribuido y reutilizado.

Esta transición no representó únicamente un cambio tecnológico, sino una transformación epistemológica. El conocimiento dejó de organizarse mediante colecciones físicas para convertirse en información digital interconectada, accesible prácticamente desde cualquier lugar del mundo. Las matemáticas, debido a su naturaleza altamente formal y simbólica, fueron una de las disciplinas que más rápidamente aprovecharon esta nueva infraestructura.

Desde la perspectiva histórica desarrollada en este artículo, Internet puede interpretarse como la evolución natural del ideal alejandrino: construir una biblioteca universal. Sin embargo, mientras la Biblioteca de Alejandría aspiraba a reunir físicamente todos los manuscritos existentes, Internet permite distribuir el conocimiento mediante una red descentralizada donde millones de documentos pueden consultarse simultáneamente. La organización del conocimiento deja de depender de un único centro institucional para convertirse en una arquitectura distribuida y dinámica.

Internet como infraestructura global del conocimiento

El surgimiento de Internet durante las últimas décadas del siglo XX transformó radicalmente la comunicación científica. La velocidad de transmisión de la información redujo drásticamente el tiempo necesario para difundir nuevos resultados de investigación, facilitando la colaboración entre instituciones localizadas en distintos continentes.

Desde una perspectiva matemática, Internet representa mucho más que un medio de comunicación. Constituye una infraestructura que integra bibliotecas digitales, revistas electrónicas, bases de datos bibliográficas, software matemático, repositorios de código y plataformas de colaboración científica. La investigación dejó de depender exclusivamente del acceso físico a bibliotecas especializadas para apoyarse en ecosistemas digitales interconectados.

Esta transformación modificó también la naturaleza acumulativa del conocimiento. La actualización permanente de documentos, bases de datos y repositorios permite incorporar nuevas contribuciones de manera continua, generando un sistema mucho más dinámico que el proporcionado por las publicaciones impresas tradicionales.

Wikipedia: el conocimiento colaborativo

Uno de los desarrollos más significativos de la era digital ha sido la aparición de modelos colaborativos de construcción del conocimiento. Entre ellos, Wikipedia constituye probablemente el ejemplo más representativo de producción colectiva de información científica y técnica.

A diferencia de las enciclopedias clásicas, elaboradas por grupos limitados de especialistas, Wikipedia permite la participación abierta de investigadores, docentes y usuarios distribuidos alrededor del mundo. Aunque sus contenidos requieren verificación crítica y no sustituyen a las fuentes primarias de investigación, su importancia radica en haber demostrado que la organización del conocimiento puede realizarse mediante comunidades distribuidas de colaboración.

Desde el punto de vista histórico, Wikipedia puede interpretarse como la evolución digital de la *Encyclopédie* ilustrada. Ambas comparten el objetivo de organizar el conocimiento humano dentro de una estructura accesible; sin embargo, mientras la obra de Diderot y d'Alembert era una publicación estática limitada por la impresión, Wikipedia constituye un sistema dinámico de actualización permanente, donde los artículos evolucionan continuamente conforme aparecen nuevos conocimientos.

Este cambio introduce un principio completamente nuevo en la historia de la sistematización: el conocimiento deja de ser únicamente acumulativo para convertirse en un proceso colaborativo y continuamente revisado.

arXiv y la comunicación científica abierta

Otro de los cambios más profundos en la organización del conocimiento matemático ha sido la creación de repositorios de acceso abierto. Entre ellos, arXiv, fundado por Paul Ginsparg en 1991, transformó la manera en que los investigadores comunican sus resultados.

Antes de la existencia de repositorios electrónicos, la difusión de un artículo científico dependía exclusivamente del proceso editorial de las revistas académicas, el cual podía prolongarse durante meses o incluso años. arXiv introdujo un mecanismo alternativo basado en la publicación inmediata de preprints, permitiendo que nuevas investigaciones fueran conocidas por la comunidad científica antes de su publicación formal.

En matemáticas, física, informática y otras disciplinas cuantitativas, arXiv se convirtió rápidamente en una infraestructura esencial para acelerar la circulación del conocimiento. Además de reducir los tiempos de comunicación, favoreció la revisión informal entre pares y estimuló nuevas formas de colaboración internacional.

Desde la perspectiva desarrollada en este trabajo, arXiv representa una nueva etapa en la evolución de la sistematización del conocimiento: la transición desde la organización documental hacia ecosistemas científicos abiertos, dinámicos y globales.

Ciencia abierta y ecosistemas digitales

La aparición de Internet, Wikipedia y arXiv forma parte de un movimiento más amplio conocido como ciencia abierta (*Open Science*). Este paradigma propone que publicaciones, datos, software, metodologías y materiales educativos sean accesibles para toda la comunidad científica, favoreciendo la transparencia, la reproducibilidad y la colaboración internacional.

En el ámbito de las matemáticas, la ciencia abierta ha impulsado el desarrollo de bibliotecas digitales, repositorios institucionales, software libre de cálculo simbólico, plataformas de programación científica y bases de datos especializadas. La investigación contemporánea depende cada vez más de infraestructuras compartidas que permiten reutilizar resultados previamente obtenidos, disminuyendo la duplicación de esfuerzos y acelerando el avance científico.

Así, la sistematización del conocimiento deja de entenderse únicamente como clasificación documental para convertirse en la construcción de ecosistemas digitales donde publicaciones, datos, algoritmos y recursos computacionales interactúan de manera integrada.

La Inteligencia Artificial como nueva etapa de la sistematización

La incorporación de la Inteligencia Artificial (IA) representa una nueva fase en la evolución histórica de la organización del conocimiento matemático. Mientras que las bibliotecas preservaban información, las enciclopedias la clasificaban y los repositorios digitales la distribuían, los sistemas contemporáneos de IA introducen una capacidad inédita: asistir activamente en la búsqueda, integración, síntesis e incluso generación de nuevo conocimiento.

Esta transición modifica el papel tradicional de las herramientas de información. Los sistemas basados en aprendizaje automático y modelos de lenguaje no sólo recuperan documentos relevantes, sino que identifican relaciones conceptuales, sintetizan literatura científica, proponen conexiones entre resultados aparentemente independientes y apoyan la formulación de nuevas hipótesis de investigación.

En matemáticas, la IA comienza a desempeñar un papel creciente en áreas como la demostración automática de teoremas, la verificación formal, la exploración de grandes bases de datos de resultados, el descubrimiento asistido por computadora y la generación de modelos matemáticos complejos. Herramientas basadas en aprendizaje profundo complementan actualmente los métodos tradicionales de investigación, ampliando la capacidad humana para analizar volúmenes de información imposibles de procesar manualmente.

No obstante, esta transformación plantea importantes desafíos epistemológicos. La generación automática de contenido requiere mecanismos rigurosos de validación, trazabilidad y revisión por pares para garantizar la confiabilidad de los resultados científicos. En consecuencia, la Inteligencia Artificial no sustituye el razonamiento matemático, sino que se incorpora como un nuevo instrumento dentro del proceso de investigación.

Desde la perspectiva histórica propuesta en este artículo, la IA constituye la continuación natural de una evolución iniciada hace más de veinticinco siglos. Pitágoras identificó relaciones universales; Euclides organizó esas relaciones mediante axiomas; Alejandría institucionalizó la conservación del conocimiento; la *Encyclopédie* estructuró el saber ilustrado; Russell y Whitehead formalizaron la lógica matemática; Bourbaki reorganizó las estructuras abstractas; Internet y la ciencia abierta democratizaron el acceso al conocimiento; finalmente, la Inteligencia Artificial inaugura una etapa caracterizada por la organización dinámica, el análisis automatizado y la colaboración entre investigadores y sistemas computacionales.

En este sentido, la IA no representa una ruptura con la historia de las matemáticas, sino la expresión más reciente de un proceso continuo de sistematización del conocimiento. El desafío contemporáneo consiste en integrar estas nuevas capacidades computacionales dentro de los principios fundamentales de rigor, demostración y reproducibilidad que han caracterizado a las matemáticas desde la obra de Euclides.

Discusión

La historia de las matemáticas suele presentarse como una sucesión de descubrimientos individuales, desde el teorema de Pitágoras hasta los desarrollos contemporáneos en geometría, análisis, álgebra y computación. Sin embargo, el recorrido histórico desarrollado en este trabajo permite proponer una interpretación complementaria: el verdadero motor del progreso matemático no ha sido únicamente la generación de nuevos resultados, sino la evolución continua de los mecanismos destinados a organizar, preservar, formalizar y transmitir dichos resultados.

Bajo esta perspectiva, cada una de las grandes etapas analizadas representa una respuesta histórica a un mismo problema: **cómo administrar un volumen creciente de conocimiento sin perder coherencia lógica ni capacidad de expansión**. Esta necesidad ha acompañado a las matemáticas desde sus orígenes y se ha intensificado conforme la disciplina incrementó su complejidad conceptual.

El pensamiento pitagórico constituye el primer intento de descubrir principios universales que permitieran explicar la diversidad de los fenómenos naturales mediante relaciones numéricas. Aunque la escuela pitagórica no desarrolló un sistema formal comparable al de épocas posteriores, introdujo la idea de que la realidad podía comprenderse a partir de estructuras matemáticas generales. Esta concepción inauguró una tradición intelectual basada en la búsqueda de regularidades abstractas.

Con Euclides se produjo el primer gran salto metodológico. *Los Elementos* no sólo organizaron el conocimiento geométrico existente; establecieron un modelo universal de construcción científica basado en definiciones, postulados, axiomas y demostraciones rigurosas. Desde entonces, la validez del conocimiento matemático dejó de depender de la autoridad del autor y pasó a sustentarse en la consistencia lógica del sistema deductivo. Este modelo continúa siendo el fundamento epistemológico de la matemática contemporánea.

La Biblioteca y el Museo de Alejandría ampliaron esta concepción al demostrar que la organización del conocimiento requiere también instituciones capaces de conservar, clasificar y producir información científica. La ciencia dejó de ser únicamente una actividad individual para convertirse en una empresa colectiva sostenida por comunidades permanentes de

investigadores. Este modelo institucional anticipó el funcionamiento de las universidades modernas, los centros de investigación y, en la actualidad, los grandes repositorios digitales.
Durante la Ilustración, la *Encyclopédie* trasladó el problema de la organización desde los manuscritos hacia las relaciones conceptuales entre disciplinas. Posteriormente, *Principia Mathematica* profundizó esta evolución al intentar formalizar el propio lenguaje matemático mediante sistemas lógicos rigurosos. Finalmente, Bourbaki reorganizó toda la matemática alrededor del concepto de estructura, proporcionando una visión unificadora que influyó decisivamente en la investigación y en la enseñanza universitaria durante el siglo XX.
La revolución digital modificó nuevamente el escenario. Internet eliminó gran parte de las barreras geográficas para acceder a la información; Wikipedia introdujo modelos colaborativos de construcción del conocimiento; arXiv aceleró la comunicación científica mediante repositorios abiertos; y el movimiento de ciencia abierta promovió el acceso libre a publicaciones, datos y herramientas computacionales. En conjunto, estas innovaciones transformaron la organización del conocimiento en un sistema distribuido, dinámico y global.
La Inteligencia Artificial representa la etapa más reciente de esta evolución. A diferencia de las tecnologías anteriores, cuyo objetivo principal consistía en almacenar y distribuir información, la IA incorpora capacidades para analizar grandes volúmenes de literatura científica, identificar relaciones conceptuales, resumir información, asistir en demostraciones matemáticas y apoyar procesos de descubrimiento científico. En este sentido, la IA no constituye únicamente una nueva herramienta informática, sino una nueva infraestructura cognitiva para la investigación.
No obstante, esta evolución también plantea importantes desafíos. La automatización de procesos intelectuales exige fortalecer los mecanismos de validación, trazabilidad y reproducibilidad del conocimiento científico. Las matemáticas continúan fundamentándose en demostraciones rigurosas y argumentos verificables; por ello, la Inteligencia Artificial debe entenderse como una herramienta complementaria al razonamiento humano y no como un sustituto del proceso deductivo.
La principal contribución conceptual de este trabajo consiste en mostrar que la evolución de las matemáticas puede interpretarse como una historia de sucesivas infraestructuras de conocimiento. Desde los axiomas de Euclides hasta los modelos contemporáneos de Inteligencia Artificial existe una continuidad histórica caracterizada por la búsqueda permanente de sistemas capaces de organizar un conocimiento cada vez más amplio, complejo e interconectado. Esta perspectiva permite integrar acontecimientos que tradicionalmente se estudian por separado dentro de un único marco interpretativo.

Conclusiones

La historia de las matemáticas puede comprenderse no sólo como una sucesión de descubrimientos y avances conceptuales, sino también como una evolución continua de los mecanismos destinados a organizar el conocimiento científico. Esta perspectiva permite identificar una línea histórica que conecta el pensamiento pitagórico con las actuales tecnologías de Inteligencia Artificial mediante un mismo objetivo: construir sistemas cada vez más eficaces para representar, preservar, validar y transmitir el conocimiento matemático.
El análisis desarrollado muestra que el teorema de Pitágoras simboliza el descubrimiento de relaciones universales; Euclides transformó esas relaciones en un sistema deductivo formal; la Biblioteca de Alejandría institucionalizó la conservación y producción del conocimiento; la *Encyclopédie* reorganizó el saber ilustrado mediante estructuras conceptuales; *Principia Mathematica* formalizó sus fundamentos lógicos; Bourbaki propuso una reorganización estructural de la matemática moderna; mientras que Internet, Wikipedia y arXiv democratizaron el acceso global a la información científica mediante infraestructuras digitales abiertas.

La Inteligencia Artificial constituye la etapa más reciente de esta evolución histórica. Su capacidad para integrar, analizar y sintetizar grandes volúmenes de información inaugura una nueva forma de sistematización basada en la colaboración entre investigadores y sistemas computacionales. Esta transformación no modifica los principios fundamentales de la demostración matemática, pero sí amplía considerablemente las herramientas disponibles para la investigación y la generación de conocimiento.

Desde esta perspectiva, la sistematización del conocimiento puede considerarse uno de los procesos evolutivos más importantes de la historia de las matemáticas. Cada generación no sólo ha producido nuevos resultados, sino que también ha desarrollado mejores mecanismos para organizarlos y hacerlos accesibles a la comunidad científica. La continuidad de este proceso explica, en gran medida, el carácter acumulativo de las matemáticas y su extraordinaria capacidad para integrar conocimientos producidos durante más de veinticinco siglos.

Finalmente, el marco histórico propuesto permite interpretar la Inteligencia Artificial no como una ruptura con la tradición matemática, sino como la continuación natural de una larga secuencia iniciada con Euclides y consolidada por las grandes instituciones dedicadas a la organización del conocimiento. En este sentido, la evolución futura de las matemáticas dependerá tanto de nuevos descubrimientos como del desarrollo de infraestructuras intelectuales capaces de integrar el creciente volumen de información científica producido por una comunidad global de investigadores.

Literatura citada

Blum, R. (1991). Kallimachos: The Alexandrian Library and the Origins of Bibliography. University of Wisconsin Press.

Bourbaki, N. (1968). Theory of Sets. Hermann.

Boyer, C. B., & Merzbach, U. C. (2011). A History of Mathematics (3rd ed.). Wiley.

Burke, P. (2000). A Social History of Knowledge: From Gutenberg to Diderot. Polity Press.

Burkert, W. (1972). Lore and Science in Ancient Pythagoreanism. Harvard University Press.

Canfora, L. (1989). The Vanished Library. University of California Press.

Casson, L. (2001). Libraries in the Ancient World. Yale University Press.

Darnton, R. (1979). The Business of Enlightenment: A Publishing History of the Encyclopédie. Harvard University Press.

Diderot, D., & d'Alembert, J. (1751–1772). Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers.

El-Abbadi, M. (1990). The Life and Fate of the Ancient Library of Alexandria. UNESCO.

Euclid. (2007). The Thirteen Books of the Elements (T. L. Heath, Trans.). Dover Publications.

Ginsparg, P. (2011). arXiv at 20. Nature, 476, 145–147. https://doi.org/10.1038/476145a

Gödel, K. (1931). Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme. Monatshefte für Mathematik und Physik, 38, 173–198. https://doi.org/10.1007/BF01700692

Heath, T. L. (1956). The Thirteen Books of Euclid's Elements. Dover.

Heath, T. L. (1981). A History of Greek Mathematics. Dover.

Katz, V. J. (2009). A History of Mathematics: An Introduction. Pearson.

Knorr, W. R. (1975). The Evolution of the Euclidean Elements. D. Reidel. https://doi.org/10.1007/978-94-010-1754-1

Mueller, I. (1981). Philosophy of Mathematics and Deductive Structure in Euclid's Elements. Harvard University Press.

Netz, R. (1999). The Shaping of Deduction in Greek Mathematics. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511543296

Russell, B., & Whitehead, A. N. (1910–1913). Principia Mathematica. Cambridge University Press.

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Evaluación técnica de la tubería de drenaje agrícola en *Guadua angustifolia Kunth* en la Universidad Surcolombiana Sede Pitalito

Solanyi Chaux Samboni[1], Edinson Mujica Rodríguez[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

El valle de Pitalito (Huila, Colombia) presenta suelos con drenaje natural deficiente debido a su topografía plana y baja permeabilidad, condiciones que favorecen la saturación y limitan su aprovechamiento agrícola. Aunque la tubería de drenaje construida con *Guadua angustifolia* Kunth representa una alternativa sostenible, existe escasa evidencia sobre su desempeño bajo condiciones reales de operación. El objetivo fue evaluar el desempeño técnico de un sistema de drenaje subsuperficial en guadua instalado en la Universidad Surcolombiana, sede Pitalito. Se empleó un diseño completamente al azar con tres tratamientos (pendientes del 2 %, 3 % y un control sin drenaje), evaluando el estado físico-funcional del sistema, el nivel freático y las propiedades hidrodinámicas del suelo. Los tratamientos con drenaje mantuvieron un nivel freático significativamente más profundo que el control (0,938 y 0,861 m frente a 0,226 m; $p <$ 0,001) y mejores condiciones hidrodinámicas; sin embargo, la respuesta hidráulica fue heterogénea, con caudal concentrado en pocos drenes y reducción de la capacidad hidráulica por obstrucciones, sedimentos y raíces. Se concluye que la tubería de drenaje en *Guadua angustifolia Kunth* conservó capacidad para regular el nivel freático bajo las condiciones evaluadas, aunque su desempeño dependió del estado de conservación de los drenes. El estudio aporta evidencia experimental sobre el comportamiento de esta tecnología a mediano plazo y destaca el seguimiento de su estado físico y el mantenimiento periódico como factores determinantes para preservar su funcionamiento.

Palabras clave: drenaje subsuperficial; nivel freático; propiedades hidroedáficas; desempeño hidráulico.

Abstract

The Pitalito Valley (Huila, Colombia) is characterized by poorly drained soils resulting from its flat topography and low permeability, conditions that promote soil saturation and limit agricultural use. Although subsurface drainage pipes made from *Guadua angustifolia Kunth* represent a sustainable alternative, there is limited evidence regarding their performance under real field conditions. This study aimed to evaluate the technical performance of a bamboo subsurface drainage system installed at the Universidad Surcolombiana, Pitalito campus. A completely randomized design was used with three treatments (2% slope, 3% slope, and an undrained control), evaluating the physical-functional condition of the system, groundwater table depth, and *soil* hydrophysical properties. The drained treatments maintained significantly deeper groundwater table depths than the control (0.938 and 0.861 m vs. 0.226 m; $p < 0.001$) and improved *soil* hydrophysical properties.

1,2Universidad Surcolombiana, sede Pitalito. Km 1 vía Vereda El Macal, Pitalito, Huila, Colombia u20221205244@usco.edu.co, edinson.mujica@usco.edu.co

However, the hydraulic response was heterogeneous, with discharge concentrated in only a few drains and reduced hydraulic capacity due to obstructions, sediment accumulation, and root intrusion. It is concluded that the *Guadua angustifolia Kunth* drainage pipes maintained their ability to regulate the groundwater table under the evaluated conditions, although their performance depended on the physical condition of the drains. This study provides experimental evidence on the medium-term performance of this technology and highlights that monitoring its physical condition and implementing periodic maintenance are essential to preserving its functionality.

Keywords: subsurface drainage; groundwater table; soil hydrophysical properties; hydraulic performance.

Introducción

El drenaje agrícola constituye una práctica esencial para garantizar la productividad de los suelos con drenaje natural deficiente, al controlar el exceso de agua y mantener condiciones adecuadas de aireación en la zona radicular. En el valle de Pitalito (Huila, Colombia), la combinación de una topografía predominantemente plana y suelos de baja permeabilidad favorece la saturación del perfil, el ascenso del nivel freático y los encharcamientos, limitando el desarrollo de los cultivos (Akinbile et al., 2011). En estas condiciones, la capacidad de un sistema de drenaje para regular el nivel freático constituye uno de los principales indicadores de su desempeño hidráulico y de su eficiencia bajo condiciones reales de operación (Gómez et al., 2025).

La presente investigación da continuidad al trabajo desarrollado por Molina y Carantón (2021), quienes diseñaron e implementaron en la Universidad Surcolombiana, sede Pitalito, un sistema experimental de drenaje agrícola subsuperficial construido con tuberías de *Guadua angustifolia Kunth*, como alternativa sostenible para sistemas de drenaje agrícola y de bajo costo para el manejo del exceso de agua en suelos con drenaje deficiente (Zavala et al., 2014). Desde su instalación, la infraestructura ha permanecido aproximadamente cinco años bajo condiciones reales de operación, sin mantenimiento ni evaluaciones técnicas que permitieran verificar si esta tecnología conservaba su funcionalidad hidráulica y su capacidad para regular el nivel freático a mediano plazo. En consecuencia, su desempeño técnico en campo permanecía sin documentar, por lo que evaluar su comportamiento a mediano plazo resulta fundamental para establecer la viabilidad técnica de esta tecnología como alternativa sostenible para el drenaje agrícola.

Con base en este vacío de conocimiento, se plantea como hipótesis que los sistemas de drenaje construidos con *Guadua angustifolia Kunth* mantienen su capacidad para regular el nivel freático y mejorar las condiciones hidroedáficas del suelo después de aproximadamente cinco años de operación, aunque presentan una reducción parcial de su desempeño hidráulico debido al deterioro físico. Con base en ello, el objetivo de esta investigación fue evaluar la eficiencia técnica de un sistema de drenaje agrícola construido con *Guadua angustifolia Kunth* mediante la integración de indicadores hidráulicos, hidroedáficos y del estado físico-funcional de los drenes.

Materiales y Métodos

La investigación se desarrolló en la Granja Experimental de la Universidad Surcolombiana, sede Pitalito, ubicada en el municipio de Pitalito, Huila, Colombia (1°49′52,3″N; 76°02′35,4″O), a una altitud de 1.300 m s. n. m. El área de estudio comprendió 272,38 m² y las

actividades de campo se realizaron entre el 6 de marzo y el 12 de julio de 2026. Durante el primer mes se efectuaron el acondicionamiento del área experimental y el reconocimiento físico-funcional del sistema de drenaje; posteriormente desde el 6 de abril hasta el 12 de julio, se realizó el monitoreo de las variables hidráulicas e hidroedáficas.

1. Ubicación	
País	Colombia
Departamento	Huila
Municipio	Pitalito
Vereda	El Macal
Ubicación específica	1 Km, vía vereda El Macal USCO-Pitalito
2. Ubicación geográfica USCO.	
Longitud	76°02'35,4" O
Latitud	1°49'52,3" N
Altitud	1.300 m s. n. m.
3. Clima	
Templado	
4. Relieve	
Plano	
5. Temperatura	
17 - 26° C	

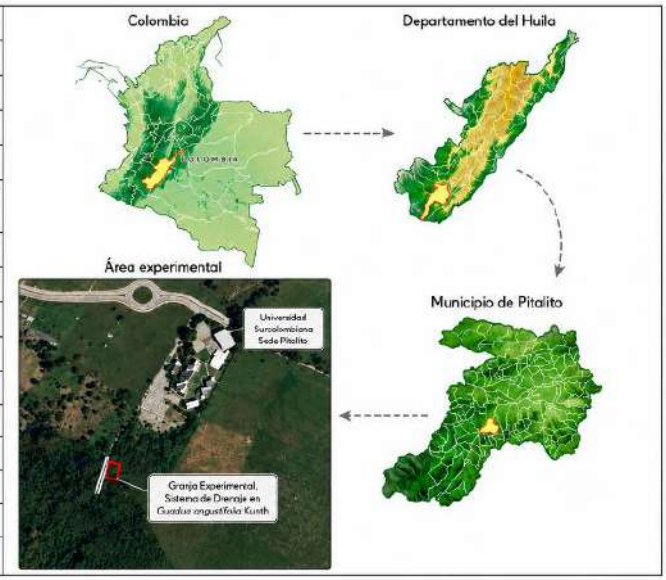


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

El sistema experimental estuvo conformado por tres tratamientos: dos con drenaje subsuperficial (T1 y T2) y un control sin drenaje (T3). Cada tratamiento drenado estuvo integrado por siete drenes construidos con culmos de *Guadua angustifolia Kunth* de aproximadamente 3 pulgadas de diámetro y 3,0 m de longitud, instalados a 0,65 m de profundidad y con un espaciamiento de 3,0 m entre drenes. Los tratamientos difirieron en el diseño de las perforaciones y la pendiente longitudinal: T1 presentó perforaciones tipo B con pendiente del 2 %, mientras que T2 presentó perforaciones tipo A con pendiente del 3 %, conforme a la Norma Técnica Colombiana NTC 6028 (ICONTEC, 2013). Las tuberías se instalaron con una envolvente filtrante de piedra triturada y trozos de guadua, y descargaban hacia un canal colector de sección trapezoidal con pendiente longitudinal del 1,5 %. Antes del inicio del monitoreo se realizó el acondicionamiento del área experimental para habilitar los puntos de evaluación y monitoreo.

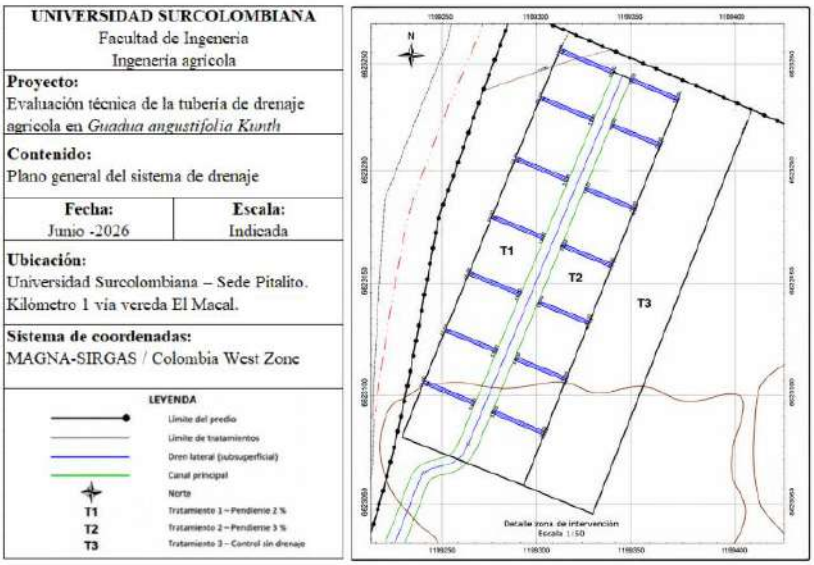


Figura 2. Plano general del sistema de drenaje.



Figura 3. Vista general del área experimental con la red de pozos, piezómetros y el canal colector del sistema de drenaje.

Caracterización inicial

Levantamiento topográfico: se realizó con un receptor GNSS RTK SparkFun RTK Express (SparkFun Electronics, Estados Unidos), utilizando el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS Origen Nacional CTM12. Los datos se procesaron en Autodesk Civil 3D 2022 para generar la planialtimetría y el perfil longitudinal del canal colector.

Caracterización física del suelo: Se realizó mediante un perfil representativo por tratamiento (T1, T2 y T3), descrito con un barreno manual tipo Edelman (Royal Eijkelkamp, Países Bajos). Los horizontes se caracterizaron por color mediante la Carta de Colores Munsell para Suelos y por textura mediante el método táctil de campo, siguiendo la metodología RASTA (Rapid Soil and Terrain Assessment), versión 2.

Reconocimiento físico-funcional del sistema de drenaje: Se inspeccionaron los 14 drenes correspondientes a los tratamientos T1 y T2 mediante observación directa, registros fotográficos y anotaciones de campo. La inspección interna se realizó desde la salida de cada dren utilizando una cámara endoscópica digital USB/OTG (China), introduciendo la sonda hasta la máxima longitud accesible o hasta detectar obstrucciones. La evaluación incluyó el estado de la salida del dren, la presencia de obstrucciones, sedimentos y raíces, el estado de conservación de la guadua, la pérdida de sección hidráulica y la condición del flujo.



Figura 4. Reconocimiento físico-funcional del sistema de drenaje interno con cámara.

Evaluación de las variables hidráulicas e hidroedáficas

Precipitación: La precipitación se registró diariamente mediante un pluviómetro analógico BRIXCO, referencia 4358 (China), con lectura directa en milímetros. Las mediciones se realizaron cada 24 h a las 17:00 h y se utilizaron para relacionar el régimen de lluvias con la respuesta hidráulica del sistema de drenaje.
Humedad del suelo: La humedad del suelo se determinó *in situ* como contenido volumétrico de agua (VWC, %) mediante un sensor 5TM de humedad y temperatura del suelo (Decagon Devices, Estados Unidos), conectado a un lector portátil ProCheck. Las mediciones se realizaron cada 24 h a profundidades de 0–40, 40–80 y 80–120 cm, para caracterizar la dinámica del agua en el perfil del suelo.
Infiltración: Se determinó mediante infiltrómetros de doble anillo, con diámetros interno y externo de 30 y 60 cm y 30 cm de altura, insertados aproximadamente 5 cm en el suelo. Se realizaron 16 jornadas de evaluación, con un ensayo por tratamiento (T1, T2 y T3) en cada jornada, para un total de 48 ensayos. El descenso de la lámina de agua se registró durante 60 min y los datos se ajustaron al modelo de Kostiakov mediante el software Kostiakov:

Velocidad de infiltración y lámina del suelo (Mamani Escobar, 2021), desarrollado por el Ing. Gilmar Mamani Escobar, para estimar la infiltración acumulada, instantánea y básica (mm h^{-1}) y caracterizar el comportamiento infiltrativo del suelo.

Conductividad hidráulica (K): Se determinó mediante un pozo de 3 pulgadas de diámetro instalado en cada tratamiento. El descenso del nivel del agua se midió con un flexómetro y una pelota de ping-pong como flotador, registrando lecturas cada 60 s durante 600 s. Se realizó una determinación diaria en cada tratamiento durante 96 días, para un total de 288 determinaciones. La conductividad hidráulica (m d^{-1}) se estimó mediante el método del pozo barrenado o el método inverso del pozo barrenado, según la presencia o ausencia del nivel freático Los valores obtenidos se clasificaron de acuerdo con la clasificación propuesta por Pizarro (1978) (Cuadro 1), con el fin de caracterizar la capacidad del suelo para conducir el flujo de agua.

Cuadro 1. Clasificación de la conductividad hidráulica según Pizarro

Clase	Conductividad (m $día^{-1}$)
Muy bajo	- 0,05
Bajo	0,05 – 0,30
Media	0,30 – 1,00
Alta	1,00 – 5,00
Muy Alta	+ 5,00

Fuente: Pizarro (1978).

Caudal de los drenes: El caudal evacuado por las tuberías de drenaje en guadua se determinó mediante aforos volumétricos diarios durante 96 jornadas de evaluación en los 14 drenes, identificados como Q1.1–Q1.7 (T1) y Q2.1–Q2.7 (T2). Debido al deterioro de las salidas de descarga, se adaptó un segmento de tubería PVCOR de 3 pulgadas (PVCOR S.A.S., Colombia), de aproximadamente 40 cm de longitud y seccionado longitudinalmente, para concentrar y conducir el flujo hacia el recipiente de medición. El volumen evacuado se recolectó durante 1 min en un beaker plástico de laboratorio, controlando el tiempo con un cronómetro y realizando tres repeticiones por dren. El caudal se expresó en mL min^{-1} como el promedio de las tres mediciones, utilizado como indicador de la capacidad de evacuación del exceso de agua de los drenes y del desempeño hidráulico.



Figura 5. Procedimiento de aforo volumétrico del caudal de los drenes: (a) canal colector; (b) salida del dren; (c) recolección del flujo; y (d) medición del volumen evacuado.

Nivel freático (abatimiento): El nivel freático se monitoreó mediante una red georreferenciada de 28 puntos, conformada por pozos de observación (Po) de 3 pulgadas con perforaciones laterales y piezómetros (Pi) de 2 pulgadas con extremo inferior abierto, ambos de 1,40 m de profundidad. La red se distribuyó entre los tratamientos T1, T2 y T3, incluyendo puntos externos al área experimental para mejorar la interpolación espacial. Las lecturas se realizaron diariamente durante 96 días mediante un flexómetro y un flotador. Las profundidades freáticas y las coordenadas X, Y y Z se procesaron en Surfer 23 (Golden Software, LLC, EE. UU.) mediante interpolación por Kriging puntual con semivariograma lineal para generar mapas de isobatas e isohipsas. La profundidad freática se clasificó en los intervalos 0–0,5; 0,5–1,0; 1,0–1,5; 1,5–2,0 y >2,0 m, para analizar la dinámica espacial y temporal del abatimiento del nivel freático como respuesta hidrológica del suelo.

Diseño y análisis experimental

El estudio se desarrolló mediante la comparación de tres tratamientos experimentales: T1, drenaje subsuperficial en guadua con pendiente longitudinal del 2 %; T2, drenaje subsuperficial en guadua con pendiente longitudinal del 3 %; y T3, suelo sin drenaje (control), bajo un diseño completamente al azar (DCA). Para las variables hidráulicas asociadas al funcionamiento de los drenes (caudal evacuado), la unidad experimental correspondió a cada dren lateral, con siete repeticiones por tratamiento (14 drenes en total). Para las variables hidroedáficas (nivel freático, humedad del suelo, conductividad hidráulica e infiltración), la unidad experimental correspondió a las subzonas del terreno asociadas a cada tratamiento, definidas mediante la red de pozos de observación, piezómetros y puntos de muestreo del suelo.

El procesamiento y análisis de los datos se realizó en R versión 4.5.2 utilizando RStudio como entorno de desarrollo. Inicialmente se efectuó un análisis descriptivo y se verificaron los supuestos estadísticos de cada variable. Posteriormente, se aplicaron procedimientos estadísticos acordes con la distribución y estructura de los datos, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. El nivel freático y el contenido volumétrico de agua del suelo se analizaron mediante modelos de mínimos cuadrados generalizados (GLS), con comparaciones de medias marginales estimadas (EMMeans) y ajuste de Tukey. La conductividad hidráulica se evaluó mediante análisis de varianza (ANOVA), seguido de comparaciones con EMMeans con ajuste de Tukey. La infiltración y el caudal evacuado se analizaron mediante la prueba de Kruskal–Wallis; para la infiltración se aplicó adicionalmente la prueba de Dunn con ajuste de Bonferroni. La relación entre la precipitación, el caudal evacuado y la conductividad hidráulica se evaluó mediante el coeficiente de correlación por rangos de Spearman.

Resultados y discusión

Condiciones del área experimental y estado actual del sistema de drenaje

El levantamiento topográfico evidenció que la pendiente longitudinal del canal colector se redujo de 1,5 % a 0,55 %, indicando una modificación de su geometría hidráulica. Aunque este valor supera el 0,5 % considerado suficiente para un drenaje rápido en canales (Salazar Molina, 2025), refleja los cambios que experimentan estos sistemas durante su vida útil. Por ello, la reducción de la pendiente constituye una condición inicial para evaluar si el drenaje conserva su funcionalidad hidráulica mediante indicadores hidráulicos e hidroedáficos.

El perfil del suelo presentó un predominio de texturas arcillosas y colores grisáceos a pardo oliva (2.5Y–5Y), característicos de suelos con drenaje natural deficiente. Esta condición proporciona un escenario edáfico de alta exigencia, donde la respuesta del sistema constituye un criterio robusto para evaluar la conservación de su funcionalidad hidráulica.

Inspección físico-funcional. Durante la inspección se evidenció acumulación de sedimentos, presencia de raíces, deformaciones y obstrucciones parciales en varios tramos del sistema de drenaje (Figura 6), condiciones que indican un deterioro progresivo y una reducción de su capacidad hidráulica. Más que una caracterización del estado físico, estos hallazgos explican la respuesta hidráulica del sistema después de aproximadamente cinco años de operación. Bahçeci et al. (2018) señalan que la sedimentación, la obstrucción y el crecimiento de raíces reducen la eficiencia hidráulica de los drenes, mientras que Kelly et al. (2025) destacan que estos procesos se intensifican con el tiempo en ausencia de mantenimiento periódico. Los resultados demuestran que la funcionalidad del drenaje en guadua depende no solo de su diseño constructivo, sino también de la conservación de su integridad estructural, condición determinante para su desempeño hidráulico a largo plazo.

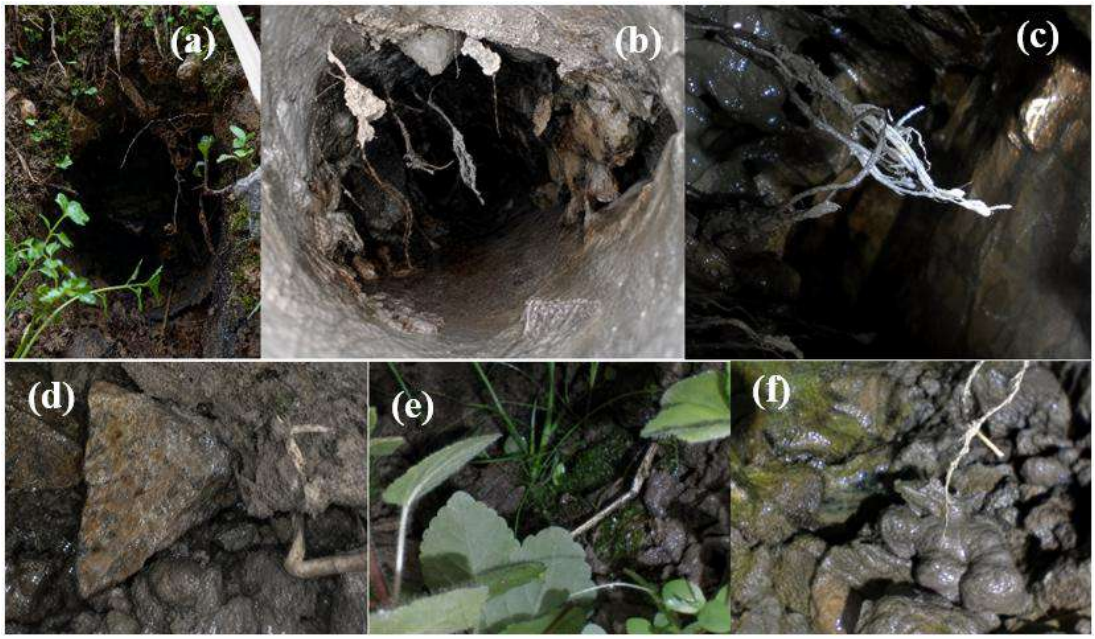


Figura 6. Principales condiciones identificadas durante la inspección: (a) Socavación y erosión localizada en el punto de descarga; (b) Presencia e ingreso de raíces, con deterioro y fragmentación de la guadua, y reducción de la sección hidráulica; (c) Colonización radicular localizada; (d) Obstrucción por desprendimiento del material filtrante; (e) Colonización superficial por vegetación; (f) Acumulación de sedimentos con obstrucción del flujo.

Condiciones hidrológicas durante el periodo experimental

Durante los 96 días de evaluación se registró una precipitación acumulada de 1039,5 mm, equivalente a una precipitación media diaria de 10,83 mm. Se presentaron lluvias en 89 días y solo 7 días sin precipitación, alcanzando máximos diarios de 30 mm los días 4 de mayo y 9 de junio de 2026 (Figura 7). Esta persistencia de las lluvias generó un escenario hidrológico de alta exigencia, manteniendo un aporte continuo de agua al sistema. Salazar Molina (2025) señala que la ocurrencia de eventos consecutivos favorece la respuesta del

nivel freático al conservar elevados contenidos de humedad en el suelo. Bajo estas condiciones, la evaluación adquiere mayor solidez, ya que el desempeño hidráulico del drenaje se analizó en un periodo de carga hídrica sostenida, en lugar de condiciones hidrológicas menos exigentes.

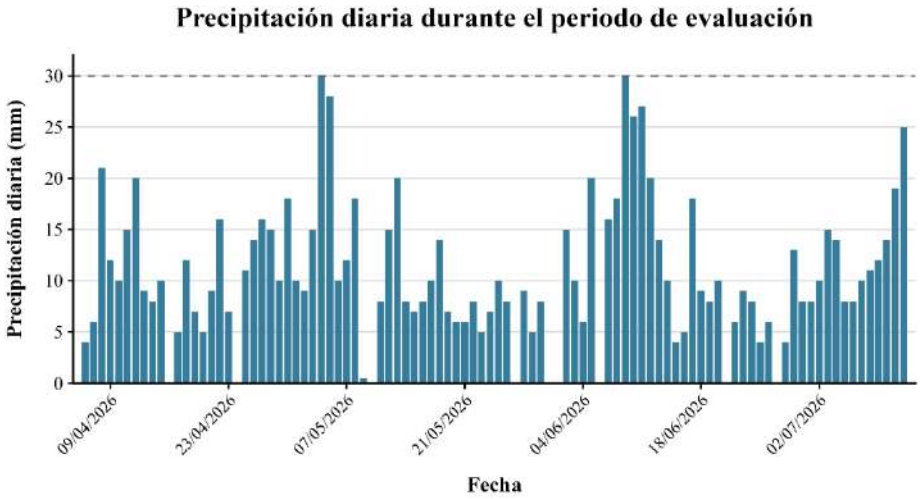


Figura 7. Precipitación diaria durante el periodo experimental.

Respuesta hidráulica del sistema de drenaje

El caudal evacuado presentó una marcada heterogeneidad en la respuesta de los drenes laterales. Aunque T2 registró un caudal medio superior a T1 (1,116 frente a 0,005 mL min^{-1}), esta diferencia no fue estadísticamente significativa (Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 0{,}011$; gl = 1; p = 0,9165). La descarga se concentró únicamente en los drenes Q1.1 y Q2.1, cuyos patrones temporales de flujo se presentan en la Figura 8, debido a que fueron los únicos que registraron caudales medibles durante el periodo de evaluación, mientras que los demás drenes permanecieron sin flujo observable en sus puntos de descarga. Stuyt et al. (2005) atribuyen este comportamiento a la variabilidad espacial del suelo y de las condiciones hidráulicas del drenaje, mientras que Bahçeci et al. (2018) señalan que la sedimentación, las obstrucciones y el crecimiento de raíces reducen progresivamente la capacidad de conducción. La integración de estos resultados con la evaluación físico-funcional evidenció que la respuesta hidráulica del sistema fue parcial y heterogénea, indicando que, después de aproximadamente cinco años de operación, su desempeño estuvo más asociado al estado de conservación de los drenes que a su diseño original.

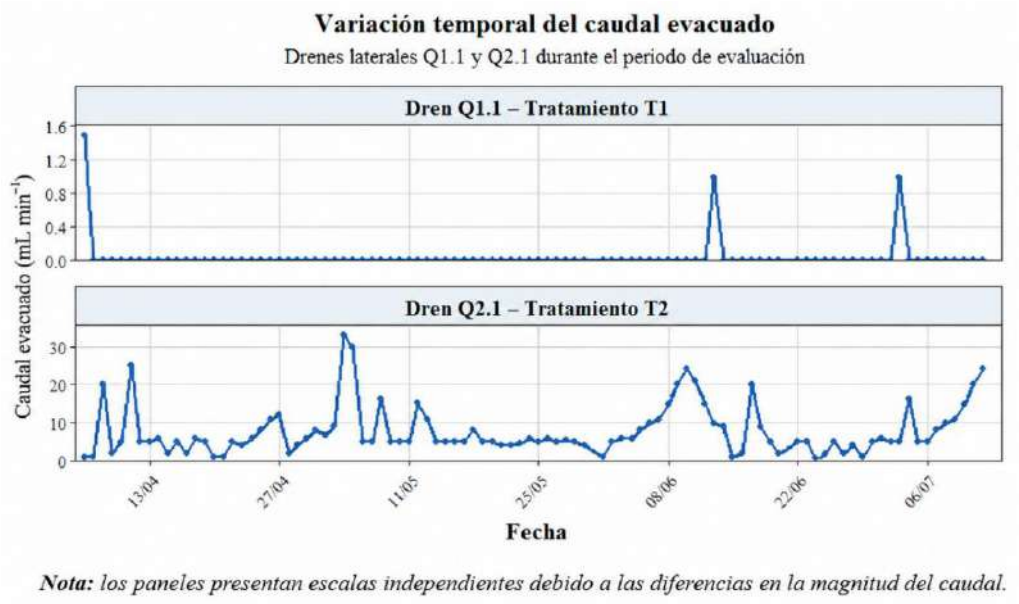


Figura 8. Variación temporal del caudal evacuado en los drenes con descarga durante el periodo de evaluación.

La relación temporal entre la precipitación y el caudal evacuado (Figura 9) mostró que T1 no presentó asociaciones significativas para el mismo día ni para rezagos de uno a tres días ($p > 0,05$). En T2 se observó una asociación positiva con la precipitación del mismo día ($\rho = 0,652$; $p < 0,0001$) y del día anterior ($\rho = 0,390$; $p = 0,0001$), sin evidencia de respuesta para rezagos mayores. Estos resultados coinciden con lo señalado por Gao et al. (2025), quienes indican que la respuesta hidrológica de los sistemas de drenaje depende principalmente de la precipitación reciente. La evidencia obtenida indica que, pese al deterioro físico previamente identificado, el sistema conserva una respuesta hidráulica directamente controlada por los eventos de lluvia, confirmando que mantiene su funcionalidad bajo condiciones hidrológicas reales.

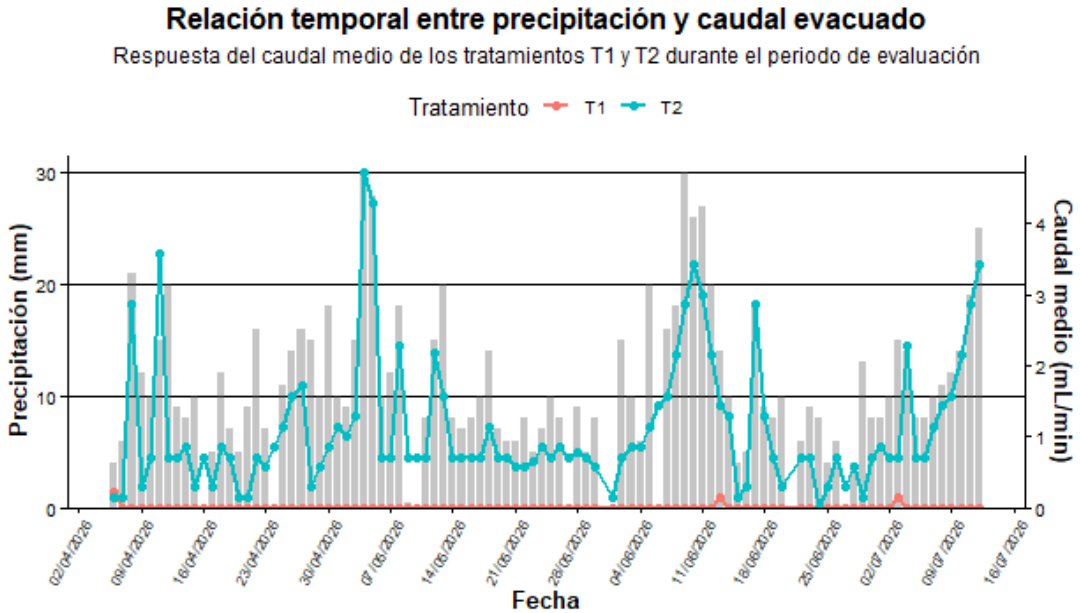


Figura 9. Relación temporal entre la precipitación y el caudal evacuado.

Dinámica del nivel freático y efecto de los tratamientos

La dinámica del nivel freático presentó diferencias significativas entre los tratamientos con drenaje y el control (Figuras 10 y 11). T1 y T2 registraron profundidades medias de 0,938 y 0,861 m, respectivamente, frente a 0,226 m en T3. El modelo GLS confirmó un efecto significativo del tratamiento ($F = 139,02$; $p < 0,001$), sin diferencias entre las pendientes del 2 y 3 % (Tukey, $p = 0,438$), pero sí respecto al control ($p < 0,001$). Los mapas de isobatas e isohipsas del 12 y 15 de junio de 2026 evidenciaron el abatimiento del nivel freático y la reorganización del flujo subterráneo tras la condición hidrológica más crítica. Estos resultados demuestran que la tubería de drenaje construida con *Guadua angustifolia* conserva la capacidad de regular el nivel freático bajo condiciones reales de operación, aportando evidencia experimental de su viabilidad como alternativa tecnológica para el manejo del exceso de agua en suelos con drenaje deficiente.

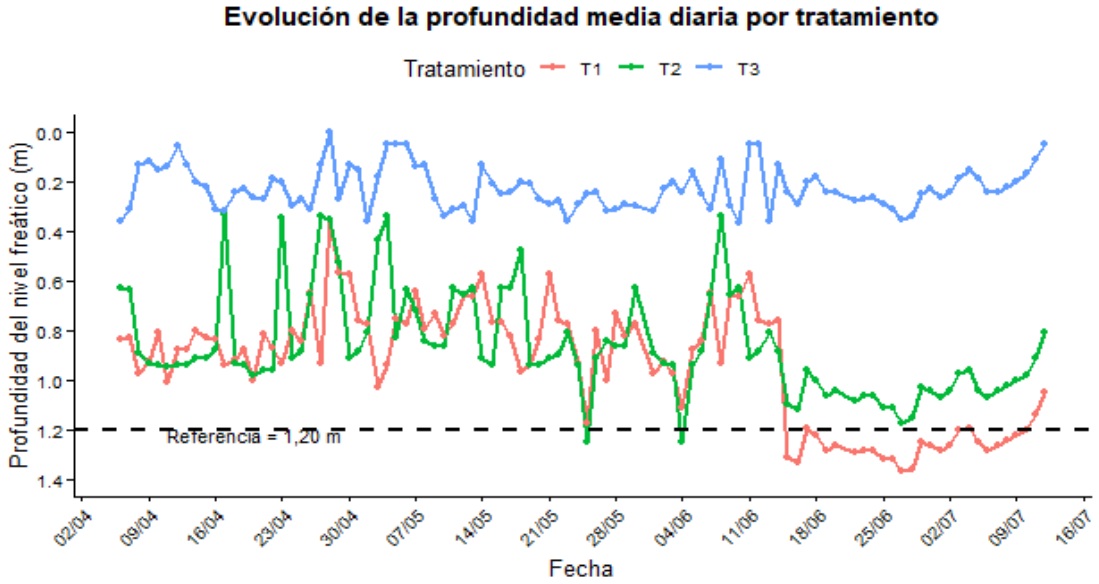


Figura 10. Evolución temporal de la profundidad media del nivel freático por tratamiento.

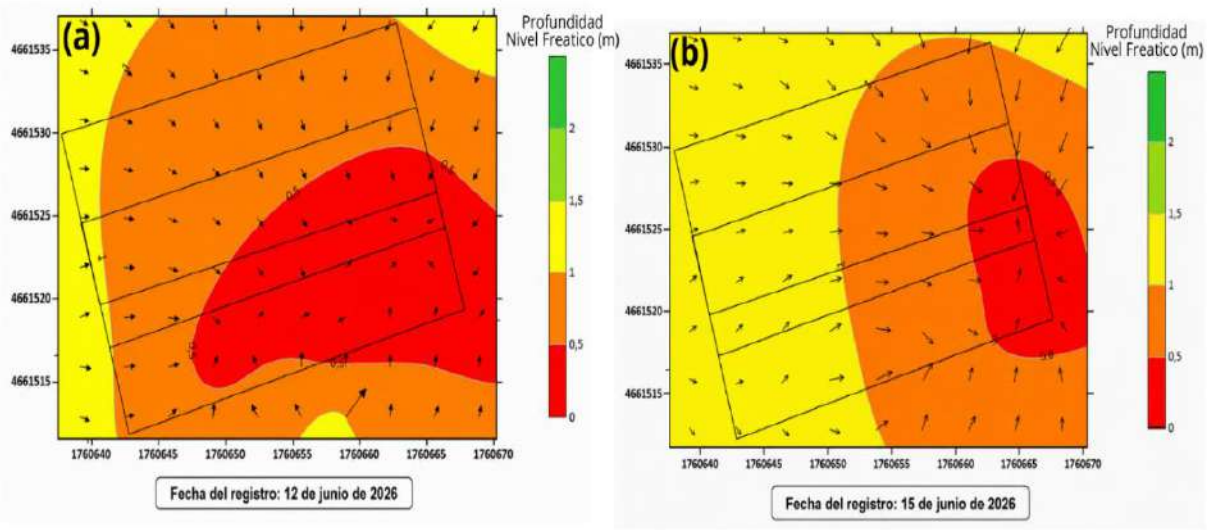


Figura 11. Isobatas e isohipsas de la profundidad del nivel freático: (a) condición de máxima recarga hídrica y (b) recuperación del nivel freático tres días después.

Respuesta de las propiedades hidrodinamicas del suelo

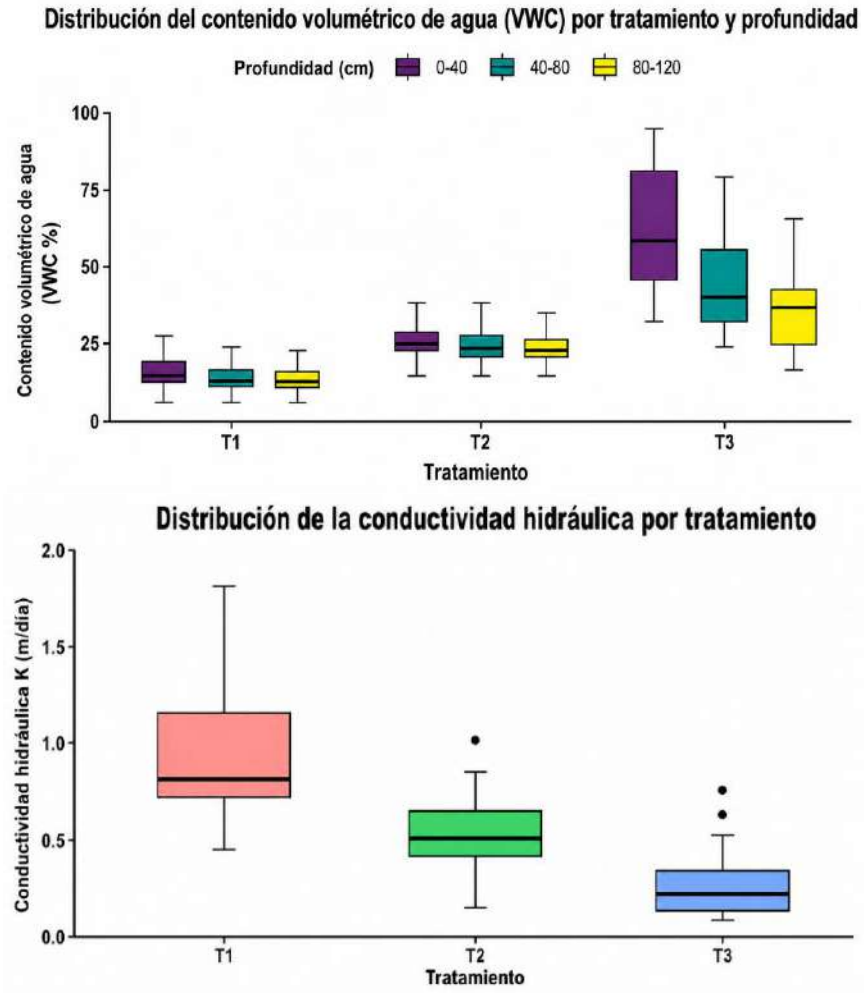


Figura 12. Propiedades hidrofísicas del suelo por tratamiento: (a) Distribución del contenido volumétrico de agua (VWC) por profundidad y (b) distribución de la conductividad hidráulica.

Las propiedades hidrofísicas del suelo difirieron significativamente entre tratamientos, evidenciando el efecto del drenaje sobre la dinámica del agua en el perfil (Figura 11). La humedad gravimétrica fue afectada por el tratamiento, la profundidad y su interacción (GLS; $p < 0,001$), mientras que la infiltración (Kruskal-Wallis; $p < 0,001$) y la conductividad hidráulica (ANOVA; $p < 0,001$) también presentaron diferencias significativas. Según Pizarro (1978), la conductividad hidráulica fue media en T1 y T2, y baja en T3. La correlación de Spearman evidenció una asociación positiva débil entre la conductividad hidráulica y la precipitación únicamente en T2 ($p < 0,05$). demuestra que el sistema de drenaje construido con *Guadua angustifolia* mejora el funcionamiento hidrodinámico del suelo respecto al tratamiento sin drenaje, respaldando su potencial como alternativa tecnológica para el manejo de suelos con drenaje deficiente.

La evaluación integrada de las variables hidráulicas e hidroedáficas evidenció que la respuesta del sistema no fue uniforme. Aunque los tratamientos con drenaje mantuvieron un nivel freático significativamente más profundo que el control, el caudal evacuado fue bajo y se concentró únicamente en algunos drenes, sin diferencias estadísticas entre las pendientes del 2 % y 3 %. Esta diferencia entre la respuesta del caudal y el comportamiento del nivel freático indica que

el desempeño del sistema no puede evaluarse exclusivamente a partir del flujo observado en las salidas. Asimismo, la inspección físico-funcional confirmó la presencia de obstrucciones, sedimentos y raíces, evidenciando que, después de aproximadamente cinco años de operación, el estado de conservación de los drenes constituye un factor más determinante para su funcionamiento que la diferencia de pendiente evaluada. Los resultados respaldan que el sistema conserva la capacidad para regular el nivel freático y mejorar las condiciones hidroedáficas respecto al control, aunque esta respuesta hidráulica fue parcial y heterogénea.

Conclusiones

La evaluación técnica del sistema de drenaje construido con *Guadua angustifolia Kunth* evidenció que, aproximadamente cinco años después de su instalación, las áreas con drenaje mantuvieron un nivel freático significativamente más profundo y mejores condiciones hidroedáficas que el tratamiento sin drenaje, aun cuando la respuesta hidráulica fue heterogénea y el caudal se concentró en pocos drenes. La inspección físico-funcional confirmó que la presencia de obstrucciones, sedimentos y raíces redujo la capacidad hidráulica de parte del sistema, evidenciando que su desempeño depende no solo del diseño constructivo, sino también de su estado de conservación. Como principal aporte, este estudio proporciona evidencia experimental sobre el comportamiento de esta tecnología bajo condiciones reales de operación y destaca el mantenimiento periódico como un factor determinante para preservar su desempeño a largo plazo.

Literatura citada

Akinbile, C. O., Fakayode, O. A., & Sanusi, K. O. (2011). Using bamboo (*Bambusa vulgaris*) as a field drainage material in Nigeria. *African Journal of Environmental Science and Technology*. https://doi.org/10.5897/AJEST11.261

Bahçeci, I., Nacar, A. S., Topalhasan, L., Tari, A. F., & Ritzema, H. P. (2018). A new drainpipe-envelope concept for subsurface drainage systems in irrigated agriculture. *Irrigation and Drainage.* https://doi.org/10.1002/ird.2247

Gao, Y., Li, X., Zhang, Y., Wang, J., & Wang, Z. (2025). Controls of recent precipitation and groundwater recharge on subsurface drainage response in agricultural catchments. *Water Resources Research,* e2024WR037821. https://doi.org/10.1029/2024WR037821

Gomez, A., Arenas, A., & Schilling, K. E. (2025). Surface–subsurface modeling of water dynamics in drained and farmed wetlands in the prairie pothole region. *Agricultural Water Management, 313*, 109477. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109477

ICONTEC. (2013). *NTC 6028. Tuberías de drenaje de policloruro de vinilo rígido (PVC-U). Dimensiones, requisitos y ensayos*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

Kelly, V. J., Arnold, J. G., McGuire, K. J., et al. (2025). *A framework for understanding the effects of subsurface agricultural drainage on downstream flows*. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2025–5023*. https://doi.org/10.3133/sir20255023

Mamani Escobar, G. (2021). *Kostiakov: Velocidad de infiltración y lámina del suelo* [Software de computadora]. Escobar Ingenieros. https://www.youtube.com/watch?v=TG3MuBDdrT4

Ortega, C. L., & Salgado, L. (2001). *Drenaje en suelos agrícolas*. Gobierno de Chile, Ministerio de Agricultura, Comisión Nacional de Riego, Corporación de Fomento de la Producción e Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

Pizarro, F. (1978). *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*. Editora Agrícola Española.

Salazar Molina, C. A. (2025). *Estudios y diseños de los sistemas de drenaje agrícola: Aplicación a las zonas bananeras de Colombia*. Autor.

Stuyt, L. C. P., Dierickx, W., & Martínez Beltrán, J. (2005). *Materials for subsurface land drainage systems* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 60). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/4/a0258e/a0258e00.htm

Zavala, M., Saucedo, H., & Fuentes, C. (2014). Programa de cómputo para analizar la dinámica del agua en sistemas de drenaje agrícola subterráneo. *Agrociencia.*

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Modelo espacial con enfoque hidráulico para la identificación de sitios óptimos de humedales artificiales mediante análisis multicriterio y SIG en la Subcuenca Almoloya-Otzolotepec

Hernández Bautista Valeria Nahomi[1], Cruz Castro Oscar[1], Osornio Berthet Luis Jésus[1], García Martínez Magdalena[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

El Río Lerma-Santiago forma parte del sistema de abastecimiento de agua potable para el Valle de México y sus alrededores, pero se encuentra entre los ríos más contaminados del país y de Latinoamérica. Su rehabilitación y conservación resultan relevantes no solo a nivel nacional, como se plantea en el Plan Nacional Hídrico 2024-2030, sino también a nivel internacional, al albergar el sitio Ramsar "Las Ciénegas del Lerma". Este estudio desarrolló un modelo espacial basado en el análisis multicriterio de información geográfica y satelital mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), específicamente QGIS. El modelo integra aspectos sociales, ambientales, topográficos, hidrológicos e hidráulicos, clave para detectar los sitios óptimos donde aplicar Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), como los humedales artificiales para la fitodepuración de aguas residuales, una alternativa accesible y de bajo impacto ambiental.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica, Humedales Artificiales, Análisis Multicriterio, Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)

Abstract

The Lerma-Santiago River is part of the drinking water supply system for the Valley of Mexico and its surrounding areas, yet it ranks among the most polluted rivers in the country and in Latin America. Its rehabilitation and conservation are significant not only at the national level, as outlined in the 2024-2030 National Water Plan, but also internationally, as it contains the Ramsar site "Las Ciénegas del Lerma." This study developed a spatial model based on multicriteria analysis of geographic and satellite data using Geographic Information Systems (GIS), specifically QGIS. The model integrates social, environmental, topographic, hydrological, and hydraulic aspects, key to identifying optimal sites for applying Nature-based Solutions (NbS), such as constructed wetlands for wastewater phytoremediation, an accessible, low-environmental-impact alternative.

Keywords: Geographic Information Systems, Constructed Wetlands, Multi-Criterial Analysis, Nature-based Solutions (NbS

Introducción

A nivel global, la gestión de los recursos hídricos ha cobrado especial relevancia en las últimas décadas, impulsando la conservación y construcción de infraestructura hídrica para garantizar el acceso de las comunidades al agua potable.

[1]Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación -ESIA UZ. Av. Luis Enrique Erro S/N, Alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México. C.P. 07738. México.

Estos esfuerzos se ven limitados por la creciente demanda del recurso en los sectores industrial, agrícola y doméstico, lo que ha derivado en un abastecimiento insuficiente. A esto se suma que tanto las aguas superficiales (ríos y lagos) como las subterráneas (acuíferos) se encuentran en un estado de vulnerabilidad ambiental por el alto grado de contaminación y sobreexplotación que presentan (IMTA, 2025).



Figura 1. Fotografía del Río Constitución que atraviesa Toluca y desemboca en la cuenca del Río Lerma (Fuente: El Universal, 2022)

En el caso particular de México, una nota publicada el 11 de abril de 2025 por el Grupo BBVA señaló el rezago del país en el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 (ODS-6), establecido en la Agenda 2030, cuyo propósito es garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua, así como el acceso al saneamiento para toda la población. Según esta publicación, en la evaluación del progreso mundial realizada en 2023 México se ubicó por debajo del promedio de América Latina y el Caribe, en la posición 21 de las 27 naciones que integran la región (Lara, 2025).
En respuesta a esta problemática, y en cumplimiento de los compromisos anunciados durante su toma de protesta, la presidenta Claudia Sheinbaum presentó el nuevo Plan Nacional Hídrico 2024-2030 (PNH 2024-2030), que contempla cuatro ejes rectores:

- Política hídrica y soberanía nacional
- Justicia y derechos hídricos
- Mitigación del impacto ambiental y adaptación al cambio climático
- Gestión integral del agua

Este trabajo de investigación surge del eje de mitigación del impacto ambiental y adaptación al cambio climático, en conjunto con la estrategia de saneamiento y restauración de ríos que forma parte del plan. Dicha estrategia se enfoca en tres ríos: Atoyac, Tula y Lerma-Santiago, considerados los más contaminados del país y entre los principales de Latinoamérica (Presidencia de la República, 2024).

Caso Lerma-Santiago

El río Lerma-Santiago forma parte de la Región Hidrológica Administrativa (RHA) VIII Lerma Santiago Pacífico, ubicada en la zona centro-occidente de México. Esta región abarca la

totalidad de los estados de Aguascalientes y Colima, además de porciones de Guanajuato, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Nayarit, Querétaro y Zacatecas, con una extensión territorial de 182,460.14 km² (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2022).

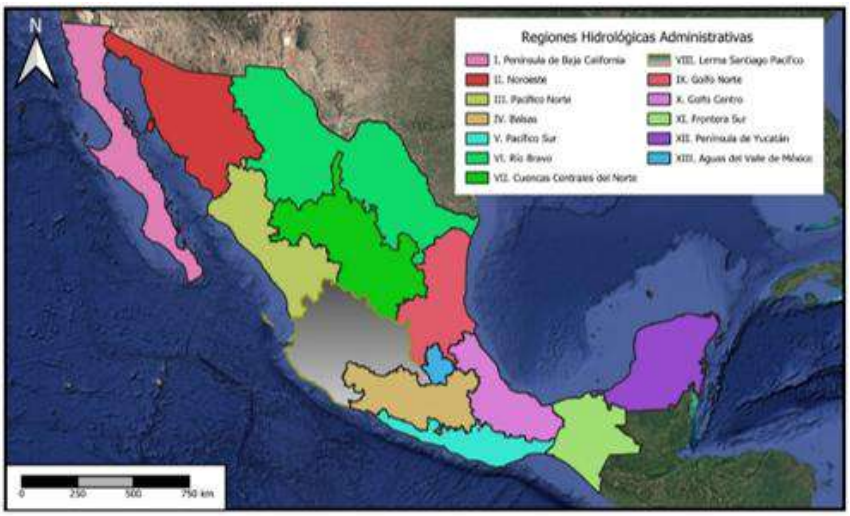


Figura 2. Regiones Hidrológicas Administrativas. Elaboración propia basado en el Geoportal CONABIO.

El área de estudio se ubica dentro de la Región Hidrológica No. 12 (RH12), Lerma-Santiago, específicamente en la subcuenca Almoloya-Otzolotepec (clave RH12Aa), unidad básica para la gestión de los recursos hídricos en la zona. Esta subcuenca comprende el tramo alto del río Lerma, por lo que el sitio de estudio se localiza principalmente en el Estado de México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2019).

El río Lerma-Santiago es uno de los considerados en el PNH 2024-2030 debido a su grado de degradación ambiental, documentado por diversas investigaciones en la región. Entre ellas, el diagnóstico realizado por la CONAGUA entre 2012 y 2018, en el que se analizaron 840 sitios de la RH12 y se encontró que 449 no cumplían con los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), toxicidad y/o enterococos, este último indicador aplicable solo a sitios costeros. En el área de estudio de esta investigación, la CONAGUA evaluó 23 sitios de monitoreo de calidad del agua, de los cuales únicamente uno cumplió con los rangos permisibles establecidos, lo que muestra que la contaminación de las aguas superficiales se presenta desde la parte alta del cauce principal del río y se intensifica conforme avanza aguas abajo (CONAGUA, s.f.).

Este panorama vuelve preocupante el estado de conservación de los ríos de la región, tanto por la incertidumbre que representa para el abastecimiento futuro de agua potable como por las implicaciones ambientales del deterioro. La situación cobra mayor relevancia por la presencia de áreas naturales protegidas (ANP) en la zona, entre ellas las Ciénegas del Lerma, un ecosistema de importancia ecológica estatal y nacional que además cuenta con reconocimiento internacional, al haber sido incorporado desde 2003 a la Lista de Humedales de Importancia Internacional de la Convención Ramsar (Ceballos, 2003). Por ello, la rehabilitación de la red de drenaje de la subcuenca resulta prioritaria, en línea con las acciones que propone el PNH 2024-2030 para la rehabilitación y saneamiento de cuerpos de agua (Presidencia de la República, 2024):

- Construcción y rehabilitación de plantas de tratamiento y colectores.
- Construcción de líneas para reúso de agua.
- Eliminación de descargas contaminantes.

- Instalación de sistemas de monitoreo de calidad del agua.
- Reforestación.
- Restauración.
- Humedales.

Los humedales artificiales representan una de las alternativas más prometedoras para avanzar en este objetivo. Se trata de estructuras diseñadas para reproducir los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren de forma natural en los humedales, zonas de transición entre los ecosistemas terrestres y acuáticos. Entre las funciones ecosistémicas de los humedales naturales destacan la regulación del ciclo hidrológico, la mitigación de inundaciones y sequías, la conservación de la humedad del suelo, la recarga de acuíferos y la depuración natural del agua. Esta última función ha impulsado el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas residuales inspirados en la naturaleza, como los humedales artificiales o construidos, reconocidos como una de las principales Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) para la gestión sostenible de los recursos hídricos, gracias a su capacidad de proporcionar servicios ecosistémicos y mejorar la calidad del agua mediante procesos naturales (Ferreira et al., 2023).
El presente estudio tiene como objetivo identificar las zonas con mayor aptitud para la implementación de humedales artificiales destinados al saneamiento de la subcuenca RH12Aa, como sitio piloto de aplicación. Para ello se desarrolló un modelo espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), que integra cinco componentes: hidrológico-hidráulico, ambiental, social, topográfico y climatológico. El modelo se evaluó posteriormente mediante una Evaluación Multicriterio (EMC), herramienta que permite ponderar y jerarquizar los criterios según su importancia relativa, considerando al mismo tiempo la interacción entre ellos, con el fin de priorizar los aspectos del modelo y seleccionar los sitios con mayor grado de aptitud y adaptabilidad.

Materiales y Métodos

Los SIG constituyen una plataforma fundamental para el análisis y la resolución de problemas multifactoriales, como el caso de estudio para la investigación presente; donde se desarrolló un modelo espacial en la interfaz del programa Qgis, que permite integrar las variables espaciales que describen las características del sitio de estudio, junto con los criterios técnicos de los humedales artificiales y la EMC, como una herramienta auxiliar en la determinación y selección de sitios óptimos para implementar estas SbN, de tal forma que se involucren y ponderen las características geoespaciales y los criterios técnicos de aplicación. Para esto la metodología utilizada se estructuro en tres fases principales, mismas que se describen a continuación:

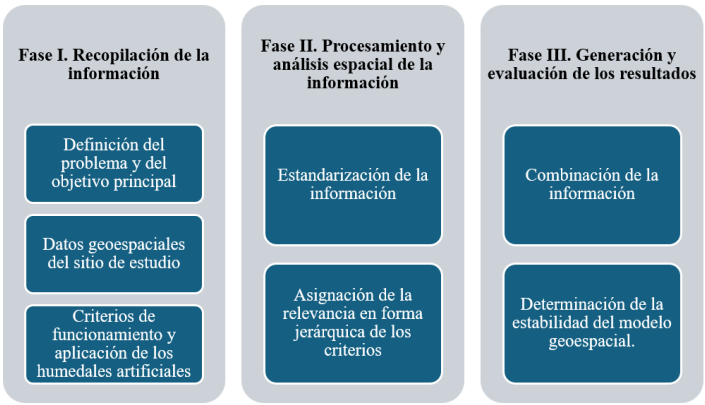


Figura 3. Fases de la metodología.

Fase I. Recopilación de la información

Dentro de esta fase inicial, se especifican los límites, alcances y objetivo principal del modelo en desarrollo, que permite trazar una guía de acción para la recolección de la información y geodatos que se requieren para el modelo en cuestión. Por lo que, las principales acciones a desarrollar en esta fase son:

- Definición del problema y objetivo principal: Consiste en delimitar el problema con base en sus fundamentos e información geográfica, y traducir esa delimitación en objetivos claros que orienten tanto el planteamiento del problema como su solución.

- Datos geoespaciales del sitio de estudio: Con la información geográfica disponible, cada variable se clasifica como restricción o como factor de aptitud. Las restricciones corresponden a zonas completamente excluidas por mandato legal o físico, como las áreas naturales protegidas (ANP) o las manchas urbanas. Los factores de aptitud, en cambio, agrupan las variables que permiten comparar qué tan apto es un sitio frente a otro. Las restricciones se codifican en la malla ráster en formato binario (0 y 1), indicando si el sitio es apto o no.

- Criterios de funcionamiento y aplicación de los humedales artificiales: Este proceso consiste en recopilar y sistematizar la información disponible sobre humedales artificiales, tomando como fuentes principales manuales gubernamentales especializados en tratamiento de agua y artículos científicos publicados sobre el tema. El propósito es comprender tanto su funcionamiento como los criterios que rigen su diseño.

Fase II. Procesamiento y análisis espacial de la información

En esta fase, la información geográfica se prepara y estandariza para hacerla comparable dentro del SIG: se homologan las capas a un mismo sistema de referencia, se normalizan las variables a una misma escala y se jerarquiza su importancia mediante comparaciones por pares, mientras que las zonas restringidas quedan automáticamente excluidas del análisis. Dicha etapa se compone de dos pasos principales:

- Estandarización de la información: Los factores que integran el modelo están directamente ligados a la naturaleza de la información que representan, por lo que suelen presentar escalas y unidades físicas distintas entre sí, lo que impide operarlos de forma conjunta. Para resolver esto, la literatura propone normalizar la información, transformando los criterios a una escala adimensional común dentro del mallado ráster. Esto se realiza comúnmente mediante la Estandarización Lineal por Puntuación de Rango, que asigna valores a las celdas del mallado según el comportamiento del factor: "a mayor valor, mayor aptitud" o "a menor valor, mayor aptitud"

- Asignación de la relevancia en forma jerárquica de los criterios: Después de homogeneizar la información mediante la estandarización, se asigna la prioridad de cada criterio con el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), desarrollado por Thomas Saaty (1980), que consiste en construir una matriz de comparación pareada entre todos los criterios, calificando su importancia relativa en una escala del 1 al 9. A partir de esta matriz se obtienen, mediante el método de aproximación por media aritmética normalizada, los pesos relativos de cada criterio, los cuales deben sumar 1 para

representar el 100% de la decisión. Finalmente, se calcula el índice y la relación de consistencia, exigiéndose que esta última sea menor a 0.10 para validar que los resultados del modelo son consistentes y estables.

Fase III. Generación y evaluación de los resultados

En esta fase se integran los resultados del análisis multicriterio para generar el mapa de aptitud territorial, que clasifica el territorio de la subcuenca RH12Aa según su potencial para la implementación de humedales artificiales orientados a la fitodepuración y rehabilitación ambiental, distinguiendo zonas de muy alta a nula aptitud como base para la toma de decisiones en la planeación de SbN para el saneamiento de la cuenca del río Lerma-Santiago. Componiendo se de los siguientes pasos:

- Combinación de la información: Este último proceso integra las mallas rasterizadas y homogeneizadas junto con los pesos calculados mediante AHP y el mallado binario de restricciones a través de la Combinación Lineal Ponderada (WLC, por sus siglas en inglés), que expresa la aptitud global del sitio. El programa realiza esta operación celda por celda en el mallado, multiplicando cada factor por su peso y por las restricciones del sitio para obtener el valor final de aptitud.

- Determinación de la estabilidad del modelo geoespacial: Debido a la naturaleza de los datos que alimentan el modelo, la aptitud obtenida para los sitios no representa la etapa final del análisis, sino que requiere validarse mediante un análisis de sensibilidad que evalúe la estabilidad del modelo. Para ello, los criterios de mayor peso se someten a variaciones controladas, con el fin de observar en qué medida cambian los resultados obtenidos previamente.

Resultados y discusión

Los resultados que se han obtenido responden al periodo de A26 (febrero 2026-junio 2026); debido a que la investigación presente sigue en curso. Actualmente el estudio se encuentra concluyendo su primera fase, enfocada en la recopilación de información del sitio de interés y de los criterios de ubicación para la implementación de humedales artificiales de fitorremediación.

Criterios de consideración para la selección óptima del sitio

Como parte de los resultados parciales obtenidos hasta el momento, se definió un conjunto de parámetros mínimos que debe cumplir el sitio elegido para la implementación de humedales artificiales. Estos parámetros buscan garantizar el correcto funcionamiento del sistema, facilitar su mantenimiento y posibles ampliaciones futuras, y asegurar una ubicación estratégica que evite conflictos con las comunidades cercanas. Asimismo, se busca que el punto seleccionado favorezca un cambio positivo en el ecosistema, sin generar alteraciones que pongan en riesgo al entorno ni a las especies que lo habitan. Los parámetros considerados son los siguientes:

- Cercanía con la fuente de emisión de aguas residuales.
- Áreas amplias que permitan una futura ampliación.
- Distancia de 7 a 10 km respecto a núcleos urbanos.
- Congruencia con los planes de desarrollo humano del estado.
- Pendientes del terreno entre 0.5% y 3%.

- Ubicación fuera de zonas propensas a inundaciones.
- Suelos poco permeables, con niveles freáticos no someros.
- Exposición solar constante.
- Dirección predominante del viento.
- Temperatura local.
- Acceso directo a vías de comunicación.
- Distancia respecto a aeropuertos y pasos peatonales.

Este proceso metodológico se desarrolló con base en los criterios técnicos establecidos en manuales, guías y documentos normativos especializados en el diseño e implementación de humedales artificiales.

Caracterización espacial del área de estudio

Para caracterizar el territorio se recopiló información de diversas fuentes oficiales: DENUE, SIATL, REPDA, CONAGUA, CONABIO, GeoInfoMex, el Geoportal de la UNAM y el Atlas Cibernético del Estado de México. Con esta información se elaboraron alrededor de 25 mapas temáticos, agrupados en los componentes hidrológico-hidráulico, ambiental, social, topográfico y climatológico.

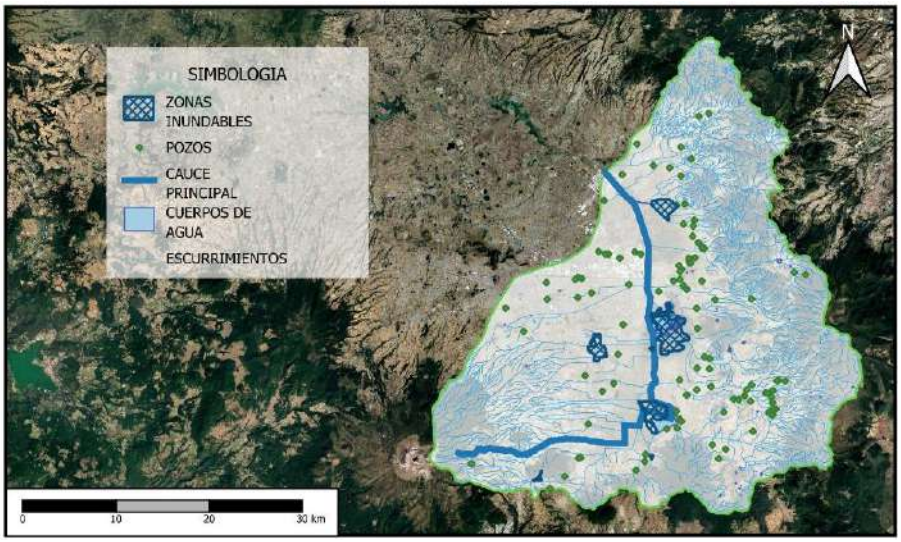


Figura 4. Mapa de red hidrológica (hidrológicos/hidráulicos)

La Figura 4 presenta la red hidrológica de la subcuenca RH12Aa, y la Figura 3 muestra la distribución espacial de la calidad del agua superficial, junto con la ubicación de los humedales naturales existentes y las áreas potenciales para humedales artificiales de tipo lacustre, fluvial y construido.

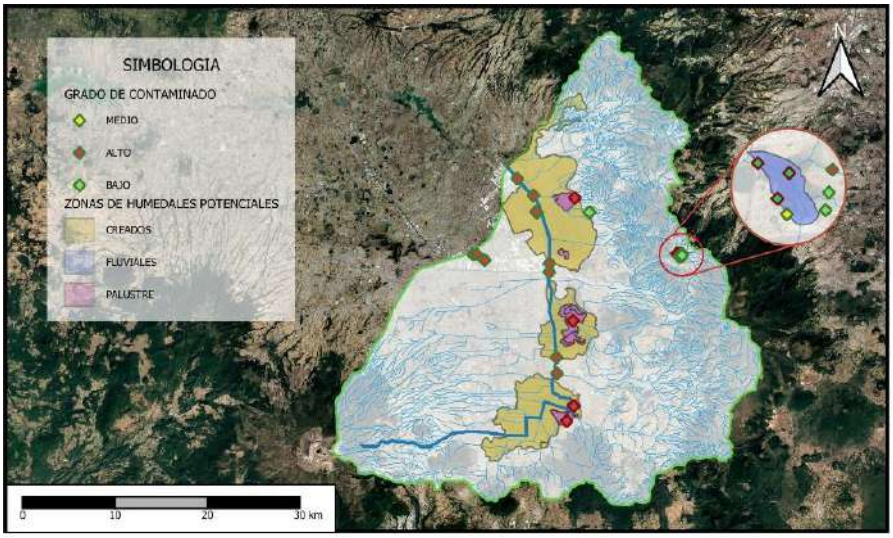


Figura 5. Mapa de grado de contaminación en cuerpos de agua y zonas potenciales para humedales (ambiental).

La Figura 5 muestra el grado de contaminación de los cuerpos de agua superficiales, tanto lénticos como lóticos, junto con las zonas potenciales para la implementación de humedales artificiales lacustres, fluviales y construidos, ofreciendo un panorama general del estado de la red hídrica y de las zonas con potencial de aprovechamiento.

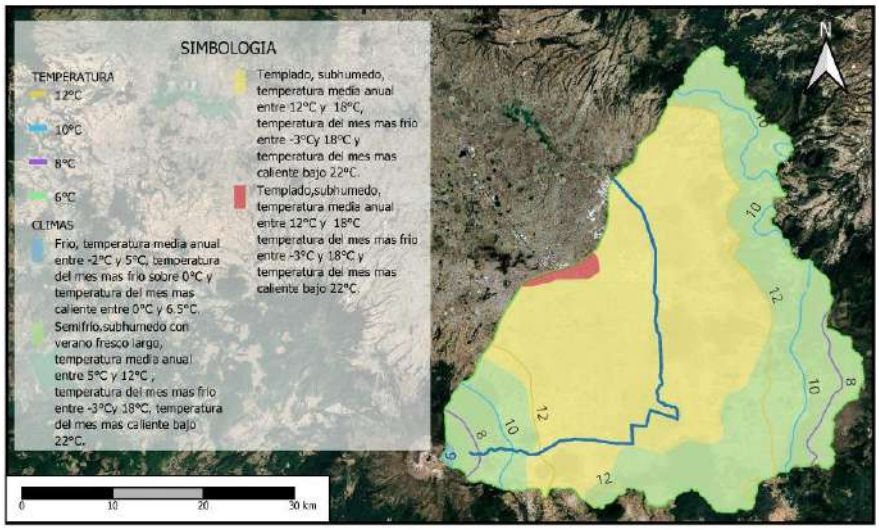


Figura 6. Mapa de temperaturas (climatología).

El mapa de temperaturas de la Figura 6 describe el régimen de temperaturas medias y el clima predominante en cada sección del sitio, información que resulta útil para determinar qué especie macrófita se adapta mejor a las condiciones climáticas de cada zona.

La Figura 7, por su parte, muestra la distribución urbana por manzanas vecinales dentro de los 29 municipios que integran el sitio de estudio: Tlalpan, La Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Cuajimalpa de Morelos, Capulhuac, San Mateo Atenco, Atizapán, Ocoyoacac, Tianguistenco, Naucalpan de Juárez, Toluca, Lerma, Jilotzingo, Huixquilucan, Isidro Fabela, Rayón, Otzolotepec, Almoloya del Río, Texcalyacac, Xonacatlán, Mexicaltzingo, Metepec, Joquicingo, Tenango del Valle, Ocuilan, San Antonio la Isla, Chapultepec, Calimaya y

Xalatlaco. De estos, 4 corresponden a la Ciudad de México y el resto al Estado de México, lo que permite identificar los lineamientos y mandatos municipales que rigen cada extensión de terreno, así como las áreas ejidales destinadas a actividades agrícolas, ganaderas o forestales.

Finalmente, la Figura 8 detalla la conformación edafológica del sitio, la cual indica qué tan apto es el suelo para la implementación del humedal artificial y permite anticipar infiltraciones que puedan afectar los mantos acuíferos. A partir de esto se identifican las consideraciones técnicas necesarias para cada sitio, algunas de las cuales podrían incrementar el costo del proyecto.

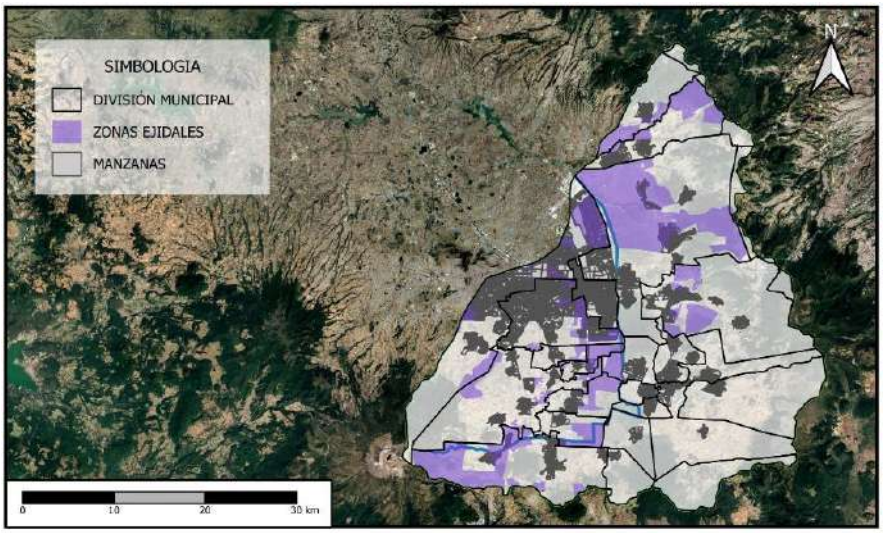


Figura 7. Mapa de organización municipal, zonas ejidales y núcleos urbanos (social).

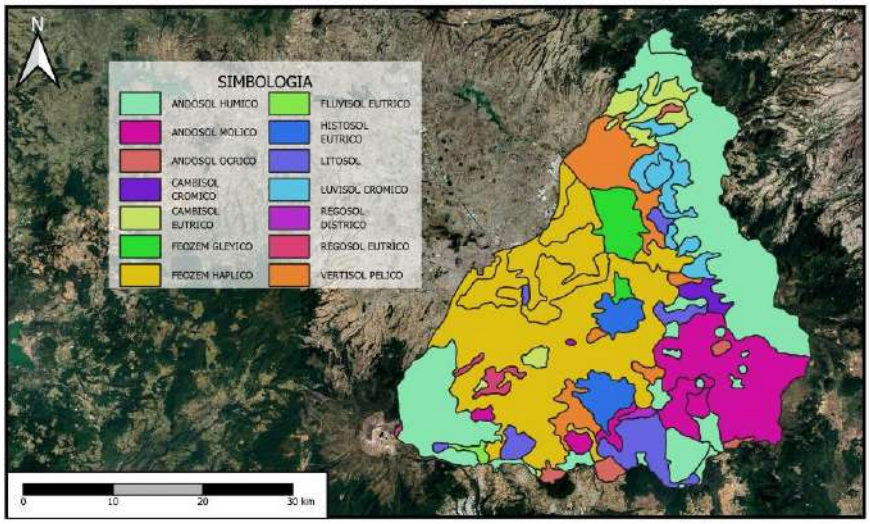


Figura 8. Mapa de conformación edafológica del suelo (topográfico).

Conclusiones

La recopilación de los parámetros y criterios mínimos para la detección de sitios idóneos para humedales artificiales de fitorremediación, junto con la información geográfica contenida en los mapas, que describe las características geomorfológicas, sociales, económicas, climatológicas, hidrológicas, hidráulicas y ambientales del sitio de estudio, constituye la base principal para desglosar los parámetros que debe cumplir el modelo espacial en la detección de

sitios de interés. Esto permite avanzar hacia las siguientes fases del estudio y confirma que la información recabada hasta el momento es suficiente para alimentar el modelo espacial desarrollado en QGIS, el SIG empleado para este caso de estudio, dando así continuidad al trabajo.

Con esto se determina que la Evaluación Multicriterio (EMC) apoyada en SIG puede emplearse en proyectos ambientales como herramienta de soporte para la toma de decisiones, dotando de racionalidad y legitimidad a los sitios detectados por el sistema y dando como resultado una propuesta realista, coherente y consistente para todos los involucrados en el proyecto.

Literatura Citada

Libro

Ceballos, G. (17 de octubre de 2003). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR): Ciénegas del Lerma [Informe técnico]. Instituto de Ecología, UNAM. https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/MX1335RIS.pdf

Comisión Nacional del Agua. (2015). Diseño de Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales (Libro 30). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf

Comisión Nacional del Agua. (2022). Programa Hídrico Regional 2021-2024: Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_VIII_LSP.pdf

Comisión Nacional del Agua. (2026). Lineamientos técnicos: Sistema de tratamiento de aguas residuales a nivel vivienda en zona rural (Versión 3.4). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/1070199/LINEAMIENTOS_TECNICOS_SISTEMA_DE_SANEAMIENTO_BASICO_2026.pdf

Comisión Nacional del Agua. (s.f.). Diagnóstico de calidad del agua de la Región Hidrológica Lerma Santiago Pacífico: Resultados de la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua [Informe técnico]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/calidad_del_agua/diagnostico_lerma_santiago_pacifico_2012-2018.pdf

Fernández González, J. (Coord.). (2005). Manual de fitodepuración: Filtros de macrófitas en flotación. Universidad Politécnica de Madrid; Fundación Global Nature. https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2021). Construir un humedal para el tratamiento del agua residual. Ecoagua. https://www.imta.gob.mx/gobmx/DOI/ecoagua/ecoagua-humedal-tratamiento-del-agua-residual.pdf

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2025). Programa Institucional del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 2025–2030. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.imta.gob.mx/gobmx/2025/PIIMTA-2025-2030.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). Cuenca hidrológica Río Lerma 1: humedales: informe técnico. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825188740.pdf

Lara, M. (11 de abril de 2025). México Agua que no has de beber: tendencias sobre el uso y disponibilidad hídrica. BBVA Research. https://www.bbvaresearch.com/wp-content/uploads/2025/04/Mexico-situacion-hidrica-2025.pdf

Olaya Víctor (2014) Sistemas de Información Geográfica. https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf

Presidencia de la República. (21 de noviembre de 2024). Plan Nacional Hídrico 2024-2030. México. https://www.inep.org/images/2024/TXT/2024-2030-Plan_Hidrico.pdf

Revistas

Ferreira, C. S. S., Kalantari, Z., & Destouni, G. (2023). Wetlands as nature-based solutions for water management in different environments. Current Opinion in Environmental Science & Health, 33, Artículo 100476. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100476

Gualdrón, D. F., Reyes, P. S., & Villate, J. J. (2020). Identificación de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja (Colombia) por medio de Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio. Revista Espacios, .41(31), 252–266.

Referencia electrónica

El Universal. (2022). Río Constitución contaminado con basura y envases de plástico [Fotografía]. El Universal. https://www.eluniversal.com.mx/nacion/llaman-en-senado-salvar-el-rio-lerma-de-la-contaminacion/

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Efectos de silicio y fosfito en el biocontrol de *Fusarium verticillioides* en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.).

Zyanya Jazmín Castro-Pérez[1], Fernando Carlos Gómez- Merino[1*], Libia Iris Trejo-Tellez[1], Víctor Hugo Carbajal-Vázquez[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La pudrición de la mazorca de maíz (*Zea mays* L.) causada por *Fusarium verticillioides* representa uno de los principales problemas de este cultivo, ya que, además de ocasionar pérdidas productivas, constituye un riesgo para la salud humana debido a la producción de micotoxinas. El objetivo fue evaluar los efectos de la aplicación de silicio (Si) y fosfito (Phi) en el biocontrol de *F. verticillioide*s. El experimento se llevó a cabo en Reyes Mantecón y Santa Inés Yatzeche, Oaxaca, México, bajo un diseño factorial 5 × 2 × 2, con los factores híbrido, Si y Phi, con tres repeticiones. Los tratamientos consistieron en dos niveles de Si (0 y 2 mM) y dos de Phi (0 y 20 Phi, % del P total), aplicados en las etapas fenológicas V4, V6 y V10. Se emplearon los híbridos de maíz blanco: H-391, SKW-302, Ares, DK-390 y SKW-307. Se evaluó el porcentaje de pudrición de mazorca en campo y se identificó el patógeno asociado. En Reyes Mantecón se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos; en todos los híbridos, la mayor pudrición se observó en el testigo, mientras que Phi obtuvo los menores valores en tres híbridos. En Santa Inés, el factor bioestimulante fue significativo y el Phi redujo la pudrición respecto al testigo. La combinación de Si + Phi, incrementó el rendimiento en Reyes Mantecón. Los resultados indican que el uso de fosfito, solo o combinado con silicio, constituyen una alternativa para el biocontrol de *F. verticillioides* en maíz.

Palabras clave: fosfito, silicio, biocontrol

Abstract

Maize (*Zea mays* L.) ear rot caused by *Fusarium verticillioides* is a major constraint on production of this crop because, in addition to causing yield losses, it poses a risk to human health through mycotoxin production. This study aimed to evaluate the effects of foliar applications of silicon (Si) and phosphite (Phi) on the biocontrol of *F. verticillioides*. The experiment was conducted at Reyes Mantecón and Santa Inés Yatzeche, Oaxaca, Mexico, using a 5 × 2 × 2 factorial arrangement with hybrid, Si, and Phi as factors and three replicates. The treatments consisted of two Si levels (0 and 2 mM) and two Phi levels (0 and 20% of the total phosphorus supplied as phosphite), applied at the V4, V6, and V10 growth stages. Five white maize hybrids were evaluated: H-391, SKW-302, Ares, DK-390, and SKW-307. Ear rot incidence was assessed under field conditions, and the associated pathogen was identified. At Reyes Mantecón, significant differences among treatments were detected. The untreated control showed the highest ear rot incidence in all hybrids, whereas Phi resulted in the lowest incidence in three of them. At Santa Inés Yatzeche, the treatment effect was significant, and Phi reduced ear rot incidence compared with the untreated control. The combined application of Si and Phi increased yield at Reyes Mantecón.

[1]Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco 56264, Estado de México, México. fernandg@colpos.mx

These results indicate that phosphite, applied alone or in combination with silicon, has potential as an alternative for the biocontrol of *F. verticillioides* in maize.

Keywords: phosphite, silicon, biocontrol.

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo estratégico que tiene un profundo arraigo gastronómico y cultural en México. En términos de producción, México ocupa el séptimo lugar a nivel mundial, con 27.5 millones de Mg al año (Orús, 2024; SIAP, 2025).
Los hongos representan uno de los principales grupos de patógenos que afectan a los cereales. Entre ellos *Fusarium verticillioides*, un fitopatógeno de amplia distribución, asociado principalmente a maíz, arroz, trigo, sorgo, entre otros cultivos (Deepa *et al.,* 2021). Este patógeno puede causar tizón en plántulas, pudrición en tallo, pudrición de mazorca y semillas, representado un problema de importante, no solo debido a las pérdidas económicas y repercusiones en el comercio, sino también por la producción de micotoxinas, que son metabolitos secundarios peligrosos para la salud humana y animal, destacando las fumonsinas, clasificadas con potencial carcinógeno (de la Torre-Hernández et al., 2014; Xu *et al.,* 2023).
El control convencional de las enfermedades causadas por *Fusarium* se realiza mediante la aplicación de fungicidas como lo son los benzimidazoles. No obstante, el uso indiscriminado de este producto induce mecanismos de resistencia que dificulta su control (McGovern, 2015; Patel *et al*., 2019). Por ello es necesario buscar nuevas alternativas sostenibles que nos acerquen a un manejo biorracional. En las alternativas de manejo se incluye el control biológico y la inducción de resistencia a enfermedades mediante el uso de bioestimulantes inorgánicos que a su vez funcionan en esquemas de biocontrol (Oyaburo *et al*., 2015; Gómez-Merino & Trejo-Tellez, 2016). El silicio (Si) y el fosfito (Phi) son agentes útiles en enfoques de biocontrol mediante la activación de mecanismos de defensa en las plantas. En particular el Phi se ha propuesto como una alternativa a los fungicidas convencionales (Massoud *et al*., 2012; Liljeroth *et al*., 2016). Por lo que, en esta investigación se analizaron los efectos de estos dos factores (Si y Phi) en el biocontrol de *Fusarium verticillioides* en el cultivo de maíz.

Materiales y métodos

Sitio experimental y material vegetal

El experimento se realizó en dos sitios de la región de Valles Centrales del estado de Oaxaca. La siembra en el sitio 1 se realizó el 29 de mayo de 2025 en la comunidad de Reyes Mantecón localizado a 16º54’44’’N, 96º44’23’’O, a 1500 m de altitud. El sitio 2 se sembró el 4 de julio de 2025 en la comunidad Santa Inés Yatzeche, localizado a 16°47’58" de latitud norte 96°45’50” de longitud oeste, a 1470 m de altitud. Se sembraron cinco híbridos de maíz (*Zea mays* L.) blanco subtropical: H-391, SKW-302, Ares, DK-390 y SKW-307.

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos consistieron en dos niveles de silicio (0 y 2 mM), y dos niveles de fosfito (0 y 20 Phi, % del P total). La fuente de silicio fue metasilicato de sodio (Na_2SiO_3) (Sigma-Aldrich®; Darmstadt, Alemania) y para fosfito se empleó ácido fosforoso (H_3PO_3) (Sigma-Aldrich®). Se realizaron aplicaciones foliares en diferentes etapas fenológicas en fase vegetativa: V4, V6 y V10. Para cada sitio se utilizó un diseño factorial 5 × 2 × 2, considerando como factores: híbrido, silicio y fosfito. Cada combinación de tratamientos tuvo tres

repeticiones. En total el experimento contó con 60 unidades experimentales, cada unidad experimental fue una parcela de dos surcos con 5 m de longitud.



Figura 1. Aplicaciones de tratamientos en las diferentes etapas fenológicas del maíz en Santa Inés Yatzeche, Oaxaca, México. Fuente: de autoría propia.

Variables medidas

Para la evaluación del porcentaje de pudrición de mazorca, se registró el número de mazorcas con pudrición por unidad experimental, considerando aquellas que presentaron al menos 10 % de daño, estas se compararon con el total de las mazorcas de la unidad.

Se realizó la identificación morfológica de *Fusarium* y la purificación del aislamiento mediante cultivos de punta de hifa y monospóricos para su identificación molecular.

Análisis estadístico

Se realizó la prueba de normalidad y prueba de homogeneidad de varianza. Las variables que cumplieron con las dos pruebas antes descritas; se realizaron con los resultados de ellas análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). Las variables que no cumplieron los supuestos, se realizaron análisis no paramétricos de Kruskal-Wallis y la sumatoria de rangos de Wilcoxon.

Resultados y discusión

Porcentaje de pudrición de las mazorcas

En Reyes Mantecón, los resultados obtenidos con el análisis no paramétrico Kruskal-Wallis permiten afirmar que existieron diferencias en el porcentaje de la pudrición de mazorcas entre tratamientos (Figura 3). En todos los híbridos, el mayor porcentaje de pudrición se registró en el testigo sin bioestimulante. En los híbridos Dekalb-390, H-391 y SKW-307 la menor pudrición de mazorcas se registró en plantas tratadas con Phi.

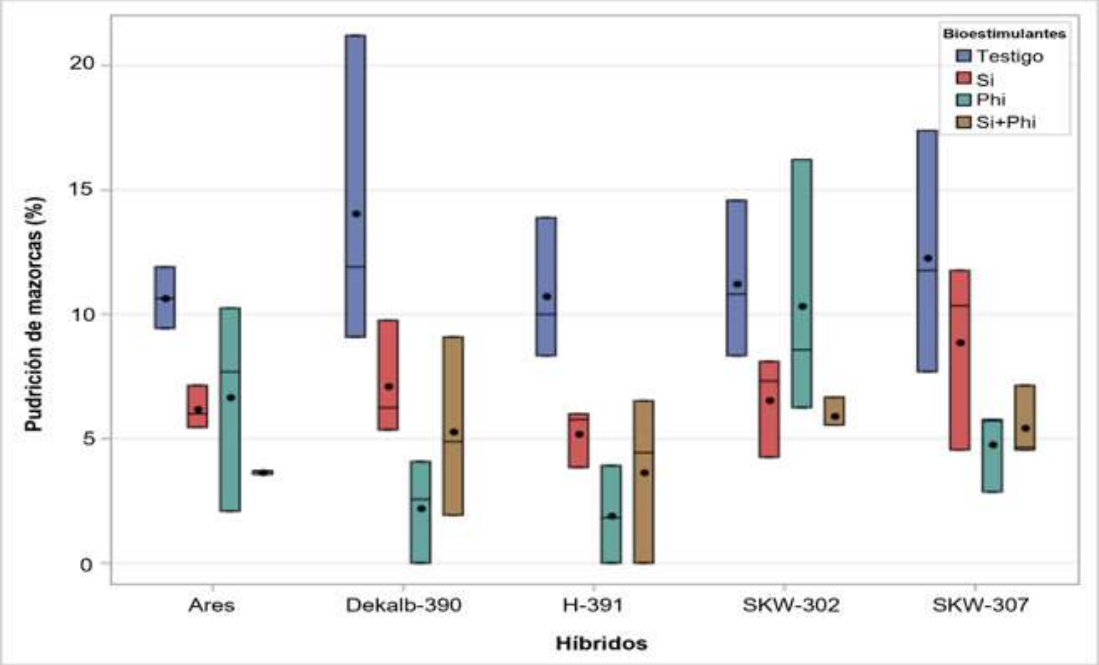


Figura 3. Diagrama de caja que presenta el porcentaje de pudrición de las mazorcas de cinco híbridos de maíz (*Zea mays* L.) tratados vía foliar con [silicio (Si) y fosfito (Phi)] establecidos en Reyes Mantecón, Oaxaca, México. La mediana es la línea horizontal y la media el círculo negro en cada cuadro. Análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis (Pr > ChiSq = 0.0018). Fuente: de autoría propia.

En el sitio experimental Santa Inés Yatzeche, solamente el factor bioestimulantes fue significativo en la pudrición de mazorcas (Figura 2). De la misma manera que en Reyes Mantecón, se observó la mayor pudrición en el testigo y la menor con el Phi.

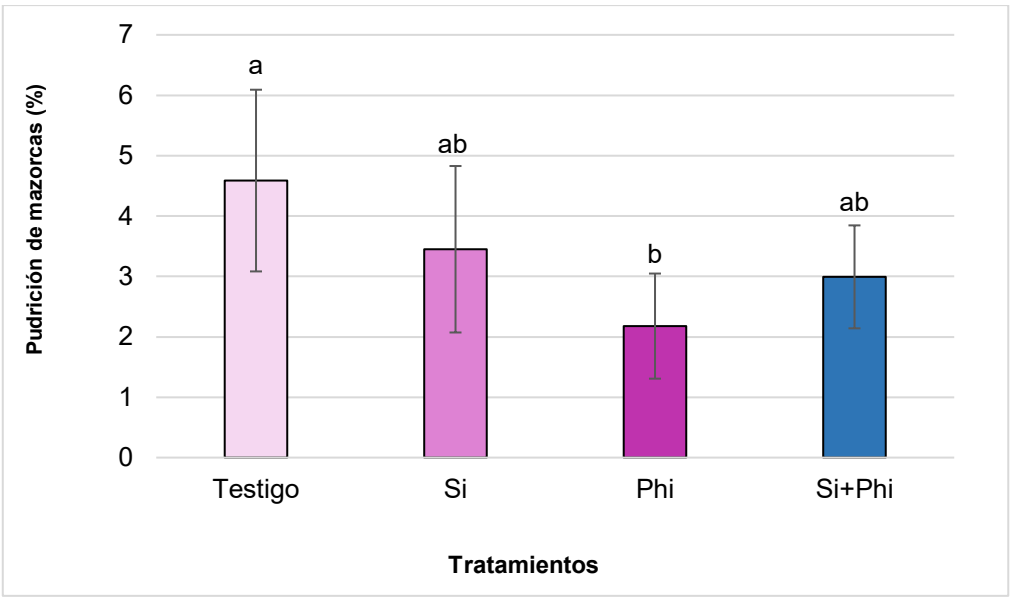


Figura 4. Porcentaje de pudrición de mazorcas de plantas de maíz (*Zea mays* L.) tratadas vía foliar con [silicio (Si) y fosfito (Phi)] establecidas en Santa Inés Yatzeche, Oaxaca, México. Medias ± DE con letras distintas en cada subfigura son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Fuente: De autoría propia.

Rendimiento

Los tratamientos mostraron respuestas diferentes entre los sitios experimentales. En la localidad de Reyes Mantecón, los rendimientos, en general, fueron menores que los registrados en Santa Inés Yatzeche. (**Figuras** 5 y 6).

En el sitio 1, Reyes Mantecón, el tratamiento testigo presento el menor rendimiento en los cinco híbridos. Asimismo, la combinación de Si + Phi, mostro incrementos en los rendimientos para los híbridos, Ares, Dekalb-390, SKW-302 y SKW-307. En contraste el híbrido H-391, el mayor rendimiento se obtuvo con la aplicación individual de Phi, seguido del tratamiento con Si (**Figura 5**).

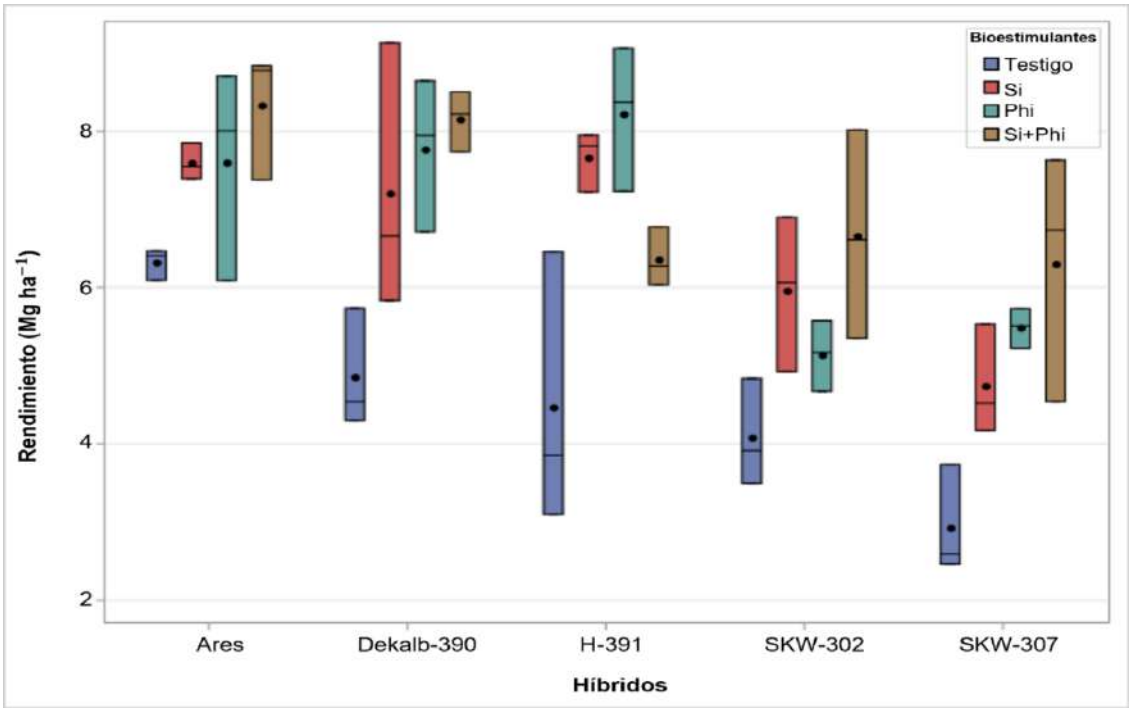


Figura 5. Diagrama de caja que presenta el rendimiento de cinco híbridos de maíz (*Zea mays* L.) tratados vía foliar con [silicio (Si) y fosfito (Phi)] establecidos en el Sitio 1 Reyes Mantecón, Oaxaca, México. La mediana es la línea horizontal y la media el círculo negro en cada cuadro. Análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis (Pr > ChiSq = 0.0006). Fuente: de autoría propia.

En el sitio de Santa Ines Yatzeche, los híbridos Ares, SKW-302 y SKW-307 presentaron los mayores rendimientos en plantas no tratadas; mientras que, en Dekalb-390, el mayor rendimiento promedio se tuvo con la aplicación foliar de Phi y en H-391 con la aplicación foliar de Si (Figura 6). Fuente: de propia autoría.

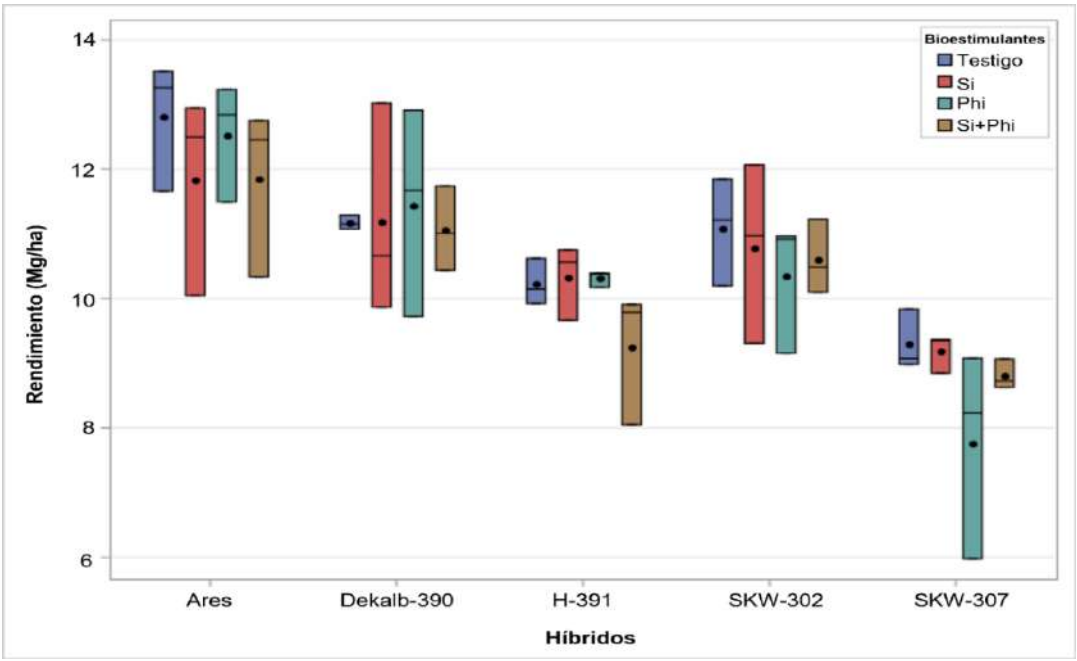


Figura 6. Diagrama de caja que presenta el rendimiento de cinco híbridos de maíz (Zea mays L.) tratados con [silicio (Si) y fosfito (Phi)] establecidos en el sitio 2 Santa Inés Yatzeche, Oaxaca, México. La mediana es la línea horizontal y la media el círculo negro en cada cuadro. Análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis (Pr > ChiSq = 0.0022). Fuente: de propia autoría.

Identificación de *Fusarium*

En ambos sitios se identificó la presencia de *Fusarium verticillioides* como principal agente causante de la pudrición de mazorca. Inicialmente, los cultivos tienen micelio blanco, pero pueden desarrollar pigmentos violetas con la edad (Figura 7). La pigmentación en el agar varía, desde ausencia de pigmentación o naranja grisáceo hasta gris violeta, violeta oscuro o magenta oscuro (casi negro) en otros casos (John & Brett, 2006). Este patógeno cuenta con micelio septado, las fialides son en forma de "Y", los microconidios son hialinos unicelulares o bicelulares en forma oval o bala, en general forman cabezuelas o cadenas (Warham et al, 1998).

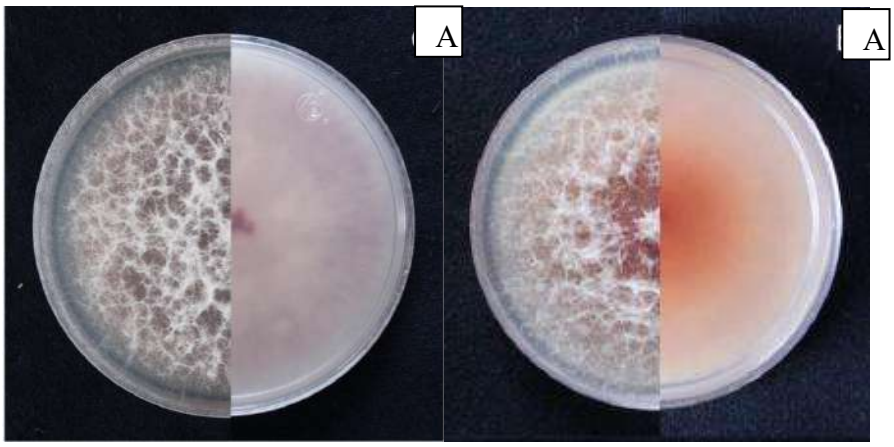


Figura 7. Características culturales del crecimiento de *Fusarium verticillioides* en placa de PDA durante 15 días: A, cepa de Reyes Mantecón, Oaxaca. B, cepa de Santa Inés Yatzeche, Oaxaca. Fuente: de propia autoría.

En cuanto a la pudrición de mazorca causada por *Fusarium verticillioides*, se observó una reducción significativa del porcentaje de infección en plantas tratadas con Phi, lo que destaca su potencial para un manejo biorracional del patógeno. Este efecto concuerda con las propiedades antifúngicas atribuidas al Phi, ya que puede restringir procesos de conidiogénesis e inhibir el crecimiento del micelio (Amiri & Bompeix, 2011; Trejo-Tellez & Gómez-Merino, 2018;), lo que podría contribuir a explicar la reducción de la incidencia del patógeno observada en este estudio. Con la aplicación de Si, se observó una disminución de la pudrición de la mazorca. Si bien este elemento benéfico no tiene acción directa sobre el patógeno, puede estimular la formación de barreras físicas mediante la deposición del elemento por debajo de la cutícula, dificultando la penetración de patógenos (Kang *et al*., 2023). Asimismo, induce respuestas de defensa mediante la producción de enzimas, fitoalexinas y proteínas relacionadas con la patogénesis (Gulzar *et al*., 2021; Verma *et al*., 2021).

La aplicación foliar de Si y Phi tuvo efectos positivos tanto en el rendimiento como en la sanidad de algunos de los híbridos de maíz evaluados. En Reyes Mantecón, la combinación de Si + Phi incrementó significativamente el rendimiento en la mayoría de los híbridos, mientras que en Santa Inés Yatzeche, el efecto fue variable según el híbrido y el tratamiento aplicado, por lo que se sugiere realizar estudios sobre la interacción y compatibilidad de Si y Phi.
En ambos sitios se confirmó la presencia de *F. verticillioides* como principal patógeno. En conjunto, los resultados respaldan el uso de Si y Phi como herramientas viables para la bioestimulación y el manejo integrado de enfermedades en el cultivo de maíz.

Conclusiones

La aplicación foliar de silicio (Si) y fosfito (Phi) redujo la pudrición de mazorca en híbridos de maíz, especialmente en el sitio de Reyes Mantecón. El fosfito destacó como agente de biocontrol frente a *Fusarium verticillioides*, por lo tanto, representan una alternativa viable para mejorar la sanidad del cultivo de maíz y garantizar buenos rendimientos.

Literatura citada

Libros

Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2018). Phosphite as an inductor of adaptive responses to stress and stimulator of better plant performance. In S. Vats (Ed.), *Biotic and abiotic stress tolerance in plants*. Amsterdam: Springer, pp. 203–238.

Warham, E. J., Butler, L. D. & Sutton, R. C. (1998*). Ensayos para la semilla de maíz y de trigo. Manual de laboratorio*. México: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

Revistas

Amiri, A., & Bompeix, G. (2011). Control of *Penicillium expansum* with potassium phosphite and heat treatment. *Crop Protection*. 30(2): 222–227. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.10.010

de la Torre-Hernández, M. E., Sánchez-Rangel, D., Galeana-Sánchez, E. & Plasencia-de la Parra, J. (2014). Fumonisinas: síntesis y función de la interacción *Fusarium verticillioide*s-maíz. *Revista de Especialidades en Ciencias Químicas y Biológicas*, 17 (1): 77–91.

Deepa, N., Achar P. N., & Sreenivasa M. Y. (2021) Current perspectives of biocontrol agents for management of *Fusarium verticillioides* and its fumonisin in cereals: A review. *Journal of Fungi*. 7(9): 776. https://doi.org/10.3390/jof7090776el

Gómez-Merino, F. C., & Trejo-Téllez, L. I. (2016). Conventional and novel uses of phosphite in horticulture: Potentialities and challenges. *Italus Hortus*. 23(2): 1–13.

Gulzar, N., Ali, S., Shah, M. A., & Kamili, A. N. (2021). Silicon supplementation improves early blight resistance in *Lycopersicon esculentum* Mill. by modulating the expression of defense-related genes and antioxidant enzymes. *3 Biotech*. 11: 232. https://doi.org/10.1007/s13205-021-02789-6

Liljeroth, E., Lankinen, Å., Wiik, L., Burra, D. D., Alexandersson, E., & Andreasson, E. (2016). Potassium phosphite combined with reduced doses of fungicides provides efficient protection against potato late blight in large-scale field trials. *Crop Protection*. 86: 42–55. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.04.003

McGovern, R. J. (2015). Management of tomato diseases caused by *Fusarium oxysporum*. *Crop Protection*. 73: 78–92. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.021

Massoud, K., Barchietto, T., Le Rudulier, T., Pallandre, L., Didierlaurent, L., Garmier, M., Ambard-Bretteville, F., Seng, J. M., & Saindrenan, P. (2012). Dissecting phosphite-induced priming in *Arabidopsis* infected with *Hyaloperonospora arabidopsidis*. *Plant Physiology*. 159(1): 286–298. https://doi.org/10.1104/pp.112.194647

Omotayo, O. P., & Babalola, O. O. (2023). *Fusarium verticillioides* of maize plant: Potentials of propitious phytomicrobiome as biocontrol agents. *Frontiers in Fungal Biology*. 4: 1095765. https://doi.org/10.3389/ffunb.2023.1095765

Oyarburo, N. S., Machinandiarena, M. F., Feldman, M. L., Daleo, G. R., Andreu, A. B., & Olivieri, F. P. (2015). Potassium phosphite increases tolerance to UV-B in potato. *Plant Physiology and Biochemistry*. 88: 1–8. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.01.003

Patel, P., Shah, R., Joshi, B., Ramar, K., & Natarajan, A. (2019). Molecular identification and biocontrol activity of sugarcane rhizosphere bacteria against red rot pathogen *Colletotrichum falcatum*. *Biotechnology Reports*. 21: e00317. https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00317

Verma, K. K., Song, X., Tian, D., Guo, D., Chen, Z., Zhong, C., Nikpay, A., Singh, M., Rajput, V. D., Singh, R. K., Minkina, T., & Li, Y. (2021). Influence of silicon on biocontrol strategies to manage biotic stress for crop protection, performance, and improvement. *Plants*. 10(10): 2163. https://doi.org/10.3390/plants10102163

Xu, Y., Zhang, Z., Lu, P., Li, R., Ma, P., Wu, J., Li, T., & Zhang, H. (2023). Increasing *Fusarium verticillioides* resistance in maize by genomics-assisted breeding: Methods, progress, and prospects. *The Crop Journal,* 11(6): 1626–1641. https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.07.004

Referencias electrónicas

Orús, A. (2024). "Ranking de los principales productores de maíz a nivel mundial en 2023/2024". Statista [en línea]. Hamburgo, Alemania. Disponible en: https://es.statista.com/estadisticas/613419/prinicpales-productores-de-maiz-en-el-mundo/ [consulta: 6 de agosto de 2026].

SIAP, (2025), "Anuario Estadístico de la Producción Agrícola", Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, [en línea], Ciudad de México, México, disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/ [consulta: 6 de agosto de 2026].

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Diseño de sistema automatizado con panel TouchPad TFT de 3.5" y microsistema operativo basado en arquitectura ATmega2560 para control IoT de una mini-Plant Factory

Luis Tonatiuh Castellanos Serrano[1], José Alfredo Castellanos Suárez[1], María Victoria Gómez Águila[1], Fernando Salinas Paniagua[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Los PFAL son tecnologías que conjugan verticalidad, sistemas para la optimización del riego, uso de luminarias Led's especializadas para los cultivos, y tecnificación de las herramientas de la agricultura 5.0, los cuales representan una alternativa para incrementar la eficiencia en el uso de recursos y responder a los desafíos actuales de la seguridad alimentaria en todo el mundo.
En este contexto, el presente trabajo describe el diseño, implementación y evaluación funcional de un sistema de control automatizado para una mini-Plant Factory (mini-PFAL), basado en una arquitectura de sistema embebido con microcontrolador ATmega2560 y una interfaz gráfica TouchPad TFT de 3.5". El sistema integra módulos para el monitoreo en tiempo real de temperatura, humedad relativa y luminosidad, así como el control automático de iluminación artificial, riego aeropónico, ventilación y calefacción. La plataforma incorpora comunicación inalámbrica mediante Bluetooth y WiFi, además de una arquitectura modular que permite la interconexión de hasta cuatro módulos verticales de cultivo mediante una estrategia de multiplexación de sensores. El firmware fue desarrollado en lenguaje C++, implementando algoritmos para la adquisición de datos, procesamiento de información, control de actuadores, almacenamiento de registros históricos y configuración de parámetros operativos a través de una GUI (Interfaz Gráfica de Usuario).
Los resultados obtenidos demuestran el funcionamiento integrado del sistema, evidenciando una plataforma flexible, escalable y de bajo costo, la cual fue sometió a examen ante el IMPI y obtuvo el título de modelo de utilidad No. 6271, lo cual permite evidenciar que el prototipo integra soluciones propias de hardware, firmware e interfaz gráfica orientadas a fortalecer la soberanía tecnológica en sistemas de agricultura de ambiente controlado en el contexto de la agricultura 5.0, Internet de las Cosas y sistemas automatizados de producción vegetal en materia de PFAL.

Palabras Clave: Plant Factory; Sistema-embebido; ATmega2560; Agricultura 5.0; Automatización; IoT.

Abstract

PFALs (Plant Factories with Artificial Lighting) are technologies that combine vertical farming, irrigation optimization systems, specialized LED crop lighting, and Agriculture 5.0 tools; they represent an alternative for increasing resource-use efficiency and addressing global food security challenges.

[1]Universidad Autónoma Chapingo. DIMA o DESOR. CIISCINASyC. Texcoco, km 38.5. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. México. lcastellanoss@chapingo.mx
[2]Maestría de IAUIA. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. México. fer.rock.66678@gmail.com

In this context, this paper describes the design, implementation, and functional evaluation of an automated control system for a mini-Plant Factory (mini-PFAL). The system is based on an embedded architecture featuring an ATmega2560 microcontroller and a 3.5" TFT touchscreen interface. It integrates modules for real-time monitoring of temperature, relative humidity, and light levels, alongside automatic control of artificial lighting, aeroponic irrigation, ventilation, and heating. The platform incorporates Bluetooth and WiFi wireless communication and a modular architecture that allows for the interconnection of up to four vertical growing modules using a sensor multiplexing strategy. The firmware was developed in C++, implementing algorithms for data acquisition, information processing, actuator control, historical data logging, and the configuration of operating parameters via a Graphical User Interface (GUI).

The results demonstrate the system's integrated operation, showcasing a flexible, scalable, and low-cost platform. The system underwent examination by the IMPI (Mexican Institute of Industrial Property) and was granted utility model title No. 6271; this confirms that the prototype integrates proprietary hardware, firmware, and graphical interface solutions aimed at strengthening technological sovereignty in controlled-environment agriculture systems within the context of Agriculture 5.0, the Internet of Things (IoT), and automated plant production systems based on PFAL technology.

Keywords: Plant Factory; Embedded-system; ATmega2560; Agriculture 5.0; Automation; IoT.

Introducción

El mundo actual afronta retos en materia agroalimentaria, el exponencial aumento poblacional supera actualmente los límites de la demanda de alimentos, el crecimiento de la mancha urbana y la absorción de los espacios destinados para el cultivo de alimentos, aunado con la disminución de recursos naturales y problemas hídricos, son desafíos ingenieriles que proyectan retos y estrategias para superar las condiciones actuales de la humanidad. En este escenario, las tecnologías de las PFAL (Plant Factory with Artificial Lighting) en sus diferentes formatos (micro, normal, mini, macro) representan una vía tecnológica que ofrece el formato necesario para superar los retos actuales, dado que son dispositivos de producción intensiva en ambientes controlados, donde las variables de temperatura, humedad relativa, iluminación, ventilación y riego pueden sistematizarse de forma precisa con tecnologías electrónicas y de programación (Kozai, Niu, & Takagaki, 2020; Kozai, 2022).

Los PFAL son infraestructura que constituye uno de los pilares de la Agricultura 4.0 y Agricultura 5.0, al integrar automatización, sensores, sistemas embebidos, Internet de las Cosas (IoT), algoritmos inteligentes, etcétera, para mejorar la productividad, la trazabilidad y la calidad de los cultivos (Javaid et al., 2023; Rose & Chilvers, 2018), actualmente su desarrollo se ha potencializado con las tecnologías 5.0 como son la IA, blockchain, data warehouse, big data, computo de la nube, entre otras.

Los PFAL ofrecen una amplia competitividad y ventaja con otros sistemas tradicionales de la agricultura, pero algunas de sus limitaciones para su adopción en los diferentes tipos de organizaciones públicas y privadas de investigación, educación y producción (gran y baja escala), radica en los elevados costos infraestructurales, el gran consumo de energía eléctrica, limita la flexibilidad para adaptar sus parámetros de operación a diferentes condiciones de cultivo, dado que muchos PFAL se desarrollan para ciertas variedades de cultivos y no son tecnologías genéricas, otras plataformas ya comerciales utilizan arquitecturas propias que restringen la incorporación de nuevos sensores, actuadores, sistemas de control, o actualización

en su firmware, dificultando su escalabilidad y personalización (Benke & Tomkins, 2017; Shamshiri et al., 2018).

Bajo este panorama surge la necesidad de impulsar proyectos que busquen la soberanía tecnológica, muchas tecnologías líderes en Plant Factory pertenecen a países bajos, Canadá, China, Japón, EEUU, etc., países primermundistas que ya implementan estas tecnologías como ejes estratégicos en sus agendas de trabajo, ya que al importar las tecnologías no solo aumenta costos aduaneros o de traslado, sino delimita la tecnología a las marcas específicas, el refaccionamiento, los mantenimientos preventivos y predictivos, y la contratación de técnicos extranjeros especializados en las marcas específicas.
La integración de microcontroladores, sensores digitales, protocolos de comunicación y pantallas táctiles constituye una alternativa viable para implementar sistemas embebidos capaces de ejecutar tareas de monitoreo y control en tiempo real (Lee et al., 2021; Monk, 2023), además de ser tecnologías propias del país que pueden pasar por los trámites pertinentes ante el IMPI e INDAUTOR para sus protección intelectual y explotación comercial.
La hipótesis que guía este trabajo establece que el diseño e implementación de un sistema embebido de control automatizado basado en un microcontrolador ATmega 2560 y una interfaz TouchPad TFT de 3.5” permite administrar de forma eficiente las principales variables ambientales de una mini-Plant Factory, proporcionando una plataforma flexible, escalable y de fácil interacción para el usuario, sin incrementar significativamente la complejidad electrónica ni el costo de implementación.
En base a esta hipótesis, el objetivo general del presente trabajo consiste en diseñar e implementar un sistema de control automatizado con panel TFT de 3.5” para una mini-Plant Factory, capaz de integrar el monitoreo de variables internas de trabajo (°C, %HR y Lux), automatización de actuadores de luz artificial, riego y ventilación, interfaz gráfica de usuario (GUI) para la configuración y supervisión de los procesos de cultivo en tiempo real (preferentemente variedades de lechuga), y finalmente conectividad IoT con el SmartPhone a través de bluetooth y comunicación WIFI por medio de protocolos HTTP.
De manera específica, el desarrollo comprende: 1) el diseño de la arquitectura electrónica del sistema de control; 2) la implementación del hardware basado en un microcontrolador ATmega 2560 y módulos periféricos para adquisición de datos y control de actuadores; 3) el desarrollo del firmware encargado de la adquisición de información, procesamiento y ejecución de estrategias automáticas de control; y 4) el diseño de una interfaz TouchPad que facilite la visualización de variables, la configuración de parámetros operativos y la interacción entre el usuario y el sistema.
Finalmente, el presente capitulo presenta la arquitectura general y la ruta metodológica de diseño que se siguió para la electrónica de los módulos de alimentación, sensores y actuadores, el desarrollo del software embebido y de la interfaz gráfica de usuario, así como la evaluación funcional del prototipo desarrollado para una mini-Plant Factory destinada a procesos de investigación, innovación tecnológica y agricultura protegida, obteniendo así ante el IMPI el registro No. MX/u/2023/000518 de modelo de utilidad presentada el 8 de diciembre de 2023 y que en junio del 2026 fue dictamina como estatus de otorgado ante el organismo público federal, registrado con el TÍTULO DE MODELO DE UTILIDAD No. 6271 (Castellanos Serrano et al., 2026).

Materiales y métodos

1. Esquema general

A continuación, en el diagrama 1 se muestra la arquitectura general del mini-PFAL:

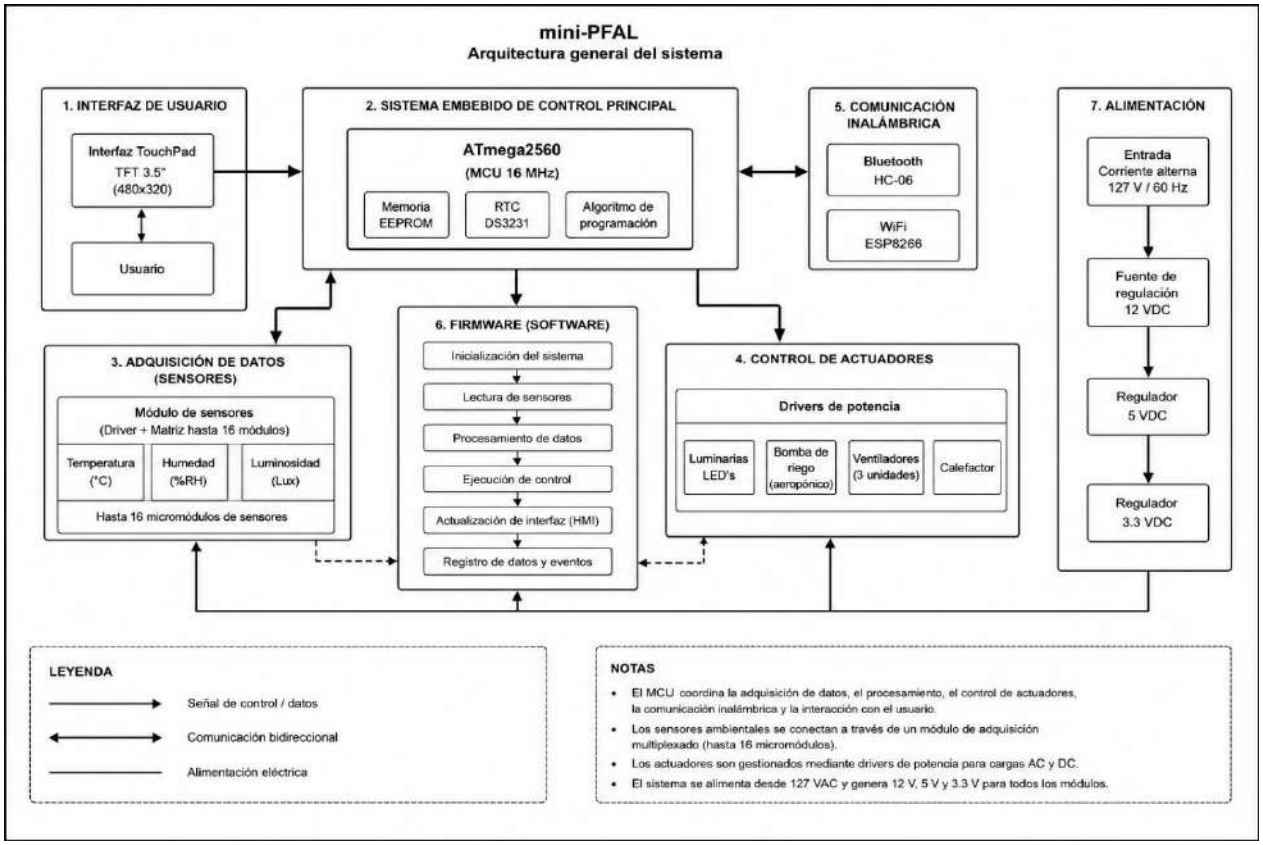


Diagrama 1. Diagrama de flujo de funcionamiento general del sistema mini-PFAL (Autoría Propia)

Desde el punto de vista eléctrico y electrónico, el sistema se organiza en cinco subsistemas funcionales: circuito de alimentación; circuito principal de control —integrado por el dispositivo físico y el sistema embebido—; actuadores; sensores; y comunicación inalámbrica

El diagrama 2, muestra un esquema general de las 4 secciones principales que conforman las conexiones electrónicas de los periféricos para las señales de control y alimentación:

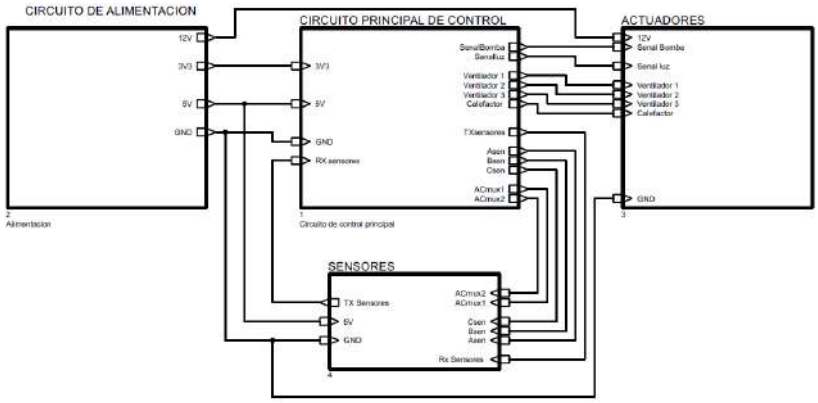


Diagrama 2. Esquema general de la conexión electrónica (Castellanos Serrano et al., 2026).

2. Circuito principal de control

2.1. Dispositivo físico de control

A continuación, la figura 1 muestra una vista isométrica del gabinete del control principal, el cual consta de una caja en forma de poliedro irregular que resguarda la interfaz TouchPad de Usuario, fuente de alimentación y placas electrónicas de funcionamiento:

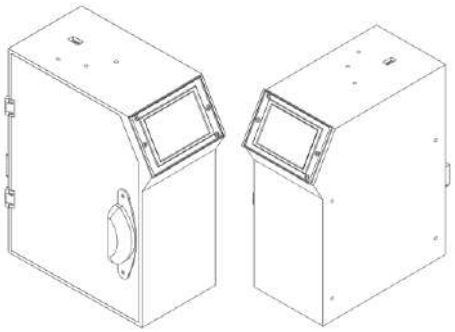


Figura 1. Vista del control principal isométrica izquierda y derecha (Castellanos Serrano et al., 2026).

Para su funcionamiento operativo entre usuario y sistema, se implementó una pantalla Matrix activa TFT LCD Touch Screen Capacitivo de 320 x RGB x 480; con 65K/262K Color; Interfas: 8080 8/9/16/18 bit MCU, 16/18 bit RGB, 3/4 líneas SPI; Tipo de conexión: FPC Socket (Ada, 2025), la cual es la interfaz de entrada que despliega los diferentes menús que permiten interactuar con el microsistema operativo del PFAL con tan solo pulsar la pantalla.
El sistema de control principal está constituido por doce componentes mecánicos, electrónicos y de alimentación que conforman la arquitectura física del mini-PFAL (Figura 2). Estos incluyen la estructura del gabinete, los módulos electrónicos de control, la interfaz TouchPad TFT, el sistema de alimentación y los elementos de protección y fijación requeridos para su integración y operación.

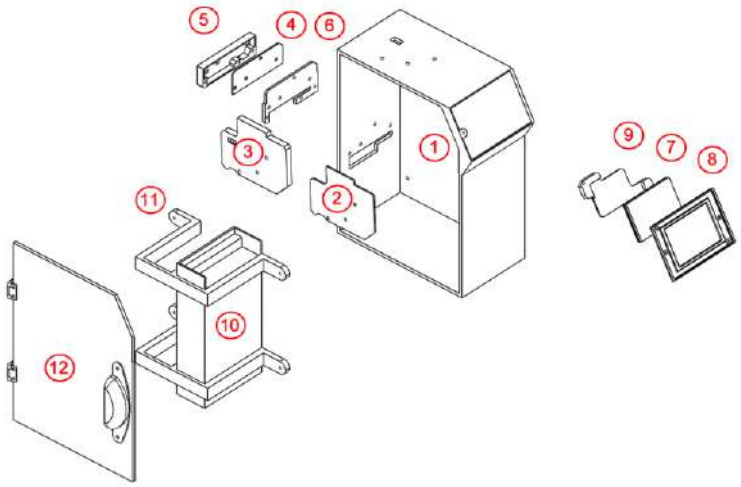


Figura 2. Vista explosionada del sistema de control principal: (1) Carcasa principal; (2) Tarjeta electrónica principal; (3) Tarjeta electrónica secundaria; (4) Tarjeta de conectores externos; (5) Tapa de protección; (6) Contratapa de fijación; (7) Pantalla TouchPad TFT de 3.5"; (8) Tapa de protección de pantalla; (9) Contratapa y organizador de cables; (10) Fuente conmutada LAVOIGNET HC-360W-12V; (11) Soportes de fijación; (12) Compuerta abatible. (Autoría Propia)

2.2. Sistema embebido de control principal

El siguiente diagrama muestra la sección de sistema embebido de control:

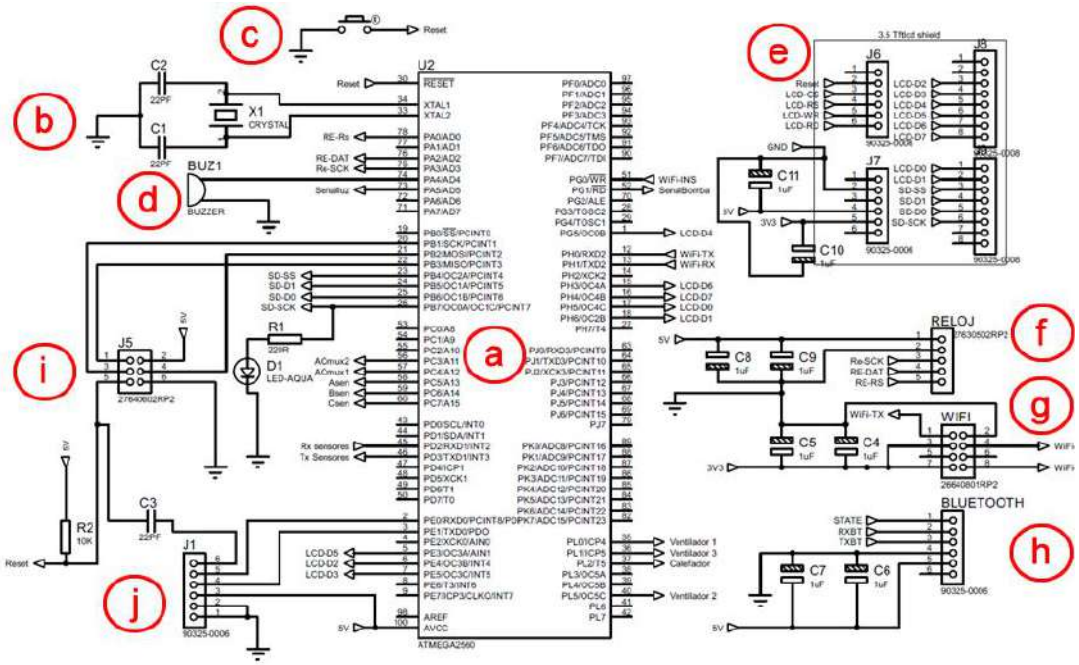


Diagrama 3. Secciones específicas del diagrama principal (Castellanos Serrano et al., 2026).

El diagrama 3 identifica los principales bloques funcionales de la tarjeta electrónica: (a) microcontrolador ATmega2560; (b) oscilador externo de 16 MHz; (c) circuito de reinicio; (d) buzzer; (e) interfaz TouchPad TFT de 3.5"; (f) reloj de tiempo real DS3231; (g) módulo WiFi ESP8266; (h) módulo Bluetooth HC-06; e (i–j) conectores para programación y actualización del firmware. El circuito final fue manufacturado en una tarjeta electrónica que en sus partes converge toda la electrónica empleada para la gestión operativa de la máquina en tiempo real.

3. Actuadores

Del sistema embebido de control principal se conecta con 5 salidas con el driver de control de actuadores, en el diagrama 4 se puede apreciar, el módulo de actuadores está constituido por seis salidas de control gobernadas por el microcontrolador ATmega2560 (Digrama 4). La iluminación es conmutada mediante el relevador RL2, el cual controla la alimentación de corriente alterna hacia las luminarias LED, mientras que el relevador RL1 suministra una tensión de 12 VDC a la bomba del sistema de riego aeropónico. El control térmico se realiza mediante tres ventiladores destinados a la admisión, extracción y recirculación de aire dentro de la cámara de crecimiento, accionados mediante transistores bipolares TIP41 (NPN) gobernados por señales PWM generadas por el microcontrolador, lo que permite regular su velocidad de operación. Adicionalmente, el sistema incorpora un calefactor de 12 VDC para incrementar la temperatura del aire cuando las condiciones ambientales así lo requieren, garantizando el mantenimiento de los parámetros térmicos establecidos para el cultivo.

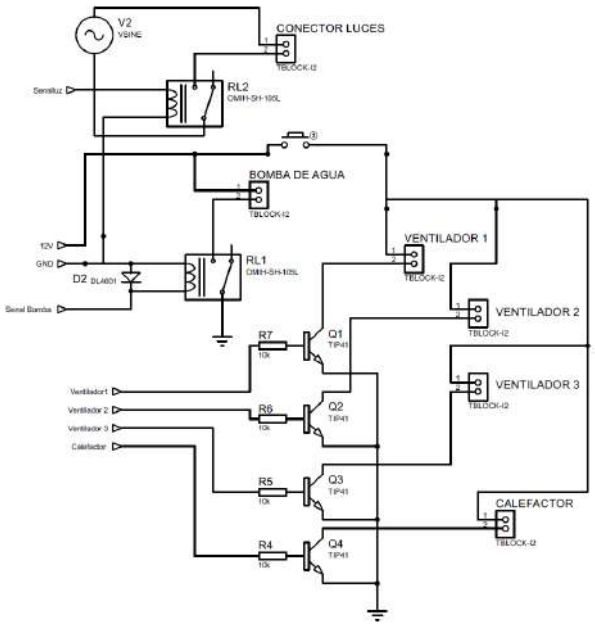


Diagrama 4. Driver para control de actuadores (Castellanos Serrano et al., 2026).

4. Sensores

El módulo de sensado rescata la lectura de 3 variables: Temperatura (°C); Humedad (%RH); Luminosidad (LUX). Esto se logra a través de la técnica de multiplexación, para ello cada módulo sensor cuenta con un MCU basado en el integrado ATmega328P y su sistema mínimo de arranque (Microchip, 2026) al cual se le ha asignado una dirección única (ver diagrama 7), cuenta con un sensor BH1750 para realizar la lectura de luminosidad, al igual que un sensor

SHT21 para realizar la lectura de temperatura y humedad, ambos módulo son sensores digitales que se comunicación por protocolo I^2C, de este modo cada sensor tiene su propia dirección por el fabricante pero el MCU es el que realiza la petición para solicitar la lectura de las 3 variables como sean requeridas por el sistema principal.

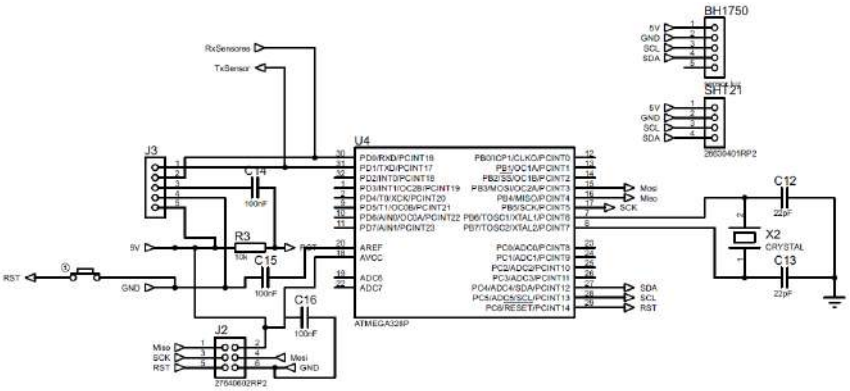


Diagrama 5. Módulo sensor para lectura de Temperatura (°C); Humedad (%RH); Luminosidad (LUX). (Castellanos Serrano et al., 2026).

Del diagrama 3 los pines 45 (RxSenores) y 46 (TxSensor) se conectan a los multiplexores SN74LS151N (ver diagrama 6), se implementaron dos multiplexores SN74LS151N lo cual permite la gestión de 16 módulos totales, por lo cual, cada mini-PFAL soporta 4 sensores, dos módulos en su formato de verticalidad requerirían 8 sensores, finalmente la capacidad máxima de verticalidad son 4 mini-PFAL's, por ello se deja esta capacidad de sobra, cada control principal está diseñado para gestionar hasta 4 módulos, aunque lo recomendable en la práctica son 3.

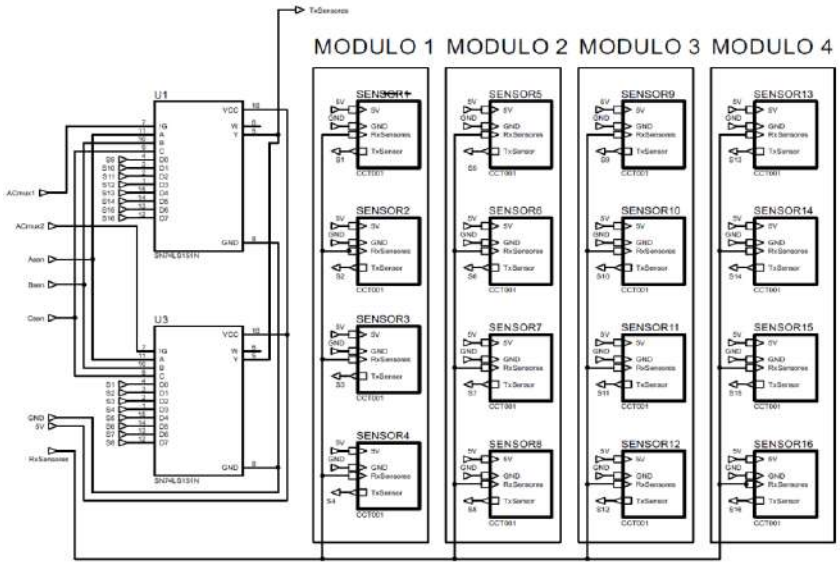
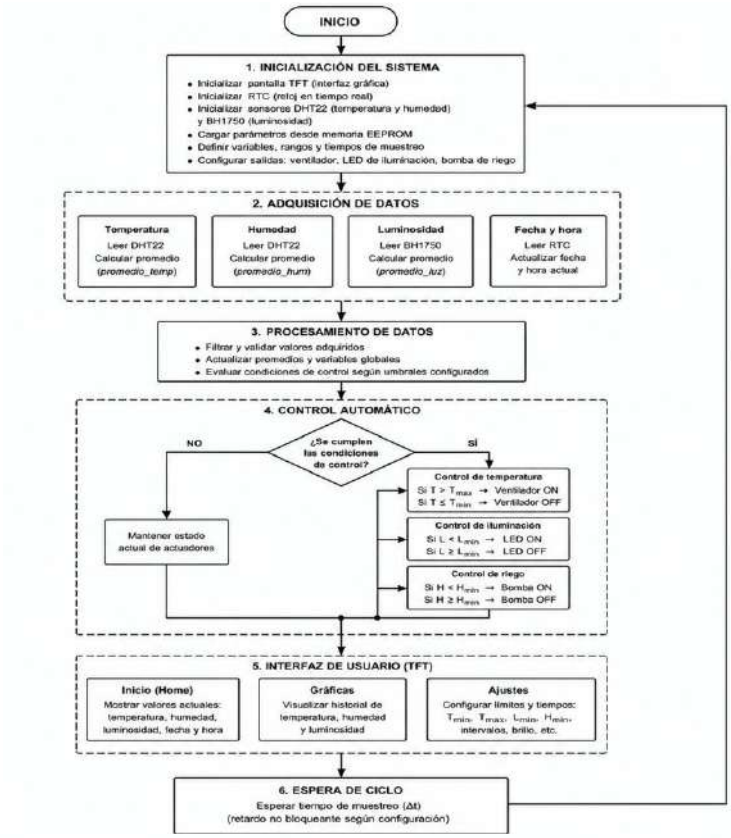


Diagrama 6. Multiplexación de datos para la obtención de variables de matriz de sensores (Castellanos Serrano et al., 2026).

5. Programación

En el diagrama 7 se sintetiza el algoritmo de programación usado que cuenta con casi 2600 líneas de código, el cual fue escrito en lenguaje C++:



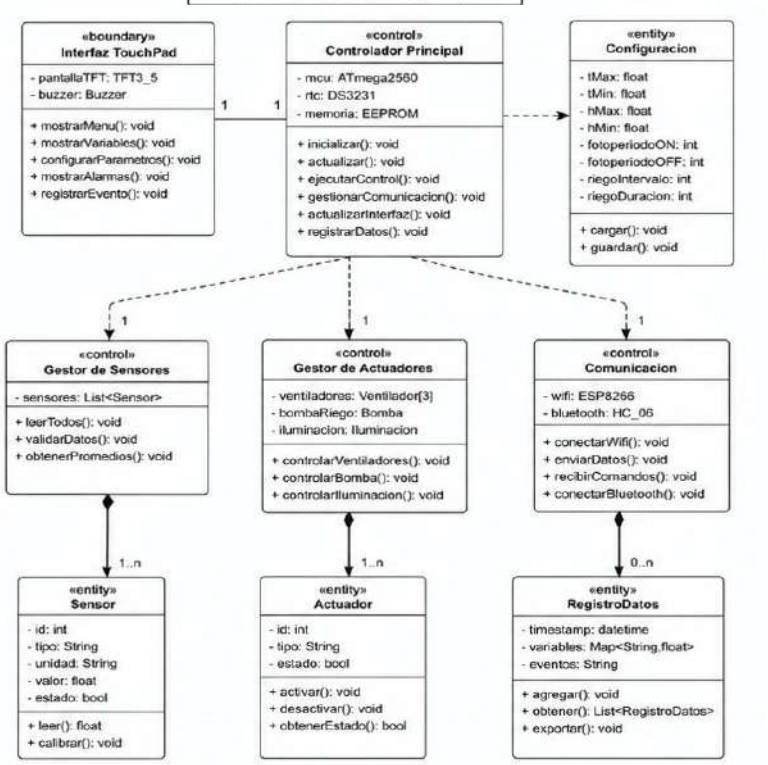


Diagrama 7. Diagrama de flujo y diagrama UML de la programación del microsistema operativo del mini-PFAL (Autoría Propia).

Resultados y discusión

1. Resultados de sistema de control principal

El tablero de control cuenta con un microsistema operativo que opera de forma automática el PFAL, la interfaz TouchPad cuenta con 3 menús importantes para configuraciones: Sensores; Gráficas; Ajustes, la primera versión del prototipo se puede observar en la siguiente en la colección de imágenes de la figura 3:

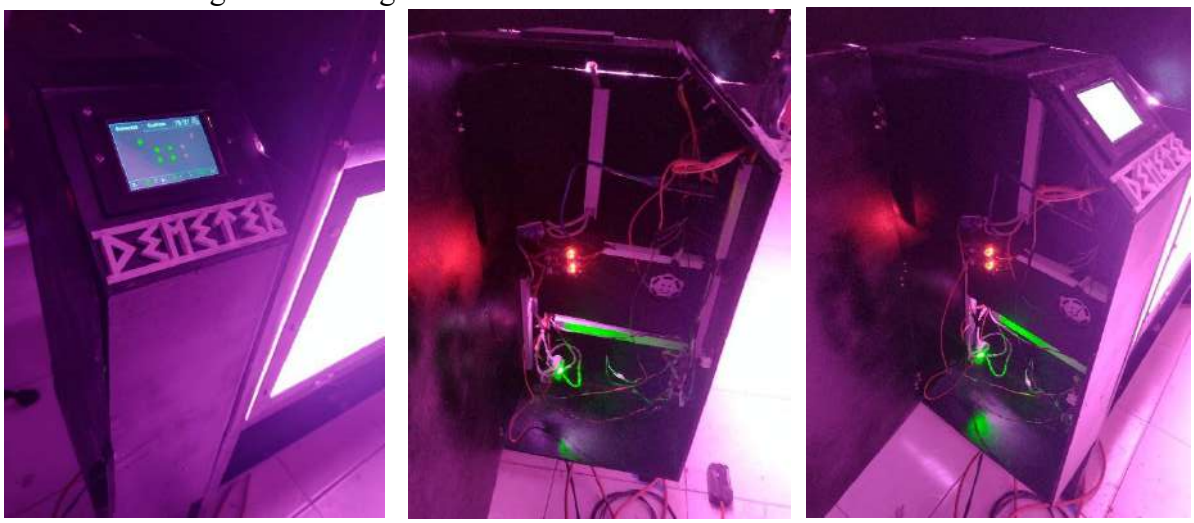


Figura 3. Tablero de control sistema interno en múltiples vistas, primera versión (Autoría Propia)

Desarrollando trabajos de mejora del primer prototipo, a parte de los procesos de verificación y comprobando de funcionamiento en tiempo real, se pudo plasmar la propuesta planteada en la figura 1, en la siguiente figura se puede apreciar la evidencia de la construcción del prototipo:



Figura 4. Versión final del control principal trabajando en tiempo real (Autoría Propia)

2. Resultados del microsistema operativo

2.1. Menú Principal

Procediendo a encender el mini-PFAL, el programa carga el menú principal en la pantalla TFT TouchPad de 3.5", como se puede observar en la figura 5:

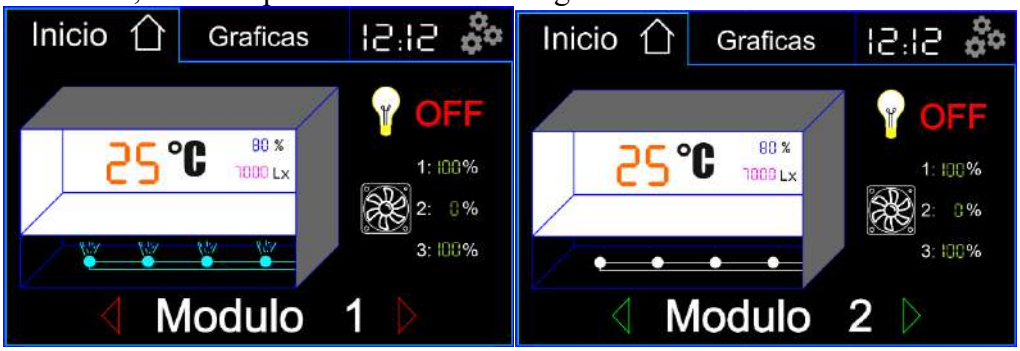


Figura 5. Menú principal del módulo 1 y módulo 2 (Autoría Propia)

En la parte inferior del menú principal se encuentran un par de flechas que permiten desplazar el menú a cada módulo vertical interconectado, el microsistema puede soportar hasta 4 módulos El menú principal de igual forma monitorea las variables de: Temperatura (°); Porcentaje de humedad (%RH); Luminosidad (Lux).

También monitorea el estatus de: Hora (Hora:Minutos); Estado de las luminarias (ON-OFF); Estado de los ventiladores (%) —Ventiladores de ingreso y extracción de aire, Ventilador de recirculación de aire interno de las cámaras de siembra, Ventilador para ingresar aire caliente generado por las luminarias Led's—

La opción de 

dibuja en la pantalla los trazos correspondientes de temperatura (°C), porcentaje de humedad (% RH) y luminosidad (Lux) (ver Figura 6), la información del historial se queda almacenada en una memoria SD para poder consultar la información anuquen aunque ocurra o se tenga que desenergizar el equipo; incluso para poder extraerla para descargar la información en una computadora y poder procesar los datos.



Figura 6. Opción para desplegar gráficas de variables de "°C" (color rojo), "% Hum" (color azul) y "Lux" (color amarillo) (Autoría Propia)

El despliegue gráfico también muestra información de cada uno de los sensores y el promedio de cada módulo en un lapso 34 horas anteriores, los datos que se muestran en la izquierda corresponde a los datos actuales.

La imagen compuesta por tres engranes  hace referencia a las opciones de configuración (ver Figura 7), al darle clic despliega otro menú con las opciones de: Riego; Iluminación; Hora; Inicio; Opciones Avanzadas.



Figura 7. Menú principal de configuraciones (Autoría Propia)

2.2. Configuración - Opción de Riego, iluminación y hora

El submenú de "Riego" este compuesto por 2 parámetros para ajustar: Intervalos de riego; Duración del riego (ver Figura 8, primera imagen).

Una vez que se ajustan, es necesario darle click en la opción de 

para que los parámetros queden configurados en la máquina.

El submenú de "Iluminación" permite calibrar las horas luz de las luminarias Led's, esto se calibra con la hora de zona horaria, configurando la hora en la que las luminarias de van a encender y la hora que se van a pagar, esto en el formato de 24 horas (ver Figura 8, segunda imagen).

El submenú de "Hora" realiza el ajuste al módulo reloj que cuenta con una batería CR 2032 de respaldo, garantizando de esta forma nunca perder la hora programada por si la máquina se quedará sin electricidad, para ello el ajuste se realiza como se muestra en la figura 8 (tercera imagen):



Figura 8. Pantallas para ajuste de tiempo de riego; hora de encendido y apagado; Ajuste de reloj (Autoría Propia)

2.3. Configuración - Opción de Inicio

Cuando se da click en la opción de "Inicio", se vuelve al menú principal, no antes de que la interfaz pregunte ¿si se desea realizar el test de sensores?, a lo cual se procede hacer el testing para acusar el estado de comunicación con los sensores:



Figura 9. Testeo para identificación de funcionamiento de los sensores (Autoría Propia)

2.4. Configuración – Menú principal de Opciones Avanzadas

En la Figura 7 se muestra la opción de 

, la cual al darle click lleva al usuario a un submenú como se muestra en la Figura 10 compuesto por las opciones de: Temp; Test; % Riego.

La opción de 

permite configurar la temperatura de la cámara de crecimiento de cultivos, esto gracias a que permite activar los ventiladores con un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) que mantiene la temperatura en el punto óptimo (Setpoint) configurado por el usuario (ver Figura 10, primera imagen)

La opción de 

, lleva al usuario un submenú compuesto por diferentes botones que permiten revisar el funcionamiento de: Ventiladores; Bomba de agua; Luminarias Al dar click en los botones de ON y OFF se pueden encender y apagar los sistemas para evaluar de forma rápida su funcionamiento (ver Figura 10, segunda imagen).

Finalmente, la opción de 

permite configurar la potencia de riego con la que es inyectada la solución nutritiva al circuito de riego aeropónico (ver Figura 10, tercera imagen).



Figura 10. Menú de configuraciones avanzadas (Autoría Propia)

Conclusiones

El diseño, implementación y evaluación funcional del sistema de control automatizado permiten respaldar la hipótesis planteada, al demostrar la factibilidad de integrar en una plataforma embebida basada en el microcontrolador ATmega2560 y una interfaz TouchPad TFT de 3.5" las funciones requeridas para la gestión de una mini-Plant Factory. El sistema permitió monitorear las principales variables ambientales —temperatura, humedad relativa y luminosidad— y coordinar automáticamente los procesos de iluminación, riego aeropónico, ventilación y regulación térmica, manteniendo una interacción directa e intuitiva con el usuario. La solución desarrollada evidencia además su factibilidad tecnológica, al integrar en una arquitectura funcional hardware, firmware, sensores, actuadores e interfaces de comunicación disponibles comercialmente, sin requerir una infraestructura electrónica de elevada complejidad. La estrategia de multiplexación para la adquisición de datos y la incorporación de conectividad Bluetooth y WiFi permiten ampliar las capacidades del sistema y administrar hasta cuatro módulos verticales de cultivo, respaldando el carácter flexible y escalable establecido en la hipótesis.

Una característica relevante de la arquitectura propuesta es su versatilidad, ya que su diseño modular permite realizar adecuaciones en el hardware y firmware, incorporar nuevos sensores y actuadores, modificar parámetros y estrategias de control, así como desarrollar nuevas interfaces y mecanismos de comunicación de acuerdo con los requerimientos de diferentes cultivos o condiciones experimentales. En este sentido, el sistema no constituye una plataforma cerrada, sino una base tecnológica susceptible de actualización, expansión y desarrollo posterior para aplicaciones de investigación, enseñanza y producción agrícola en ambientes controlados.

Desde el punto de vista tecnológico, el desarrollo constituye una propuesta nacional orientada a reducir la dependencia de plataformas comerciales cerradas y fortalecer las capacidades propias en agricultura protegida. Asimismo, la obtención del Modelo de Utilidad ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial respalda el carácter innovador de la solución desarrollada.

Finalmente, la flexibilidad de la arquitectura permite proyectar desarrollos posteriores mediante la incorporación de algoritmos de inteligencia artificial, control predictivo, protocolos IoT estandarizados, monitoreo remoto y servicios en la nube. Estas capacidades ofrecen una ruta de evolución del mini-PFAL hacia una plataforma experimental de Agricultura 5.0, manteniendo como principio de diseño su capacidad de adaptación a futuras necesidades tecnológicas y productivas.

Literatura citada.

Ada, C. by L. (n.d.). Adafruit 3.5" 320x480 Color TFT Touchscreen Breakout. Adafruit.com. Retrieved July 19, 2026, from https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-3-5-color-320x480-tft-touchscreen-breakout.pdf

Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. Sustainability: Science, Practice and Policy, 13(1), 13–26. https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054

Castellanos Serrano, L. T., Salinas Paniagua, F., Gómez Águila, M. V., & Castellanos Suárez, J. A. (2026). Fábrica de plantas con iluminación artificial (Modelo de utilidad No. 6271). Universidad Autónoma Chapingo. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI).

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Khan, I. H., & Suman, R. (2023). Understanding the adoption of Agriculture 5.0 technologies for sustainable farming: A review. Smart Agricultural Technology, 5, 100323. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100323

Kozai, T. (2022). Resource use efficiency of closed plant production systems with artificial lighting. Academic Press.

Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). (2020). Plant Factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production (2nd ed.). Academic Press.

Lee, I., Jeong, Y., Kim, D., & Lee, S. (2021). Embedded control systems for smart agriculture based on Internet of Things technologies: A review. Electronics, 10(17), 2117. https://doi.org/10.3390/electronics10172117

Microchip (2026). 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash. Microchip.com. Retrieved August 9, 2026, from https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf

Microchip.com. Retrieved July 19, 2026, from https://www.microchip.com/en-us/product/atmega2560

Monk, S. (2023). Programming Arduino: Getting Started with Sketches (3rd ed.). McGraw-Hill Education.

Rose, D. C., & Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2, 87. https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00087

Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(1), 1–22. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Impacto del uso del celular en las actividades académicas y las calificaciones de los estudiantes en Matemáticas I.

Oscar Palmeros Rojas[1], Noé Ramírez Negrete[1], Blanca Isabel Sánchez Toledano[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnología para la Agricultura Sostenible

Resumen

El uso adecuado de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC'S) fomenta el aprendizaje activo, acrecienta la retención de conceptos, posibilita la retroalimentación personalizada e instantánea, favoreciendo el aprendizaje. Desafortunadamente, también han generado problemas como distracciones en clase, brecha digital y dependencia tecnológica. Para conocer el impacto del uso del celular en el curso de Matemáticas I, impartido a estudiantes de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, se analizó el tiempo de uso diario del dispositivo para realizar actividades académicas, ver videos, revisar redes sociales y jugar, y se buscó una relación entre el tiempo total de uso y el logro académico. Se encontró que el 97% de los estudiantes usan el celular durante más de dos horas al día. A lo académico le dedican 2.15 h/día. El 17% de los alumnos que utilizaron el celular de forma excesiva reprobó el curso de Matemáticas I; este porcentaje bajó al 13% entre quienes lo emplearon de forma normal. Los hombres dedican más del doble de tiempo a los videojuegos que las mujeres. Los estudiantes que viven solos dedican menos tiempo a lo académico y más tiempo a ver videos y a revisar redes sociales. Esto hace que el uso promedio se incremente hasta 6.13 horas diarias. Ante la magnitud de los problemas que está generando el uso excesivo del celular entre los alumnos, es imperativo actuar de forma corresponsable (autoridades educativas, docentes, padres de familia y alumnos) para transitar hacia una cultura de uso responsable de la tecnología.

Palabras clave: Clasificación, Multitasking digital, Nomofobia, Ritmo circadiano.

Abstract

The proper use of Information and Communication Technologies (ICTs) fosters active learning, enhances the retention of abstract concepts, and enables personalized, instant feedback, thereby supporting the learning process. Unfortunately, these technologies have also created problems such as classroom distractions, the digital divide, and technological dependency. To understand the impact of mobile phone usage on the Mathematics I course taught at the Preparatoria Agrícola of the Universidad Autónoma Chapingo, the study analyzed the daily time spent on the device for academic activities, watching videos, checking social media, and gaming, and the relationship between total usage time and academic performance was examined. It was found that 97% of students use their mobile phones for more than two hours a day, dedicating 2.15 hours daily to academic tasks. Among students who used their phones excessively, 17% failed the Mathematics I course, whereas this figure dropped to 13% for those with normal usage patterns.

[1,]Universidad Autónoma Chapingo. Área de Matemáticas. nramirezn@chapingo.mx. opalmerosr@chapingo.mx.
[3] Zacatecas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. toledano.blancaisabel@gmail.com

Male students spent more than twice as much time gaming compared to female students. Students living alone dedicated less time to academics and more to watching videos and checking social media, resulting in an average daily usage of 6.13 hours. Given the magnitude of the problems caused by excessive mobile phone use among students, it is imperative for all stakeholders—educational authorities, teachers, parents, and students—to act collaboratively and move toward a culture of responsible technology use.

Keywords: Classification, Digital multitasking, Nomophobia, Circadian rhythm.

Introducción

En México, igual que en otras partes del mundo, la incorporación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC'S) es vista como progreso social. Se pueden identificar tres momentos tecnológicos importantes: computadora personal -segunda mitad de la década de los 90's-, Internet -inicio de la década de 2000- y Smartphone -entre 2011 y 2015-, (Leal & Porras, 2019). La implementación de estas tecnologías ha beneficiado a múltiples áreas del conocimiento, entre ellas la ingeniería (automatización, robótica, optimización de tiempos y recursos, internet de las cosas, Chien et al., 2015), la medicina (medicina de precisión, telemedicina y acceso remoto, cirugía robótica y logística, Topol, 2019) y la educación, entre otras. Para el caso concreto de ésta última, diversas investigaciones concluyen que el uso de la tecnología facilita el aprendizaje activo, estimula el pensamiento creativo (resolución de problemas), eleva el autoconcepto y la motivación, mejora la retención de conceptos abstractos, tiene acceso a retroalimentación personalizada instantánea en cualquier momento (uso de IA), estas y otras ventajas ayudan al estudiante a mejorar sus calificaciones, (Hew & Brush, 2007). Sin embargo, la herramienta también ha generado diversas desventajas, como la brecha digital (exclusión de estudiantes sin conectividad o equipamiento adecuados; Quinga et al., 2023; Tello L., 2007) y la tendencia a la distracción cognitiva debido al uso de dispositivos electrónicos, el llamado "multitasking digital" (Opsenica & Randelović, 2022). El fenómeno del multitasking digital se asocia con una disminución de la atención, lo que afecta directamente el aprendizaje. Es decir, estudiar en entornos con interrupciones constantes (como revisar redes sociales, textear, jugar, ver televisión, entre otros) afecta la comprensión lectora y perjudica la asimilación de los contenidos. Si el multitasking digital es intenso o se prolonga durante largos periodos de tiempo, se produce una sobrecarga cognitiva que deriva en un procesamiento insuficiente de la actividad principal, lo que genera una respuesta de estrés, (Baumgartner & Wiradhany, 2022).

Para el caso de México, según la Encuesta Nacional Sobre Disponibilidad y uso de La Información en los Hogares (ENDUTIH), la población de 6 años y más, usuaria de teléfono celular, se incrementó de 78.3 % a 81.7 % entre 2021 y 2024, mientras que la población de entre 12 y 17 años, usuaria de teléfono celular pasó de 89.5 % a 91.6 % en el mismo periodo (INEGI, 2025, Redim, 2026). Adicionalmente, el INEGI observó que, en 2024, el 90.6 % de la población usuaria de teléfono inteligente utilizó aplicaciones de mensajería instantánea; 78.0 % accedió a contenidos de audio y video y 77.9 % accedió a redes sociales, 32.1 % utilizó aplicaciones para jugar y 27.4 % lo empleó para editar fotos o videos, (INEGI, 2025). Esta tendencia al alza se observa en países como Estados Unidos (Spiratos & Ratanasiripong, 2023), China (Su et al.,

2025), Corea (Song & Smith, 2025), India (Kumar et al., 2024) e Indonesia (Hery Setiyawan, et al, 2024).

Si bien es cierto que algunas investigaciones recientes muestran que el uso de dispositivos móviles como celulares, presenta claros beneficios para el aprendizaje y la comunicación cuando se usa en actividades académicas (Amez & Baert, 2020; Adlit et al., 2023, Herrera, 2025), otras indican que existe una fuerte relación entre el tiempo de uso del celular, en actividades no académicas y el bajo rendimiento académico de los estudiantes, así como problemas de productividad, incumplimiento en la entrega de tares, problemas de ansiedad, baja calidad del sueño y adicción al teléfono celular. Siebers et al. (2022), mencionan que la sola presencia de un teléfono inteligente, puede llevar a la distracción. Johannes et al. (2019), encontraron que los adolescentes se encuentran en un estado de alerta permanente, debido a las notificaciones de sus teléfonos celulares, es decir, experimentan vigilancia y distracción.

En algunos estados de la república mexicana como Querétaro, Aguascalientes, Morelos, Guanajuato, Estado de México y recientemente la Ciudad de México, se aprobó prohibir el uso de celulares en escuelas primarias y secundarias, durante el horario escolar, los principales efectos detectados, que llevaron a esta decisión son: pérdida de concentración, problemas de sueño, ansiedad, afectaciones directas al rendimiento académico de los menores, así como medidas que contribuyan a frenar el ciberacoso y en general proteger la salud de los estudiantes, (Dimas, 2026; Alin, 2026).

De acuerdo con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023), para que niños y adolescentes crezcan sanos, deben pasar menos tiempo sentados y jugar más. Para edades entre 12 y 17 años, se recomienda un uso máximo de pantalla de 2 horas al día y complementarlo con hábitos saludables: alimentación, sueño, 60 minutos de ejercicio físico, contacto social.

En la Universidad Autónoma Chapingo (UACh) se ha observado un incremento en el acceso y uso de dispositivos móviles o celulares entre los estudiantes de la Preparatoria Agrícola (PA), en particular entre los de nuevo ingreso. Este fenómeno plantea algunas preguntas relevantes como son: (a) ¿Cuántas horas de uso de celular dedican los estudiantes de nuevo ingreso para interactuar en redes sociales, ver videos, jugar juegos o alguna otra actividad de entretenimiento? (b) ¿El tiempo dedicado a una o más de estas actividades influye en su rendimiento académico? (c) ¿El tiempo dedicado al uso del celular disminuye el tiempo que deberían dedicar a estudiar sus materias? (d) ¿Está dedicando horas de sueño al uso del celular? Y (e) ¿Los estudiantes con mejor rendimiento académico dedican menos tiempo al uso del celular?

Para responder las preguntas previas, se realizó el presente estudio, el cual, tiene como objetivo conocer la dinámica del uso de celular y determinar si este, está influyendo en el rendimiento académico de los estudiantes de nuevo ingreso de la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

Materiales y métodos

Se realizó un estudio descriptivo transversal con el objetivo de conocer la dinámica de uso del dispositivo móvil y determinar si el tiempo frente a la pantalla se asocia con su rendimiento académico en el curso de Matemáticas I, el cual se imparte a los estudiantes de nuevo ingreso de la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Por tal motivo, fueron

seleccionados, de manera aleatoria, 297 alumnos de primer año del ciclo escolar 2025-2026, a los que se les pidió completar la encuesta elaborada y validada para este proyecto. El día de la aplicación, se explicó a los estudiantes los aspectos de confidencialidad, objetivos del estudio y la importancia de su colaboración. Se observó una participación seria y comprometida, el tiempo medio de respuesta fue de 16.5 minutos.
Además del uso del dispositivo móvil, el instrumento contenía preguntas de carácter general (sexo, edad, estado de procedencia, etc.), tipo de escuela de procedencia y estado emocional. El análisis de la información se dividió en dos partes; la primera correspondió a lo descriptivo, aquí se estudió el comportamiento en el uso del dispositivo móvil, después, el uso en función del sexo, se buscó si vivir solo o con la familia se relaciona con el tiempo de uso, finalmente, se buscó si el uso excesivo está relacionado con el desempeño académico del alumno en el curso de Matemáticas I. Los análisis estadísticos fueron realizados en el software R, (R CORE, 2023). El nivel de significancia se fijó en $\alpha = 0.05$.

Resultados y discusión

Al cierre del primer semestre, 21 hombres y 7 mujeres se habían dado de baja. Los resultados presentados en las siguientes secciones corresponden a los 269 estudiantes vigentes.
La distribución del número de horas que el estudiante dedica a actividades académicas, juegos, redes sociales y videos se muestra en la figura 1.

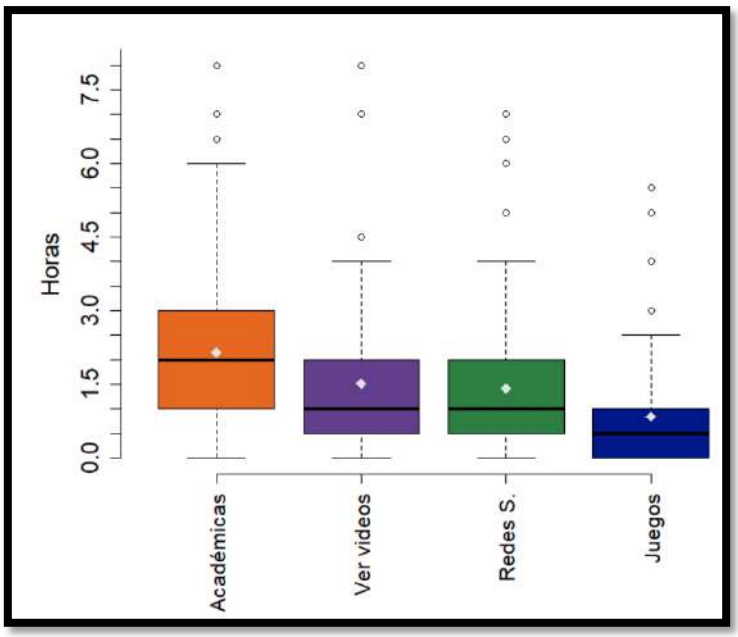


Figura 1. Distribución del número de horas para diferentes usos del celular. El rombo gris claro representa el promedio de cada categoría. Fuente: elaboración propia.

En la gráfica previa se observa que, al inicio del semestre, los alumnos dedicaban más tiempo a realizar actividades académicas y menos tiempo a los videojuegos. Las estadísticas descriptivas de cada categoría se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Estadísticos de resumen para el número de horas de uso de celular. Fuente: elaboración propia.

Uso	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Rango
Académico	0	8	2.15	2	2
Ver videos	0	8	1.51	1	1.5
Redes sociales	0	7	1.41	1	1.5
Juegos de video	0	5.5	0.84	0.5	1

La figura 1 y el cuadro 1, sugieren que el tiempo dedicado a las diferentes aplicaciones en el celular es diferente entre actividades. Para determinar si tal diferencia existe, se empleó la prueba de Kruskal-Wallis, la cual arrojó un valor p de $2.2e^{-16} < 0.05$, lo que indica que existe por lo menos un tiempo de uso diferente entre estas actividades. Las comparaciones post-hoc, a través del test de Dunn y la corrección del nivel de significancia de Bonferroni, identificaron que los tiempos medio de uso son diferentes, es decir, existe diferencia entre el tiempo empleado en actividades Académico y el empleado en Ver videos (p=3.32e-07); Académico – Redes sociales (p=2.26e-12); Académico – Juegos (p=7.15e-44); Ver videos – Redes sociales (p= 8.19e-01), Ver videos – Juegos (p=8.59e-15) y Redes sociales – Juegos (p= 3.12e-11). Lo anterior permite afirmar que, al inicio del semestre, los estudiantes de nuevo ingreso dedican más tiempo al uso de celular a actividades académicas y menos horas de uso a jugar videojuegos.

En la actualidad, existe una polémica respecto del uso del teléfono celular. Algunas investigaciones como la de Hawi & Samaha, (2016) están a favor del uso del dispositivo móvil, pues mencionan que el uso responsable de estos dispositivos puede ofrecer, a sus usuarios, beneficios como organización personal, comunicación, conectividad social, alivio frente al aburrimiento, el estrés y la depresión. Sin embargo, otros autores, como Zhu et al. (2025) concluyen que el uso habitual del teléfono inteligente no solo reduce las oportunidades de interacción personal, sino que también puede ocasionar problemas asociados a la dispersión de atención y la reducción del tiempo de sueño, factores que repercuten negativamente en el desempeño académico y a la larga en la salud mental. Spiratos & Ratanasiripong (2023), descubrieron que, en estudiantes de nivel secundaria y preparatoria, el uso excesivo del celular provoca falta de atención e interrupciones en los procesos cognitivos, además de aislar a los estudiantes e impedirles establecer relaciones interpersonales con profesores y compañeros. Estos hallazgos les permiten concluir que el abuso del uso del teléfono inteligente aumenta la depresión y el estrés percibido, reduce la autoestima y disminuye el rendimiento académico.

Para el caso del estudio, si bien, el tiempo de uso de celular que emplean los estudiantes es principalmente con fines académicos, es importante señalar que, con solo realizar actividades académicas, los estudiantes de nuevo ingreso de la prepa Chapingo, rebasan el tiempo recomendado por la OMS para este rango de edades (OMS, 2023). Más aún, al realizar la suma del tiempo que el estudiante emplea en cada una de las actividades, se puede observar que el uso del dispositivo es excesivo para su edad, ver la figura 2.

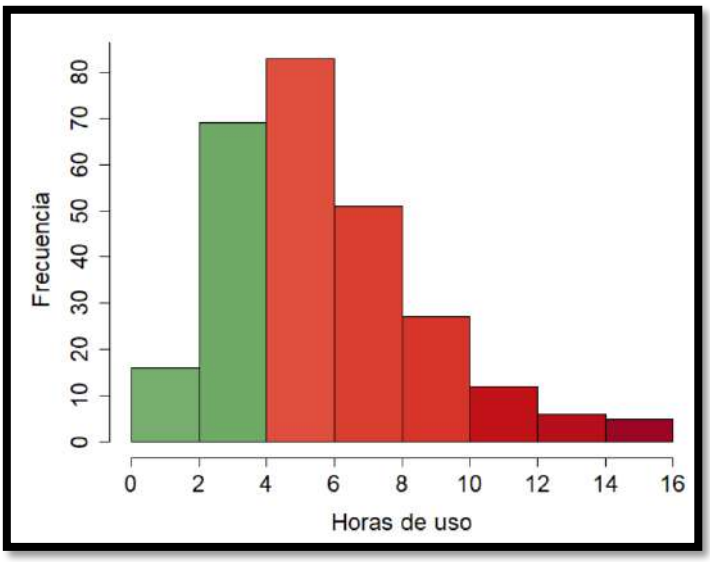


Figura 2. Distribución del número total del uso del celular. Fuente: elaboración propia.

Como complemento a la figura 2, el primer y el tercer cuartil están en 4 y 7 horas, respectivamente; la media en 5.7. Los datos muestran que el 75% (223) de los estudiantes usan el celular durante más de cuatro horas al día.

Para dimensionar las implicaciones que el uso del dispositivo móvil puede ocasionar en el desempeño académico y en la salud de los estudiantes, se emplearon las recomendaciones de la OMS (OMS, 2023), de Eris et al. (2021), de Khatiwada (2025) y de Magnago et al. (2024), para clasificar el tiempo de uso del dispositivo en las categorías siguientes. Uso **Normal:** de 0 hasta menos de 2 horas, **Alto**: de 2 a menos de 4, **Muy alto**: de 4 a menos de 6 horas y **Excesivo**: 6 o más horas de uso. A partir de esta clasificación, el comportamiento de horas de uso, en los alumnos en cuestión, tiene la siguiente distribución (figura 3).

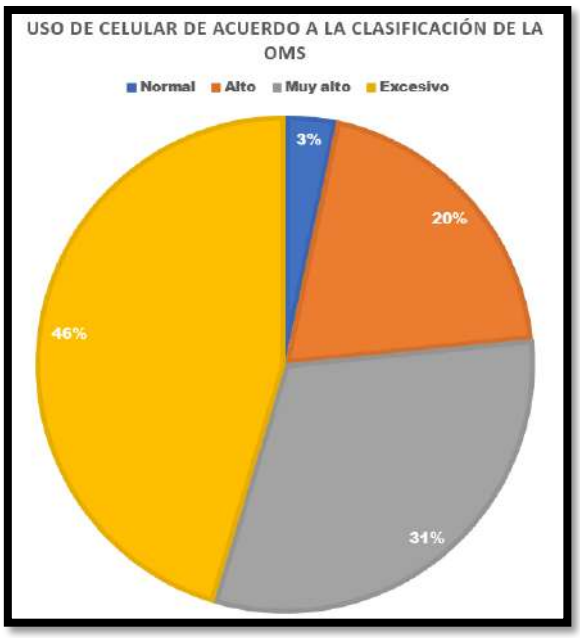


Figura 3. Distribución del uso de celular en estudiantes de nuevo ingreso a la PAUACh, de acuerdo a la clasificación discutida en el párrafo previo. Fuente. Elaboración propia.

Atendiendo las recomendaciones establecidas por los organismos internacionales, se observa que sólo el 3% de los estudiantes de nuevo ingreso emplearon el celular en periodo de tiempo clasificado como normal.

Para ver porqué el uso excesivo del dispositivo móvil, puede originar afectaciones en los estudiantes, es preciso recordar que la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2023), recomiendan que un adolescente entre 14 y 18 años, debe dormir entre 8 y 9 horas al día (Paruthi et al., 2016), emplear por lo menos 1.5 y 2 hora para tomar sus alimentos y asearse (Cohen et al., 2016), realizar 8 horas de actividades académicas (6 de clase, 2 para tareas, Nuvoli et al., 2025, OECD, 2023), una hora de actividad física (Bull et al., 2020), 2 a 3 horas de interacción social (Twenge et al., 2019) y 1 a 2 a horas de uso de recreativo de una pantalla (Abi et al., 2020). Tomando como referencia los valores mínimos descritos, se observa que el estudiante emplea en total 21.5 horas de su día, dejando 2.5 horas libres. Esto nos permite afirmar que más del 87% de los estudiantes de nuevo ingreso están tomando mínimo 1.5 horas de alguna(s) de sus actividades (dejan de hacer dicha actividad). Calero et al. (2025) afirman que si no se limita el tiempo de uso del celular, el dispositivo puede distraer al estudiante y reducir su rendimiento escolar. Guevara et al. (2025) concluyeron que el contenido estimulante y la luz azul emitida por la pantalla pueden interferir con los ritmos naturales del cuerpo, lo que puede provocar problemas de sueño. Por su parte, Spiratos & Ratanasiripong (2023) encontraron que el uso excesivo del dispositivo móvil se correlaciona significativamente con la depresión, el estrés, la autoestima y la perseverancia. Además, descubrieron que el estrés, la autoestima y la perseverancia son predictores significativos del uso excesivo del celular.

Otro aspecto del trabajo es que se analizó el tiempo de uso de celular en función del sexo del estudiante. Los resultados se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Distribución del tiempo promedio de uso de celular en función del sexo del estudiante. Fuente. Elaboración propia

Uso	**General 269**	**Mujer 137**	**Hombre 132**	p
Académico	2.15	2.18	2.11	0.69
Ver videos	1.51	1.57	1.45	0.38
Redes sociales	1.41	1.42	1.40	0.89
Juegos de video	0.84	0.53	1.17	0.000000064
Horas totales de uso	5.78	5.68	6.12	0.20
Por la noche	22.25	22.25	22.24	0.94

El cuadro 2 nos muestra un comportamiento similar en la distribución del uso de horas de celular, excepto en las horas destinadas a los juegos, resaltando que, en este rubro, los hombres dedican en promedio más del doble de tiempo en comparación con las mujeres ($p \sim 0$).

Para determinar si el uso excesivo del celular se asocia con el rendimiento académico de los estudiantes en el curso de Matemáticas I, se comparó el uso de pantalla entre quienes aprobaron y entre quienes reprobaron la asignatura. Los resultados se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Distribución del tiempo promedio de uso de celular entre alumnos aprobados y reprobados en matemáticas I. Fuente. Elaboración propia.

Resultado del Curso de Matemáticas I	Académico	Ver videos	Redes sociales	Juegos de video	Horas totales de uso	Por la noche
Aprobado N=226	2.07	1.56	1.40	0.86	5.87	22.23
Reprobado N=43	2.54	1.3	1.47	0.73	6.05	22.34
Valor **p**	0.057	0.20	0.7	0.35	0.59	0.35

En el cuadro 3 se observa un comportamiento similar en el uso diario del celular. Este comportamiento puede deberse a que la información se recabó al inicio del semestre, cuando el estudiante estaba en el periodo de adaptación del nivel educativo, lo cual afecta sus hábitos académicos, (Barrientos et al., 2025).

Una característica particular de la UACh es que, recibe estudiantes de todo el país, esto hace que la gran mayoría tenga que vivir solos/solas, con un amigo(a), compartan habitación con compañeros/compañeras y algunos más, vivan con algún familiar y algunos siguen dentro del núcleo familiar. En este punto, Álvarez y Barreto (2020) señalan que la familia influye en el rendimiento académico de los jóvenes. Es este grupo social el encargado de transmitir creencias, valores, normas, formas de afrontar los problemas y comportamientos esperados. En el caso particular del uso de celular, la función mediadora del entorno familiar resulta indispensable para evitar la dependencia tecnológica.

Atendiendo los hallazgos de Álvarez y de Barreto, el presente trabajo también investiga la existencia de una relación entre el uso excesivo del celular y el nuevo entorno del estudiante (personas con las que actualmente vive). De los 269 estudiantes vigentes, el 50.1% dijeron vivir con compañero(a)/amigo(a), 15.24% con sus padres y el resto dijo vivir solas/solos. La distribución del uso del celular en función de la compañía en la nueva vivienda se presenta en el cuadro 4.

Cuadro 4. Distribución del tiempo promedio de uso de celular dependiendo de con quién vive el estudiante. Fuente. Elaboración propia.

Vives	Académico	Ver videos	Redes sociales	Juegos de video	Horas totales de uso	Por la noche
Amigo(a) / Compañero(a)	2.26	1.38	1.29	0.88	5.78	22.18
Padres / Familia	2.12	1.53	1.39	0.71	5.76	22.33
Sola/Solo	1.99	1.70	1.59	0.83	6.13	22.30
p	0.18	0.13	0.17	0.52	0.67	0.30

La información del cuadro muestra que estudiantes que viven solos tienen una tendencia a emplear menos tiempo a las actividades académicas y más tiempo en ver videos, revisar sus redes sociales y en general, el uso total del dispositivo es mayor. Sin embargo, la prueba de Kruskal-Wallis, empleada para comparar el uso medio del dispositivo en cada actividad, permite concluir que no existe evidencia estadísticamente significativa que respalde esto (el p valor de cada comparación está en el último renglón del cuadro 4).

Si bien no se encontró evidencia estadísticamente significativa que indique que estudiantes que viven solos sean más propensos a emplear el celular de manera excesiva, el problema de uso alto/excesivo persiste, y si este no se atiende, puede complicarse, particularmente porque los estudiantes de preparatoria no son suficientemente maduros y les cuesta autorregularse, (Valkenburg et al., 2022). Es aquí donde es necesario afrontar el problema mediante la responsabilidad compartida entre autoridades académicas, docentes, tutores y alumnos.

Conclusiones

En este trabajo se estudió el uso del teléfono celular entre los estudiantes de nuevo ingreso de la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Entre los hallazgos, se identificó que más del 87% de los estudiantes de nuevo ingreso emplean el dispositivo de manera excesiva. Si bien al inicio del semestre la principal actividad es académica, al sumar las horas de cada actividad, la media oscila en 5.78 horas. Este hecho puede afectar el desempeño académico y emocional de los estudiantes. Al utilizar su dispositivo móvil durante tanto tiempo, el estudiante deja de realizar actividades primordiales como las tareas, la actividad física, el sueño y la interacción social cara a cara. Este comportamiento, a la larga, genera bajo rendimiento académico, problemas de ansiedad, deterioro de la calidad del sueño y adicción al teléfono celular (Siebers et al., 2022).

Al comparar a los aprobados y a los reprobados, se encontró que si un estudiante utiliza Muy alto-Excesivo, la probabilidad de aprobar es de 0.83; en cambio, si el tiempo de uso del dispositivo es Normal-Alto, la probabilidad de aprobar es de 0.87. Un resultado similar se observó en la probabilidad de reprobar (0.17 vs 0.13, respectivamente). Sin embargo, la prueba Chi cuadrada ($p=0.61$) mostró que las diferencias observadas entre aprobados y reprobados **no** son estadísticamente significativas.

Para evitar complicaciones mayores, es imperativo actuar de manera colaborativa entre autoridades escolares (diseño y aplicación de estrategias encaminadas a regular y concientizar acerca del impacto de dispositivos móviles en el bienestar estudiantil), profesores (establecer normas claras del uso en el aula, incorporar el dispositivo solo como herramienta), padres o tutores (definir horarios de uso, lugares libres de pantallas, educar con el ejemplo) y estudiantes (dejar el celular mientras toman clases, practicar el autocontrol, buscar ayuda en caso de identificar problemas).

Si, además del uso del celular, se consideran otros factores (conocimientos previos, aspectos emocionales, lugar de procedencia, nivel de estudios de padres/tutores, etc.), los resultados podrían cambiar.

Finalmente, se debe destacar que la información empleada para la investigación fue tomada al inicio del semestre, entonces, en el desarrollo del mismo hubo cambios importantes los cuales es necesario considerar. Para tener una visión más completa del impacto del uso excesivo del celular en el rendimiento académico de los estudiantes del nivel medio superior, es necesario

realizar estudios más completos, por ejemplo, dar seguimiento periódico a los estudiantes, incluir factores emocionales (motivación, ansiedad, depresión, estrés, etc.), factores institucionales (tutorías, trámites administrativos, métodos de enseñanza), condiciones físicas de las aulas (conectividad, ventilación, mobiliario y relación con pares) y factores familiares.

Literatura citada

Abi-Jaoude E, Naylor KT, Pignatiello A. (2020) Smartphones, social media use and youth mental health. CMAJ. 2020 Feb 10;192(6):E136-E141. doi: 10.1503/cmaj.190434. PMID: 32041697; PMCID: PMC7012622.

Adlit, M. F., Dalit, J., Puzon Viii, D. L., Almirañez, J. R. G., Castres, K. E. B., Beronia, S. M. D., Aurelio, M. D., Aguilar, J. A. A., & Goloran, N. A. (2023). Effectiveness of Mobile Phones as Learning Aid among Senior High School Students. European Journal of Theoretical and Applied Sciences, 1(2), 34–46. https://doi.org/10.59324/ejtas.2023.1(2).03.

Alín, P. 2026. Ciudad de México regula celulares en primarias y secundarias: qué dice la reforma y cuándo entra en vigor. El País México. https://elpais.com/mexico/2026-05-22/ciudad-de-mexico-regula-celulares-en-primarias-y-secundarias-que-dice-la-reforma-y-cuando-entra-en-vigor.html.

Álvarez-Bermúdez, J., & Barreto-Trujillo, F. J. (2020). Clima familiar y su relación con el rendimiento académico en estudiantes de Bachillerato. Revista de Psicología y Educación, 15(2), 166-183.

Amez, S., & Baert, S. (2020). Smartphone use and academic performance: A literature review. International Journal of Educational Research, 103, 101618. https://doi.org/10.1016/j.ijer.2020.101618.

Barrientos L. J., Reyes S. j., García C. M.A. 2025. Consecuencia del uso del celular y redes sociales en el rendimiento académico de los estudiantes en una Institución de Educación Superior en Fresnillo, Zac. (2025). FILHA, 20(33), 167-198. https://doi.org/10.60685/filha.v20i33.3515

Baumgartner, S. E., & Wiradhany, W. (2022). Not all media multitasking is the same: The frequency of media multitasking depends on cognitive and affective characteristics of media combinations. Psychology of Popular Media, 11(1), 1–12. https://doi.org/10.1037/ppm0000338

Bull FC, Al-Ansari SS, Biddle S, Borodulin K, Buman MP, Cardon G, Carty C, Chaput JP, Chastin S, Chou R, Dempsey PC, DiPietro L, Ekelund U, Firth J, Friedenreich CM, Garcia L, Gichu M, Jago R, Katzmarzyk PT, Lambert E, Leitzmann M, Milton K, Ortega FB, Ranasinghe C, Stamatakis E, Tiedemann A, Troiano RP, van der Ploeg HP, Wari V, Willumsen JF. (2020).

World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour. Br J Sports Med. 2020 Dec;54(24):1451-1462. doi: 10.1136/bjsports-2020-102955. PMID: 33239350; PMCID: PMC7719906.

Calero Ledesma, J. G., Gavilanes Yanez, R. V., Endara Tisalema, A. M., & Yepez Obando, M. D. J. (2025). Impacto del uso de tecnologías móviles en el rendimiento académico de estudiantes de Bachillerato. ASCE, 4(2), 795–811. https://doi.org/10.70577/ASCE/795.811/2025

Chien S, Bashir R, Nerem RM, Pettigrew R. 2015. Engineering as a new frontier for translational medicine. Sci Transl Med. (281):281fs13. doi: 10.1126/scitranslmed.aaa4325. PMID: 25834106; PMCID: PMC4698163.

Cohen JFW, Jahn JL, Richardson S, Cluggish SA, Parker E, Rimm EB. 2016. Amount of Time to Eat Lunch Is Associated with Children's Selection and Consumption of School Meal Entrée, Fruits, Vegetables, and Milk. J Acad Nutr Diet. 116(1):123-128. doi: 10.1016/j.jand.2015.07.019. Epub 2015 Sep 11. PMID: 26372337; PMCID: PMC4698073.

Dimas, E. P. (2026). ¿En qué estados ya no dejan usar celulares en escuelas? Lista de entidades con restricciones. UnoTV. https://www.unotv.com/nacional/estados-mexico-no-dejan-usar-celulares-en-escuelas-lista-entidades-con-restricciones/

Eriş, H., Havlioğlu, S., & Kaya, M. (2021). The Effect of Mobile Phone Use of Universty Students on Their Academic Success. European Journal of Science and Technology. https://doi.org/10.31590/ejosat.942753

Guevara-Rincón G., Rincón-Gallart A., Brement M., Lozano-Rivas F. (2025). Educar en tiempos de hiperconexión: El uso del móvil en la (pre)adolescencia y su impacto académico. Pautas y recomendaciones para su control. RedCA. vol. 8.

Hawi, N. S., & Samaha, M. (2016). The relations among social media addictions, self'esteem, and life satisfaction in university students. Aocial Science Computer Review, 35 (5), 576-585.
Herrera, P. (2025). Celulares en las aulas: ¿herramienta educativa o distracción? - UNAM Global. UNAM Global - De La Comunidad Para La Comunidad. https://unamglobal.unam.mx/global_revista/celulares-en-las-aulas-herramienta-educativa-o-distraccion/

Hery Setiyawan, Indira Fitri Aisyah, Ifa Ayiyida, & Setya Ridia Cahyaning Dewi Tyastuti. (2024). Pengaruh Intensitas Penggunaan Hand Phone Terhadap Hasil Belajar Siswa. Semantik : Jurnal Riset Ilmu Pendidikan, Bahasa Dan Budaya, 2(4), 80–84. https://doi.org/10.61132/semantik.v2i4.1064

Hew, K. F., & Brush, T. (2007). Integrating technology into K-12 teaching and learning: Current knowledge and future directions. Educational Technology Research and Development, 55(3), 223-252.

Inegi. (2025). Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares 2024. ENDUTIH. Diseño muestral. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2025/endutih/ENDUTIH_24_RR.pdf

Johannes, N., Veling, H., Verwijmeren, T., & Buijzen, M. (2019). Hard to resist? The effect of smartphone visibility and notifications on response inhibition. Journal of Media Psychology: Theories, Methods, and Applications, 31(4), 214–225. https://doi.org/10.1027/1864-1105/a000248

Khatiwada, S. (2025). Analyzing the Impact of Smartphone Use and Mobile Distraction in Higher Education. International Research Journal of MMC, 6(3), 91–114. https://doi.org/10.3126/irjmmc.v6i3.83027

Kumar, Rakesh; Gupta, Alpa; Jaiswal, Ashvita. 2024. Smartphone addiction and its correlation with academic performance in high school adolescents: An observational study. Archives of Mental Health 25(2):p 117-123. DOI: 10.4103/amh.amh_97_24

Leal Güemez, R., & Porras Duarte, S. T. (2019). Desarrollo Digital en México. Denarius, (37), 13. https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcsh/denarius/v2019n37/Leal

Magnago, W., Siqueira, N. K., Candeia, Á. S., Baiôcco, L. V., Da Silva, E. I. V. N., Pinheiro, R. B., Dos Santos, L. V. R., Pires, H. L., Ramos, A. M., & Bravim, S. C. S. (2024, noviembre 14). DIGITAL DEPENDENCE: HOW CELL PHONES ARE INFLUENCEING STUDENTS' BEHAVIOR. I Congresso Internacional Multidisciplinar (I CIM). I Congresso Internacional Multidisciplinar (I CIM). https://doi.org/10.56238/I-CIM-007

Nuvoli V, Camanni M, Mariani I, Ponte S, Black M, Lazzerini M. (2025). Digital screen exposure in infants, children and adolescents: a systematic review of existing recommendations. Public Health Pract (Oxf). doi: 10.1016/j.puhip.2025.100653. PMID: 41127851; PMCID: PMC12538403.

OCDE (2023), PISA 2022 Results (Volume II): Learning During – and From – Disruption, PISA, OCDE Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/a97db61c-en.

OMS (2023). OMS recomienda evitar exponer a niños menores de dos años de vida a pantallas - Ministerio de Salud Publica y Bienestar Social. https://www.mspbs.gov.py/portal/27094/oms-recomienda-evitar-exponer-a-nintildeos-menores-de-dos-antildeos-de-vida-a-pantallas.html

Opsenica Kostić, Jelena & Ranđelović, Kristina. (2022). Digital Distractions: learning in multitasking environment. 301-304. 10.36315/2022inpact070.

Paruthi S, Brooks LJ, D'Ambrosio C, Hall WA, Kotagal S, Lloyd RM, Malow BA, Maski K, Nichols C, Quan SF, Rosen CL, Troester MM, Wise MS. (2016). Recommended Amount of Sleep for Pediatric Populations: A Consensus Statement of the American Academy of Sleep Medicine. J Clin Sleep Med.;12(6):785-6. doi: 10.5664/jcsm.5866. PMID: 27250809; PMCID: PMC4877308.

Quinga-Villa, C. A., Zambrano-Cuenca, A. M., Mendoza-Suárez, Y. L., & Lara-Imbaquingo, F. A. (2023). Brecha digital en la educación: Causas y soluciones. Space Scientific Journal of Multidisciplinary, 1(4), 1-19. https://doi.org/10.63618/omd/ssjm/v1/n4/21

R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Redim. (2026, 25 febrero). Uso de internet, celular inteligente y redes sociales de la infancia y adolescencia de México (2015-2024) -. Blog de datos e incidencia política de REDIM. https://blog.derechosinfancia.org.mx/2026/02/25/uso-de-internet-celular-inteligente-y-redes-sociales-de-la-infancia-y-adolescencia-de-mexico-2015-2024/

Siebers, T., Beyens, I., Pouwels, J. L., & Valkenburg, P. M. (2022). Social Media and Distraction: An Experience Sampling Study among Adolescents. Media Psychology, 25(3), 343–366. https://doi.org/10.1080/15213269.2021.1959350

Spiratos, K., & Ratanasiripong, P. (2023). Problematic Smartphone Use Among High School Students. Journal of School Administration Research and Development, 8(2), 76–86. https://doi.org/10.32674/jsard.v8i2.4893

Su, M., Zhang, J., Xu, Y., & Hu, J. (2025). The relationship between smartphone addiction, academic procrastination, and anxiety: Evidence from a diary-based approach. Acta Psychologica, 260, 105517. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2025.105517

Song, M., & Smith, S. (2025). Study on Teenagers' Use of Mobile Phones. Journal of Student Research, 14(1). https://doi.org/10.47611/jsrhs.v14i1.8667

Tello Leal, E., (2007). Las tecnologías de la información y comunicaciones (TIC) y la brecha digital: su impacto en la sociedad de México. RUSC. Universities and Knowledge Society Journal, 4(2), 1-8.

Topol E. J., 2019, High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. Nat Med. 2019 Jan;25(1):44-56. doi: 10.1038/s41591-018-0300-7. Epub 2019 Jan 7. PMID: 30617339.

Twenge, J. M., Spitzberg, B. H., & Campbell, W. K. (2019). Less in-person social interaction with peers among U.S. adolescents in the 21st century and links to loneliness. Journal of Social and Personal Relationships, 36(6), 1892–1913. https://doi.org/10.1177/0265407519836170

Valkenburg, P. M., Meier, A., & Beyens, I. (2022). Social media use and its impact on adolescent mental health: An umbrella review of the evidence. Current Opinion in Psychology, 44, 58-64. [Link/DOI: 10.1016/j.copsyc.2021.08.017]

Zhu C, Li S and Zhang L (2025) The impact of smartphone addiction on mental health and its relationship with life satisfaction in the post-COVID-19 era. Front. Psychiatry 16:1542040. doi: 10.3389/fpsyt.2025.1542040

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Evaluación de métodos convencionales, redes neuronales y CHIRPS para la reconstrucción de series mensuales de precipitación en la Ciudad de México, 1981–2024

María del Carmen García-Pavón[1], Laura Alicia Ibañez-Castillo[1], Raquel Salazar-Moreno[1]

Mesa 1: Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La disponibilidad de datos de precipitación es fundamental para el desarrollo de estudios hidrológicos y climáticos, así como para la gestión de los recursos hídricos. Sin embargo, la presencia de datos faltantes en las estaciones climatológicas limita su aprovechamiento. El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño de diferentes métodos para la reconstrucción de series mensuales de precipitación con datos faltantes, incluyendo la media aritmética, el inverso del cuadrado de la distancia, la relación normalizada, la red neuronal artificial feedforward backpropagation, la red neuronal recurrente de Elman y el producto de precipitación satelital CHIRPS, en 15 estaciones climatológicas de la Ciudad de México durante el periodo 1981–2024. El desempeño de cada método se evaluó mediante los índices NSE, R^2, MAE, RMSE y PBIAS. Los resultados mostraron que la red feedforward backpropagation presentó el mejor desempeño global, seguida por el método de relación normalizada, mientras que CHIRPS constituyó una alternativa útil con un desempeño intermedio.

Palabras clave: precipitación mensual, reconstrucción de series de tiempo, redes neuronales, CHIRPS, Ciudad de México.

Abstract

The availability of precipitation data is essential for hydrological and climatological studies, as well as for water resources management. However, missing data at climatological stations limit their effective use. The objective of this study was to evaluate the performance of different methods for reconstructing monthly precipitation series with missing data, including the arithmetic mean, inverse distance squared, normal ratio, feedforward backpropagation artificial neural network, Elman recurrent neural network, and the CHIRPS satellite precipitation product, at 15 climatological stations in Mexico City during the 1981–2024 period. The performance of each method was evaluated using the NSE, R^2, MAE, RMSE, and PBIAS indices. The results showed that the feedforward backpropagation neural network achieved the best overall performance, followed by the normal ratio method, whereas CHIRPS proved to be a useful alternative with intermediate performance.

Keywords: Monthly precipitation; time series reconstruction; Artificial neural networks; CHIRPS; Mexico City.

[1]Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México. maria.garcia.pavon.0506@gmail.com; libanezc@chapingo.mx; mvazquezp@chapingo.mx; mcarrillog@chapingo.mx

Introducción

La precipitación es una de las principales entradas en el ciclo hidrológico, esta ocurre una vez que la fuerza gravitacional logra que la masa de agua en las nubes caiga sobre superficie terrestre, ya sea en forma de lluvia, llovizna, granizo o nieve. Una vez que ocurre la precipitación, esta se distribuye dentro del ciclo hidrológico principalmente en escurrimiento, infiltración y/o evaporación (Campos-Aranda, 1998). Para este estudio, se consideró como precipitación únicamente a la lluvia.

Es importante, recalcar que el monitoreo y la medición de la precipitación es esencial para otras actividades ambientales, económicas y sociales como el manejo de cuencas, el diseño de obras hidráulicas, la planeación agrícola, la distribución hídrica, entre otros (Kidd & Huffman, 2011). Debido a su importancia, resulta indispensable contar con registros confiables y continuos de precipitación.

Las estaciones climatológicas miden variables meteorológicas, primordialmente la precipitación, evaporación, temperatura y velocidad del viento; estas mediciones pueden ser por periodos diarios, mensuales o por minutos. En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el encargado de la operación de las estaciones climatológicas; las cuales para 2022, se reportó una operación de únicamente el 53% del total de estaciones existentes (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2023).

Sin embargo, es frecuente encontrarse con datos faltantes en las estaciones climatológicas, esto debido a fallas en el equipo de medición, interrupciones operativos o errores de registro (Hırca & Eryılmaz Türkkan, 2024), lo que dificulta el uso de series completas de precipitación para otros fines. Debido a ello, se ha optado por métodos que ayuden a la estimación de datos faltantes de precipitación como: la media aritmética, el inverso del cuadrado de la distancia, el método de la relación normalizada, entre otros. Asimismo, se ha optado por el uso de redes neuronales (Alejo-Sanchez et al., 2025) como el algoritmo backpropagation; de igual manera, para la predicción de series de tiempo se han implementado las redes de Elman, cuyo entrenamiento se basa en los comportamientos anteriores a la serie para su predicción. Como otra alternativa para cubrir la deficiencia de datos de precipitación, se ha incorporado el uso de datos CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station) el cual proporciona estimaciones de precipitación mediante la integración de datos de pluviómetros y de satélites, cubriendo la mayoría de las regiones continentales (Funk et al., 2015).

El SMN reporta 61 estaciones climatológicas en la Ciudad de México, ubicadas en una superficie de 1,495 km^2; dentro de este territorio se presentan cinco climas cuya diferencia destaca en el nivel de humedad, además de diferencias altitudinales cercanas a 700 metros (INEGI, 2024). Debido a lo anterior se presenta una distribución espacial heterogénea de la precipitación entre estaciones (Peñaranda-Vélez et al., 2024; Tovar Cabañas et al., 2024).

En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño de métodos convencionales, redes neuronales artificiales y el producto satelital CHIRPS para la reconstrucción de series mensuales de precipitación correspondientes al periodo 1981–2024 en 15 estaciones climatológicas de la Ciudad de México. El desempeño de cada enfoque se evaluó mediante los índices NSE, R^2, MAE, RMSE y PBIAS, con el propósito de identificar la alternativa que proporcionó la mayor precisión en la reconstrucción de las series mensuales de precipitación.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la Ciudad de México, con coordenadas geográficas extremas 19° 35' 34" y 19° 02' 54" de latitud norte, de 98° 56' 25" y 99° 21' 54" de longitud oeste. Su superficie constituye alrededor del 0.1% del área total del país. Su llanura presenta elevaciones mínimas de 2,246 msnm, mientras que su sierra llega a elevaciones de hasta los 3,930 msnm (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2024).

La Ciudad de México presenta cinco tipos de clima según la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García. El clima BS1kw corresponde a un clima semiseco templado con lluvias en verano. Los climas c(w0), c(w1) y c(w2) pertenecen al grupo de los templados subhúmedos con lluvias en verano, diferenciándose según su grado de humedad, siendo el clima c(w0) el más seco de los tres y el c(w2) el más húmedo. Por último, el clima Cb'(w2) es un clima semifrío subhúmedo, siendo el de mayor humedad en la Ciudad de México (INEGI, 2024).

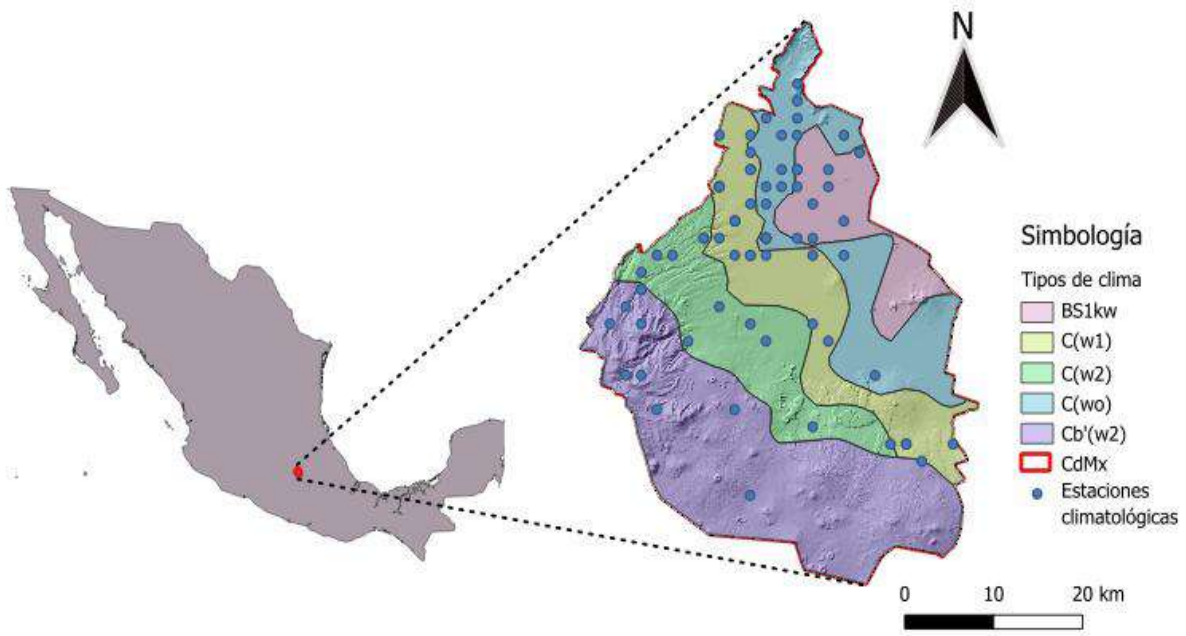


Figura 13. Zona de estudio (Fuente: elaboración propia con datos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], (2023).

Procesamiento de datos

De la página del Servicio Meteorológico Nacional en la página del CLICOM (http://clicom-mex.cicese.mx), se recopilaron los registros de precipitación mensual de 61 estaciones climatológicas en la Ciudad de México, desde el año 1877 a 2025.

Debido a la falta de información de los registros de las estaciones climatológicas de la Ciudad de México y tomando en cuenta que la base datos de CHIRPS empieza desde el año 1981, se optó por elegir solo a las estaciones operativas con registros desde 1981 a 2024. Con este filtro, se obtuvieron 15 estaciones climatológicas en la Ciudad de México, contando con 540 datos mensuales por cada estación (Ver Cuadro 1).

Cuadro 10. Información general de las estaciones climatológicas a predecir

Clave	Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)
9004	Calvario 61	19.2031	-99.1492	2726
9010	Colonia América	19.4125	-99.2017	2271
9014	Colonia Santa Úrsula Coapa	19.3033	-99.1481	2256
9020	Desviación Alta Al Pedregal	19.2969	-99.1822	2296
9022	El Guada	19.1344	-99.1731	2990
9029	Gran Canal Km 06+250	19.4767	-99.0914	2239
9032	Milpa Alta	19.1906	-99.0219	2420
9036	Playa Caleta 454 Colonia Marte	19.3953	-99.0978	2235
9041	San Francisco Tlalnepantla	19.1967	-99.1286	2620
9043	San Juan De Aragón	19.4653	-99.0792	2240
9045	Santa Ana Tlacotenco	19.1789	-99.0028	2595
9048	Tacubaya Central (Observatorio)	19.4036	-99.1961	2308.6
9051	Tláhuac	19.2628	-99.0036	2240
9068	Puente La Llave	19.4292	-99.0528	2234
9071	Colonia Educación	19.3339	-99.1322	2250

Fuente: elaboración propia con datos del SMN, 2026.

Algoritmo de Kohonen

Para una clasificación de acuerdo con el comportamiento hidrológico de la precipitación en las estaciones, se implementó el algoritmo Kohonen. En MATLAB 2025b, se utilizó el siguiente comando:

$$selforgmap(dimensions)$$

En base a la metodología de Gutiérrez A. (2020), se estableció lo siguiente:

- El entrenamiento de la red se basó en 15 entradas: la precipitación mensual promedio histórica de los meses de enero a febrero, latitud, longitud y altitud de cada estación climatológica.
- Se eligió la salida de 5 grupos, debido a que son 5 tipos de clima en la Ciudad de México.
- El número de iteraciones utilizado fue de 1,000.

Elección de estaciones predictoras

Se realizó la matriz de correlación de la precipitación mensual entre las 15 estaciones de las Ciudad de México y las más cercanas ubicadas en el Extado de México y Morelos. Posteriormente, para cada estación principal, se eligieron 3 estaciones predictoras con base a:

1. Menor a 10% de datos faltantes.
2. Clasificación del algoritmo de Kohonen.
3. Correlación entre la estación predictora y las auxiliares.

El orden de predicción de las estaciones climatológicas de la Ciudad de México se estableció a partir del porcentaje de datos faltantes y de la correlación con respecto a sus estaciones predictoras.

Estimación de datos faltantes

El Cuadro 2 resume los métodos utilizados para la reconstrucción de datos faltantes de precipitación mensual de las 15 estaciones de la Ciudad de México. En cada método se obtiene P_x, que se refiere al dato perdido para el mes en la estación correspondiente, Pi representa el dato existente de precipitación en la estación auxiliar, donde $i = 1,2,\dots,n$ para el mismo mes, siendo n el número de estaciones totales.

Cuadro 11. Métodos para la estimación de datos faltantes de precipitación.

Identificador	Método	Descripción
MA	Media aritmética	Utiliza la expresión: $P_x = \frac{\sum P_i}{n}$ (9)
ICD	Método del United States Weather Service	Relaciona la precipitación entre estaciones con el inverso del cuadrado de su distancia: $P_x = \frac{\sum P_i W_i}{\sum W_i}$ (10) W_i se obtiene con: $W_i = \frac{1}{D_i^2}$ (11) Donde D_i es la distancia entre la estación circundante auxiliar y la estación del dato perdido.
RN	Relación Normalizada	Utiliza la expresión: $P_x = \frac{1}{n}\left(\frac{N_x}{N_A}P_A + \frac{N_x}{N_B}P_B + \frac{N_x}{N_C}P_C\right)$ (12) Donde N_x, N_A, N_B, N_C es la precipitación media mensual en la estación del dato faltante x y en las estaciones auxiliares A, B, C (medias de todas las series históricas) y P_A, P_B, P_C son las precipitaciones registradas en las estaciones auxiliares del mes que falta en la estación x.
CHIRPS	Imágenes de CHIRPS (Climate	La base de datos de CHIRPS (https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps), cuenta con una resolución espacial de 0.05°. Los datos fueron obtenidos

	Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations)	mediante la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017), utilizando la colección UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY. La extracción de la información se realizó a partir de las coordenadas geográficas de cada una de las 15 estaciones climatológicas de la Ciudad de México. Posteriormente, los registros diarios fueron agregados mediante su suma para obtener la precipitación mensual acumulada (mm).
RB	Red Neuronal Artificial Feedforward backpropagation	Se implementó el siguiente comando en MATLAB 2025b: $newff = (entradas, salidas, neuronas\ ocultas,$ $función\ de\ activación\ de\ la\ capa\ oculta,$ $función\ de\ activiación\ de\ la\ capa\ de\ salida,$ $algoritmo\ de\ entrenamiento, función\ de\ aprendizaje$ Dicho comando fue implementado bajo los siguientes parámetros: Dicho comando fue implementado bajo los siguientes parámetros: - Se formó una arquitectura de 3 neuronas de entrada y 1 neurona de salida. - Se usó un 50% de datos para el entrenamiento, 25% para la validación y 25% para la evaluación. - Se probó el número de neuronas ocultas de 1 a 10 con 10 repeticiones cada una. - Los pesos fueron obtenidos de manera aleatoria. - La función de activación de la capa oculta fue tansig. - La función de activación de la capa de salida fue purelin. - El algoritmo de aprendizaje fue learngd. - El algoritmo de entrenamiento fue trainlm, el cual controla el coeficiente de aprendizaje.
RE	Red Neuronal Recurrente de Elman	En MATLAB 2025b, se aplicó la red neuronal recurrente de Elman usando el comando: $elmannet(retrasos, neuronas\ ocultas,$ $algoritmo\ de\ entrenamiento)$ Se usaron los siguientes parámetros:

		- Con una arquitectura de 3 neuronas de entrada y 1 neurona de salida. - Se usó un 70% de datos para el entrenamiento, 15% para la validación y 15% para la evaluación. - Los retrasos fueron definidos por el número de meses de la serie, es decir de 1 a 12. - Hubo 10 repeticiones por cada retraso. - La función de activación de la capa oculta fue tansig. - La función de activación de la capa de salida fue purelin. - El algoritmo de entrenamiento fue trainlm.

Fuente:Campos Aranda (1998).

Evaluación para la estimación del error

En el Cuadro 3 se presenta los evaluadores de desempeño para cada método utilizado donde P_i es la precipitación estimada, $\bar{P}$ es el promedio de la precipitación estimada, O_i es la precipitación observada y $\bar{O}$ es el promedio de la precipitación observada.

Cuadro 12. Evaluadores de desempeño.

Evaluador	Expresión	Descripción
Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE o NASH)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}$ (13)	Determina el grado ajuste de los valores observados y los valores predichos con respecto a la línea 1:1.
Coeficiente de determinación (R^2)	$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$ (14)	Evalúa el grado de asociación entre los valores observados y los valores predichos, un valor cercano a 1 indica una alta asociación.
Error Absoluto Medio (MAE)	$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert O_i - P_i \rvert$ (15)	Se presenta el error promedio absoluto entre los valores observados y los valores predichos.
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}$ (16)	Es un índice de error promedio entre los valores observados y los valores predichos.

Sesgo porcentual (PBIAS)	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i - P_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i}$ (17)	Indica que tan sobreestimados o subestimados son los valores predichos con respecto a los valores observados.

Fuente: Moriasi et al. (2015)

Resultados y discusión

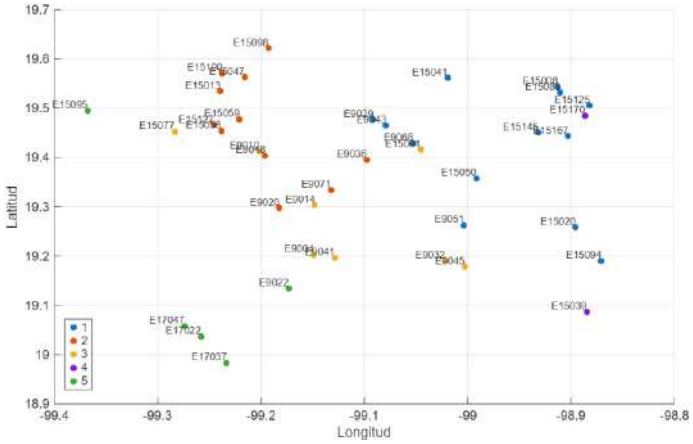


Figura 14. Distribución espacial de las estaciones climatológicas de estudio con su grupo correspondiente (Fuente: elaboración propia con MATLAB 2025b).

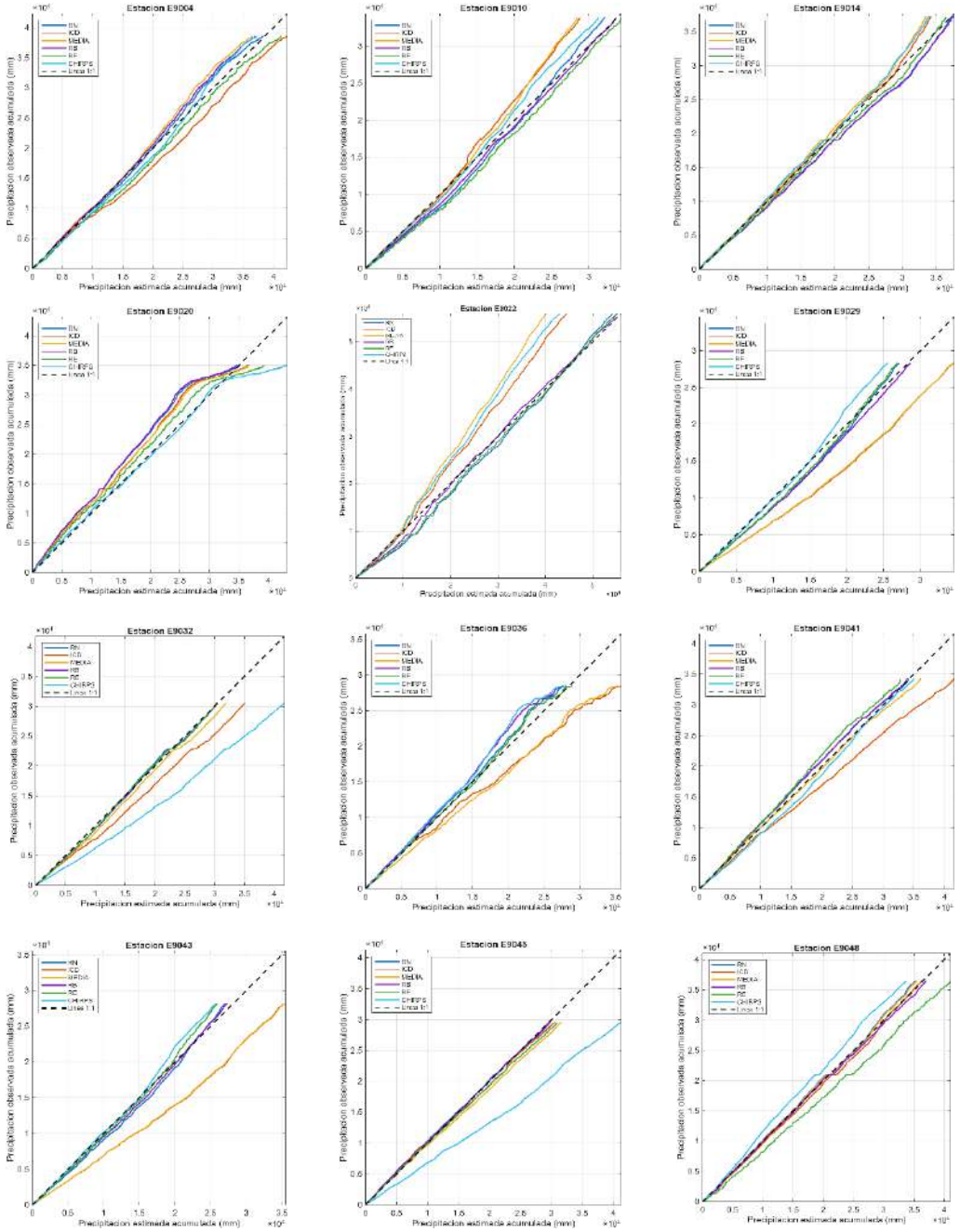
En la Figura 2 se presenta la distribución espacial de los grupos obtenidos aplicando el algoritmo de Kohonen, los cuales pareciera que permanecen concentrados en zonas definidas, pero el grupo 4 y 3 tienen algunas estaciones dispersas.
El orden de predicción junto con las estaciones predictoras para las estaciones principales viene detallado en el Cuadro 4.

Cuadro 13. Orden de las capas de salida con sus respectivas capas de entrada.

Orden	Estación principal	Estaciones predictoras			Datos faltantes
1	9043	15047	15058	15059	2
2	9048	15047	15058	15059	0
3	9029	15047	15059	9048	7
4	9020	15058	15061	9048	13
5	9036	15058	15059	15061	13
6	9014	15058	9043	9048	25
7	9068	15083	15170	9029	31
8	9022	17047	9014	9020	86
9	9010	15058	15059	9048	95
10	9071	9010	9014	9048	97
11	9051	15020	9014	9071	100
12	9041	9022	9014	9071	95
13	9004	9014	9041	9071	18
14	9032	9041	9071	15020	29
15	9045	9032	9041	15020	23

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3 se presentan la comparación entre la precipitación acumulada observada y la estimada mediante los métodos aplicados para las quince estaciones climatológicas analizadas. La línea discontinua representa la condición ideal 1:1, en la que la precipitación estimada coincide con la observada.



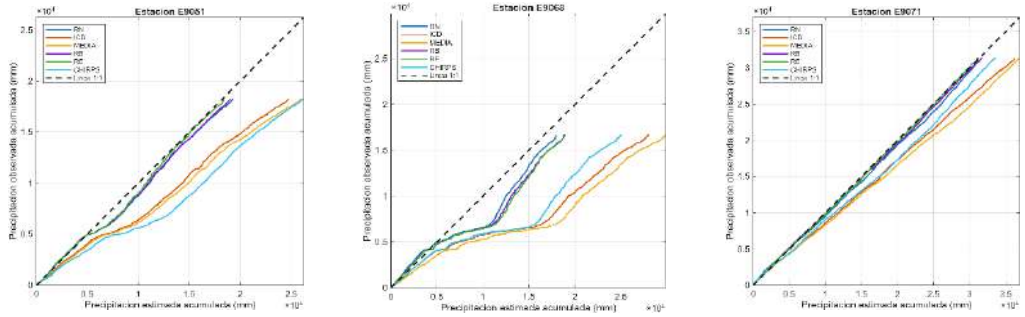


Figura 15. Precipitación acumulada observada y la estimada (fuente: elaboración propia).

Para el caso de las redes neuronales utilizadas, la red neuronal feedforward backpropagation (RB) presentó la mayor proximidad a la línea 1:1 en la mayoría de las estaciones, En contraste, el desempeño de la red recurrente de Elman (RE) tuvo el menor desempeño estadístico bajo las condiciones evaluadas. Este resultado coincide con Coulibaly & Evora (2007), quienes reportaron un mejor desempeño usando redes neuronales feedforward con respecto a las redes neuronales recurrentes.

Enseguida, el método de relación normalizada (RN) tuvo el segundo mejor desempeño estadístico, lo que indica que este método sigue siendo una alternativa competitiva para la obtención de datos faltantes (Céspedes et al., 2023). Por el contrario, los métodos tradicionales como la media aritmética (MEDIA) y el inverso del cuadrado de la distancia (ICD) mostraron una mayor dispersión respecto a la línea de referencia en varias estaciones.

Esquivel-Arriaga et al. (2024) señalan que CHIRPS reproduce adecuadamente la precipitación mensual, aunque su precisión depende de las condiciones climáticas y de la disponibilidad de estaciones meteorológicas. Para este caso, la base de datos de CHIRPS mostró un comportamiento intermedio; en estaciones como 9043, 9048, 9029 y 9014 reprodujo adecuadamente la precipitación acumulada, con trayectorias cercanas a la línea de referencia. Sin embargo, en estaciones como 9068, 9051 y 9045 presentó desviaciones progresivas respecto al comportamiento observado, principalmente durante los periodos de mayor precipitación acumulada.

También se destaca que la estación 9068 presentó el comportamiento más irregular para todos los métodos evaluados, mientras que estaciones como 9048, 9010 y 9071 mostraron una elevada concordancia entre la precipitación observada y la estimada, particularmente mediante RB y RN.

En el Cuadro 5, se presentan los valores promedios obtenidos de los seis métodos evaluados para la reconstrucción de las series mensuales de precipitación en las 15 estaciones climatológicas. En términos generales, se observa que usando la red neuronal feedforward backpropagation (RB) mostró el mejor comportamiento global, al obtener el mayor valor promedio de NSE con 0.771 y R^2 con 0.774, así como los menores valores promedio de MAE igual a 22.21 mm y RMSE con 35.62 mm.

Posteriormente el método de relación normalizada presentó el segundo mejor desempeño con un NSE promedio de 0.738 y PBIAS ligeramente inferior al método de RB. Por otra parte, CHIRPS alcanzó un desempeño intermedio ya que presentó errores y sesgos mayores a los métodos de RB y RN. Los métodos MEDIA e ICD mostraron desempeños similares, aunque inferiores a RB y RN, mientras que la red recurrente de Elman presentó el comportamiento menos favorable con el menor NSE y R^2, así como los mayores valores de MAE y RMSE.

Cuadro 14. Desempeño promedio de los métodos evaluados para la reconstrucción de series mensuales de precipitación en las 15 estaciones climatológicas de la Ciudad de México.

Método	NSE	R^2	MAE (mm)	RMSE (mm)	PBIAS (%)
RB	0.771	0.774	22.21	35.62	2.58
RN	0.738	0.743	23.22	38.16	2.55
CHIRPS	0.646	0.743	26.31	42.48	18.24
MEDIA	0.618	0.741	26.41	43.47	19.66
ICD	0.599	0.725	26.94	45.02	19.31
RE	0.314	0.378	43.46	63.39	5.07

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

La combinación del algoritmo de Kohonen, el porcentaje de datos faltantes y el análisis de correlación permitió establecer tres estaciones predictoras para cada una de las 15 estaciones climatológicas de la Ciudad de México. Así se evaluaron seis métodos para la reconstrucción de las series mensuales de precipitación: media aritmética (MEDIA), inverso del cuadrado de la distancia (ICD), relación normalizada (RN), red neuronal artificial feedforward backpropagation (RB), red neuronal recurrente de Elman (RE) y el producto satelital CHIRPS. La red neuronal feedforward backpropagation (RB) presentó el mejor desempeño global al obtener, en promedio, los mayores valores de NSE y R^2, así como los menores errores de MAE y RMSE. Por su parte, el método de relación normalizada (RN) obtuvo el menor sesgo promedio PBIAS, mostrando un desempeño competitivo respecto a RB.

El producto satelital CHIRPS mostró un desempeño intermedio. En varias estaciones reprodujo adecuadamente el comportamiento de la precipitación mensual y obtuvo resultados comparables con los métodos tradicionales; sin embargo, su precisión fue inferior a la alcanzada por RB y RN, especialmente en estaciones con mayor variabilidad espacial de la precipitación.

Los métodos tradicionales como la media aritmética e ICD presentaron, en términos generales, el menor desempeño, mientras que la red recurrente de Elman mostró resultados inferiores a los obtenidos por RB, evidenciando que la incorporación de memoria temporal no representó una mejora para las condiciones analizadas.

Finalmente, la evaluación conjunta mediante los índices NSE, R^2, MAE, RMSE y PBIAS, complementada con el análisis gráfico de la precipitación acumulada, confirmó que la red neuronal feedforward backpropagation constituye el enfoque más preciso y consistente para la reconstrucción de series mensuales de precipitación en las 15 estaciones climatológicas analizadas. También, sigue siendo una buena alternativa el método convencional de relación normalizada, ya que no necesita el uso de programación para su uso. Asimismo, CHIRPS representa una alternativa útil cuando los registros observados son insuficientes, aunque su desempeño depende de las características de cada estación.

Literatura citada

Alejo-Sanchez, L. E., Márquez-Grajales, A., Salas-Martínez, F., Franco-Arcega, A., López-Morales, V., Acevedo-Sandoval, O. A., González-Ramírez, C. A. y Villegas-Vega, R. (2025). Missing data imputation of climate time series: A review. *MethodsX*, *15*. https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103455

Campos-Aranda, D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. *UASLP. San Luis Potosí, México*, 20. https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3331

Cespedes, J. M. N., Anguiano, J. H. H., Concepción, P. C. A., Martínez, J. L. M., Aguilera, G. C. y Padilla, F. (2023). A comparison of missing value imputation methods applied to daily precipitation in a semi-arid and a humid region of Mexico. *Atmósfera*, *37*, 33–52. https://doi.org/10.20937/ATM.53095

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2023). *Estadísticas del Agua en México 2023*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO]. (2023). *Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

Coulibaly, P. y Evora, N. D. (2007). Comparison of neural network methods for infilling missing daily weather records. *Journal of Hydrology*, *341*(1–2), 27–41. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2007.04.020

Esquivel-Arriaga, G., Huber-Sannwald, E., Reyes-Gómez, V. M., Bravo-Peña, L. C., Dávila-Ortiz, R., Martínez-Tagüeña, N. y Velázquez-Zapata, J. A. (2024). Performance Evaluation of Global Precipitation Datasets in Northern Mexico Drylands. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *63*(12), 1545–1558. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-23-0227.1

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A. y Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, *2*(1), 150066-. https://doi.org/10.1038/SDATA.2015.66;SUBJMETA

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. y Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, *202*, 18–27. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.06.031

Gutiérrez A., R. M. (2020). *Reconstrucción de series de precipitación del estado de Oaxaca usando redes neuronales artificiales* [Universidad Tecnológica de la Mixteca]. http://repositorio.utm.mx:8080/jspui/handle/123456789/300

Hırca, T. y Eryılmaz Türkkan, G. (2024). Assessment of Different Methods for Estimation of Missing Rainfall Data. *Water Resources Management 2024 38:15*, *38*(15), 5945–5972. https://doi.org/10.1007/S11269-024-03936-3

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2024). *Aspectos geográficos de Ciudad de México: comprendio 2022*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463912972.pdf

Kidd, C. y Huffman, G. (2011). Global precipitation measurement. *Meteorological Applications*, *18*(3), 334–353. https://doi.org/10.1002/MET.284;SUBPAGE:STRING:FULL

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N. y Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, *58*(6), 1763–1785. https://doi.org/10.13031/TRANS.58.10715

Peñaranda-Vélez, V. M., Quintanar, A. I., Ochoa-Moya, C. A. y Vivoni, E. R. (2024). An Approach for Modeling the Orographic–Forcing Effect via Random Cascades and the Long-Term Statistics of Mexico City's Daily Precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *129*(12), e2023JD040023. https://doi.org/10.1029/2023JD040023

Tovar C., R., Villanueva H., H. y Jaramillo E., J. V. (2024). La variabilidad espacial de la precipitación en México. Gradientes altitudinales basados en la red de estaciones meteorológicas. *Ciencia, Ambiente y Clima*, *7*(1), 9–29. https://doi.org/10.22206/CAC.2024.V7I1.3125

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Altura de Flotación

Guillermo Becerra Córdova[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

En los cursos de física, la hidrostática es parte esencial para explicar el comportamiento de un fluido en reposo. Dentro de la hidrostática se contempla el principio de Arquímedes, y la flotación de un cuerpo se explica por dicho principio. En este trabajo se presenta un sistema que calcula y simula la profundidad que a la que se sumergirá un determinado cuerpo dependiendo de su geometría y de las densidades, tanto del líquido como del cuerpo. Esta simulación incluye cuerpos como paralelepípedos, cilindros, esferas, trapecios, etc. Dependiendo de la geometría del cuerpo, serán las variables que requiera el sistema para conocer la profundidad a la que se sumerjan. Por ser un cuerpo cuyas paredes son verticales, el paralelepípedo requiere como datos sólo la altura del cuerpo, además de su densidad y la del líquido. Cuerpos con esta geometría no presentan mucha dificultad para calcular la profundidad a la que se sumerjan ya que es proporcional al cociente de la densidad del cuerpo y la del líquido. En consecuencia, con sólo conocer la altura del cuerpo, al multiplicarlo por el cociente de las densidades, se podrá conocer la profundidad a la que se sumerja. Para cuerpos con otra geometría, con paredes no completamente verticales, la profundidad a la que se sumerjan no será proporcional al cociente de las densidades. De esta forma, se deducen ecuaciones cuyos métodos de solución son más complicados. En este trabajo se muestran sus soluciones y la simulación que muestra la profundidad a la que se sumerjan.

Palabras Clave: Hidrostática, Arquímedes, flotación, profundidad, densidad.

Abstract

In physics courses, hydrostatics is essential for explaining the behavior of a fluid at rest. Archimedes' principle falls within the scope of hydrostatics, and the buoyancy of an object is explained by this principle. This paper presents a system that calculates and simulates the submersion depth of a given object based on its geometry and the densities of both the object and the liquid. The simulation covers shapes such as rectangular prisms, cylinders, spheres, and trapezoids. The variables required by the system to determine the submersion depth depend on the object's geometry. For a rectangular prism—an object with vertical walls—the only required data are the object's height, along with its density and that of the liquid. Calculating the submersion depth for objects with this geometry is straightforward, as the depth is proportional to the ratio of the object's density to the liquid's density. Consequently, simply multiplying the object's height by this density ratio yields the submersion depth. For objects with other geometries—specifically those lacking completely vertical walls—the submersion depth is not proportional to the density ratio. This necessitates the derivation of equations that require more complex solution methods.

[1] Universidad Autónoma Chapingo, Preparatoria Agrícola, Área de Física; Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230,gbecerrac@chapingo.mx

This paper presents these equations and a simulation demonstrating the resulting submersion depths.

Keywords: Hydrostatics, Archimedes, buoyancy, depth, density.

Introducción

Llamamos fluido a toda aquella sustancia que no ofrezca resistencia a cambiar de forma. Las partículas que forman los fluidos pueden cambiar de posición fácilmente y esto es lo que les da la propiedad que tienen los fluidos. Por esta misma razón un fluido adopta la forma de cualquier superficie sólida con la que se ponga en contacto. Los fluidos pueden ser clasificados en líquidos y gases. Los líquidos poseen un volumen definido; los gases ocupan todo el volumen del recipiente que los contiene. Los líquidos son incompresibles, es decir, permanece constante su volumen. Los gases, por el contrario, pueden ser reducidos a volúmenes menores o mayores, es decir, son compresibles. Sin embargo, en la naturaleza no existen líquidos perfectos ya que no son del todo incompresibles. Para fines prácticos esa compresibilidad se desprecia ya que no introduce un error grande en problemas relacionados con los líquidos (Beltrán y Braun, 1975).

Principio de Arquímedes

Un cuerpo al estar sumergido en un líquido experimenta una aparente pérdida de peso. Es decir, un objeto sumergido en un líquido puede ser levantado mucho más fácilmente que cuando está fuera de él. Esto se debe a que cuando el objeto está sumergido, el líquido ejerce una fuerza hacia arriba. Esta fuerza debida al fluido se llama Empuje.

Si el peso del objeto es mayor que el empuje, el objeto se hundirá. Si el peso es igual al empuje, el objeto permanecerá en el mismo nivel. Si el peso es menor que el empuje, el objeto flotará. La relación entre el Empuje y el peso del líquido desplazado fue descubierta por el filósofo griego Arquímedes y establece que (Hewitt, 1995):

"El empuje es igual al peso del fluido desplazado por el cuerpo que se encuentra inmerso en él"

Este principio es válido para líquidos y para gases, que son los que constituyen los fluidos. El peso de un fluido depende, entre otros factores, de su densidad. La densidad es el cociente de la masa de un cuerpo entre el volumen que ocupa. La densidad es un parámetro que indica si un cuerpo puede flotar en un determinado fluido. Si un cuerpo es más denso que el fluido en el que está inmerso, el objeto se hundirá. Si un objeto es menos denso que el fluido en el que está inmerso, el objeto flotará. Si ambas densidades son iguales, el objeto se hundirá a cualquier profundidad (Buche, 1990). Cuando un objeto flota en un determinado líquido, la masa del objeto debe ser igual a la masa del líquido desplazado y cuando el objeto se encuentra totalmente sumergido en un fluido, ambos volúmenes, tanto del objeto como del fluido desplazado, serán iguales. En este caso, el peso del objeto debe ser mayor o igual que el empuje. Cuando el peso del objeto es mayor que el empuje, aparece el peso aparente, que es el peso del cuerpo dentro del fluido. Así, el peso aparente es diferente de cero cuando la densidad del cuerpo es mayor que la densidad del fluido.

Un conocimiento de la forma y dimensiones del cuerpo bajo el líquido hace posible la expresión del volumen del líquido desplazado en términos de la profundidad a la que se sumerge un cuerpo. El caso más simple es el de un cuerpo que tenga la forma de un paralelepípedo recto flotando con su base horizontal y lados verticales. Un paralelepípedo con estas características puede ser representado por una caja o una campana neumática cuya altura vertical tiene un valor

h y una densidad ρ_C que se encuentra colocado en un líquido de densidad ρ_L, flotará a una profundidad x igual a:

$$x = \left(\frac{\rho_C}{\rho_L}\right) h \tag{1}$$

Para este cuerpo, la profundidad x a la que se sumerja el paralelepípedo es proporcional a la densidad del cuerpo e inversamente proporcional a la densidad del líquido. Esto significa que mientras mayor sea la densidad del cuerpo, más se va a sumergir. Equivalentemente, si la densidad del cuerpo es pequeña, se sumergirá muy poco. Para el caso de la densidad del líquido, el cuerpo se sumergirá muy poco si la densidad del líquido es grande y se sumergirá mucho si la densidad del líquido es pequeña. Debemos recordar que para que flote un cuerpo en un determinado líquido, es necesario que la densidad total del cuerpo deba ser menor que la densidad del líquido. La densidad total de un cuerpo se refiere a la suma de las masas que lo constituyen entre el volumen que ocupa. De esta forma, el cuerpo puede ser sólido o estar hueco pero su densidad debe ser menor que la densidad del líquido para que se encuentre a flote. La figura 1 muestra un paralelepípedo que se encuentra flotando en un determinado líquido.

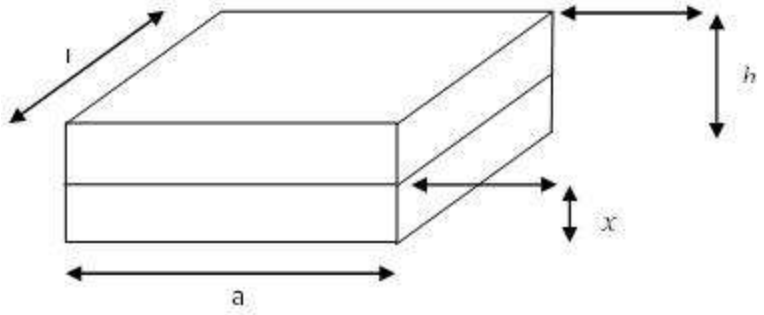


Figura 1. Paralelepípedo.

Observe que el lado a de la base debe encontrarse horizontalmente. Para ello, los lados de la base deben ser mayores que el espesor h del paralelepípedo.

Para un cuerpo que no tenga base horizontal y lados verticales, la profundidad no será proporcional a la densidad del cuerpo ni inversamente proporcional a la densidad del líquido. Es por ello que, para cuerpos con una forma diferente, es necesario expresar primeramente el volumen de la parte del cuerpo que se encuentra sumergida en función de su profundidad. Una vez que se encuentre la expresión del volumen del cuerpo que se encuentre sumergido en función de la profundidad, se debe utilizar el principio de Arquímedes para igualar el peso del cuerpo con el peso del líquido desalojado para el caso en que el cuerpo flote. Como el peso de los cuerpos depende de la gravedad y es la misma para el cuerpo que flota y el líquido en el cual flota, se puede eliminar de ambas gravedades. Así, para un cuerpo que flote, la masa del cuerpo debe ser igual a la masa del líquido que se desplaza al colocarlo en el líquido. Pero, para conocer la masa de un cuerpo, se debe conocer su volumen y su densidad respectiva. Así, el producto del volumen del cuerpo multiplicado por su densidad debe ser igual al volumen del líquido que se desplaza por su densidad. En consecuencia, matemáticamente este hecho se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$V_L \rho_L = V_c \, \rho_c \tag{2}$$

Equivalentemente:

$$V_L \, \rho_L - V_c \, \rho_c \; = 0 \tag{3}$$

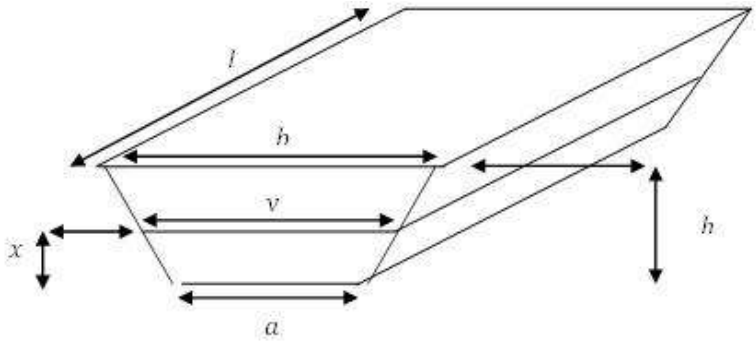


Figura 2. Trapecio.

Apliquemos este razonamiento a un cuerpo cuya sección transversal sea igual a un trapecio. La figura 2 muestra un cuerpo con estas características.

Así, el volumen del líquido desplazado es igual a:

$$V_L = \left(\frac{a+y}{2}\right)x \tag{4}$$

De la figura también se observa que:

$$\frac{y-a}{x} = \frac{b-a}{h} \tag{5}$$

Despejando y de la ecuación anterior, se tiene:

$$y = \frac{(b-a)\,x}{h} + a \tag{6}$$

Sustituyendo en la ecuación 4 para el volumen del líquido desplazado, tenemos:

$$V_L = \left(\frac{a+\frac{(b-a)\,x}{h}+a}{2}\right)x \tag{7}$$

Simplificando:

$$\frac{(b-a)\,x^2+2\,a\,h\,x}{2h} \tag{8}$$

Que corresponde al volumen del líquido desalojado en función de la profundidad a la que se sumerja el cuerpo.
Al aplicar el principio de Arquímedes, debemos decir que el volumen del líquido desplazado multiplicado por su densidad menos el volumen del cuerpo multiplicado por su densidad debe ser igual a cero, es decir:

$$\left(\frac{(b-a)\,x^2+2ahx}{2h}\right)\rho_L - \left(\frac{b+a}{2}\right)h\rho_c = 0 \tag{9}$$

Simplificando, se obtiene:

$$(b-a)\rho_L x^2 + 2ah\rho_L x - (b+a)h^2\rho_c = 0 \tag{10}$$

Lo que corresponde con una ecuación de segundo grado cuya solución es:

$$x = \left(\frac{-a\rho_L + \sqrt{a^2\rho_L^2 + (b^2 - a^2)\rho_L\rho_c}}{(b-a)\rho_L} \right) h \tag{11}$$

Con esta expresión se puede calcular la profundidad con la que se hundirá un cuerpo cuya sección transversal corresponde con un trapecio, con sólo conocer los lados horizontales del trapecio, su altura y la densidad del líquido y del cuerpo. Observe que se ha tomado el signo positivo de la raíz para que el cociente sea positivo. En consecuencia, no debemos tomar el signo negativo de la raíz porque no existen profundidades negativas. Observe también que la profundidad con la que se sumerge el cuerpo debe encontrarse entre 0 y h que es la altura del cuerpo. Si la profundidad con la que se sumerge es mayo a h, entonces la densidad del cuerpo sería mayor que la densidad del líquido. El sistema está diseñado para densidades del cuerpo menores a la del líquido en el cual se encuentra.

A continuación, se deducirá la expresión que calcula la profundidad con la que se sumergirá una esfera, dada su densidad y la densidad del líquido en el cual flota.

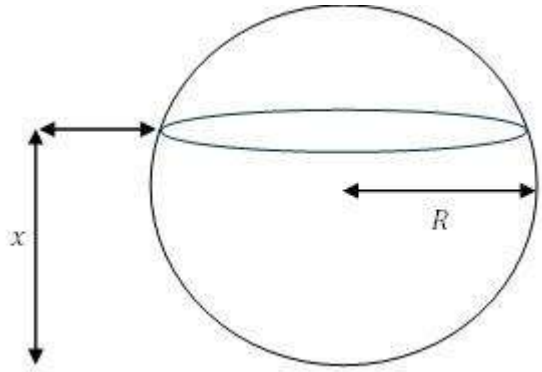


Figura 3. Esfera.

Para deducir esta expresión, debemos establecer la ecuación de un semicírculo cuyo centro se encuentre a una distancia R del origen del sistema de referencia. La figura 4 muestra este semicírculo.

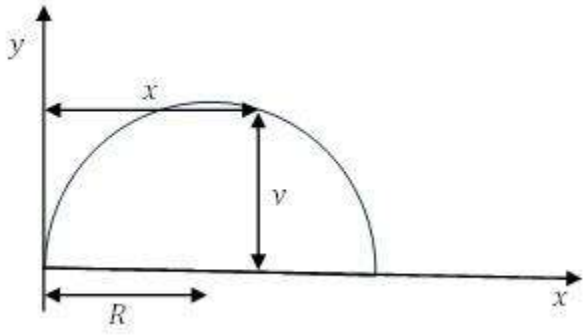


Figura 4. Altura y del círculo en función de x.

La ecuación que corresponde con el semicírculo se expresa como:

$$y = \sqrt{R^2 - (x - R)^2} \tag{12}$$

Que correspondería con la altura y del semicírculo en función de la posición x. Si se hiciese rotar ese semicírculo se formaría una esfera cuyo centro coincidiría con R. Por lo tanto, el producto de π por el radio al cuadrado expresado en la ecuación anterior, correspondería con el área del círculo para cada valor de x. Integrando las áreas para cada valor de x, se obtendría el volumen de la esfera cuyo radio es R. De esta forma, la integral que se obtiene se muestra en la siguiente ecuación:

$$V_{Esfera} = \int_0^x \pi(R^2 - (x-R)^2)dx = \pi(Rx^2 - \frac{x^3}{3}) \quad (13)$$

Esta ecuación relaciona el volumen de una esfera en función de la altura x. Si $x = 0$, entonces el volumen de la esfera sería igual a cero. Si $x = R$, entonces el volumen de la esfera correspondería con $V_{Esfera} = 2\pi R^3/3$. Finalmente, si el valor de $x = 2R$, entonces el valor del volumen de la esfera sería igual a $V_{Esfera} = 4\pi R^3/3$. Estos casos nos ilustran que la ecuación del volumen de una esfera en función de su altura x, es correcta.
Aplicando el Principio de Arquímedes, vemos que el volumen del líquido desalojado en función de la profundidad x a la que se sumerge, multiplicado por la densidad del líquido en el cual flota menos el volumen de la esfera multiplicado por la densidad del cuerpo, debe ser igual a cero. Esto es debido a que cuando flota un cuerpo, su masa es igual a la masa del líquido desplazado. Matemáticamente se tiene:

$$\rho_L x^3 - 3R\rho_L x^2 + 4R^3\,\rho_C = 0 \quad (14)$$

Por lo que se obtiene una ecuación de tercer grado, cuya solución en términos de funciones trigonométricas es:

$$x = R\left[1 + 2Cos\left(\frac{ArcCos\left(1-2\frac{\rho_C}{\rho_L}\right)}{3} - \frac{2\pi k}{3}\right)\right] \quad (15)$$

Con: $k = 0, 1, 2$

En consecuencia, para algún valor de k, el valor de x se encontrará entre 0 y $2R$. Una de las soluciones restantes es negativa y la otra es mayor que $2R$. Debemos decir que las soluciones, para este tipo de ecuaciones, son reales, y sólo una de ellas es la que corresponde con la profundidad a la que se sumerge la esfera. Estas soluciones son reales debido a que la ecuación de tercer grado proviene de un principio físico. Si fuera una ecuación que no tuviera como fundamento un principio físico, es posible que las soluciones tengan términos complejos. Si queremos ver que esta ecuación se cumple para ciertos casos particulares, debemos dar valores a las densidades y al radio de la esfera. Por ejemplo, supongamos que la densidad del cuerpo es muy pequeña en comparación con la densidad del líquido y que el radio de la esfera es de 1 centímetro. Bajo estas suposiciones, el término $2\rho_c/\rho_L$ se podría despreciar y, en consecuencia, se tendría: para $k = 0$, $x_1 = 3\,m$; para $k = 1$, $x_2 = 0\,m$ y para para $k = 2$, $x_2 = 0\,m$. Vemos que, para este caso, hay dos soluciones que corresponden con el resultado esperado en el cual la esfera no se sumerge por que se consideró su densidad muy cercana a cero. Si suponemos ahora que ambas densidades son iguales, entonces se tiene: para $k = 0$, $x_1 = 2\,m$; para $k = 1$, $x_2 = 2\,m$ y para para $k = 2$, $x_2 = -1\,m$. Vemos que las dos primeras soluciones corresponden con el resultado físico ya que si ambas densidades son iguales la esfera se hundiría completamente. Finalmente, supongamos que la densidad del cuerpo es igual a la mitad de la densidad del líquido. En esta situación se tiene: para $k = 0$, $x_1 = 2.73\,m$; para $k = 1$, $x_2 = 1\,m$ y para para $k = 2$, $x_2 = -0.73\,m$. Vemos que el único resultado viable es el de x_2 ya que

los otros resultados no corresponden con la realidad debido a que uno es mayor que el diámetro de la esfera y el otro asume un valor negativo. De esta forma, la profundidad a la que flotará una esfera estará en función de su radio y de las densidades tanto del cuerpo como del líquido. El siguiente cuerpo corresponde con un cilindro de radio R y longitud h. La figura 5 muestra un cuerpo similar a un cilindro.

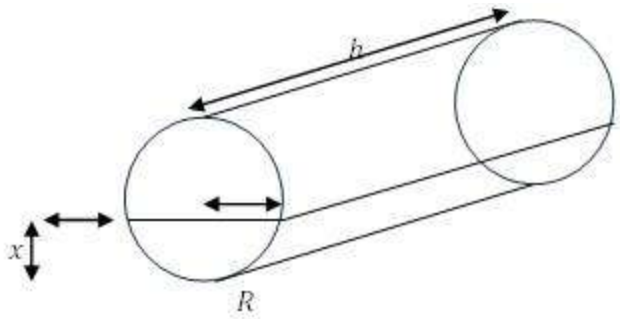


Figura 5. Cilindro.

Para deducir el área de la parte del cilindro que se sumerge en función de la profundidad x, hagamos uso de la siguiente figura.

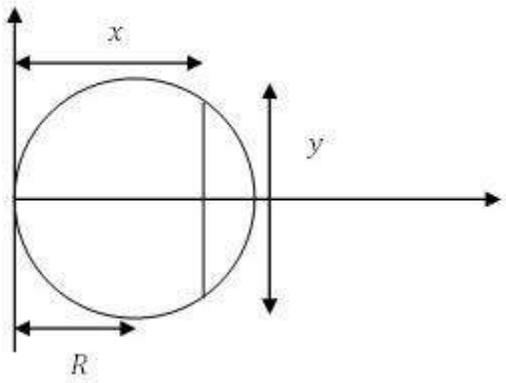


Figura 6. Longitud y en función de x.

El diámetro del círculo mostrado en la figura 6 viene expresado en la siguiente ecuación:

$$y = 2\sqrt{R^2 - (x - R)^2} \tag{16}$$

En consecuencia, el área de una pequeña franja alrededor de y es igual a:

$$dA = y\,dx = 2\sqrt{R^2 - (x - R)^2}\,dx \tag{17}$$

E integrando de 0 a x la ecuación 17, se tiene:

$$A(x) = \int_0^x 2\sqrt{R^2 - (x - R)^2}\,dx = (x - R)\sqrt{R^2 - (x - R)^2} + R^2 ArcSen\left(\frac{x-R}{R}\right) + \frac{\pi R^2}{2} \tag{18}$$

Que corresponde al área del círculo que se sumerge en función de x. Vemos en la ecuación que si $x = 0$, entonces el área también sería igual a cero. Si $x = R$, vemos que el área es igual a $A = \pi R^2/2$. Finalmente, si $x = 2R$, entonces $A = \pi R^2$. Con estos resultados podemos darnos cuenta de que la ecuación del área en función de x coincide con los resultados esperados.

Si queremos saber el volumen del cilindro en función de x, sólo debemos multiplicar la ecuación anterior por h que es su longitud. De esta forma, se tiene:

$$V(x) = \left[(x-R)\sqrt{R^2-(x-R)^2} + R^2 ArcSen\left(\frac{x-R}{R}\right) + \pi R^2/2\right] h \qquad (19)$$

Que corresponde con el volumen del cilindro sumergido en un líquido. Aplicando el Principio de Arquímedes, se tiene que:

$$\left[(x-R)\sqrt{R^2-(x-R)^2} + R^2 ArcSen\left(\frac{x-R}{R}\right) + \pi R^2/2\right] h\rho_L - \pi R^2 h\rho_c = 0 \qquad (20)$$

Para saber la profundidad con la que se sumerge el cilindro, se debe conocer el radio de la circunferencia al igual que la densidad del cuerpo y la del líquido. Con estos datos se procede a despejar el valor de la profundidad x. Sin embargo, vemos en la ecuación que la profundidad es casi imposible de despejar. En estos casos lo que se hace es pasar al lado derecho el término que no depende de la profundidad, es decir:

$$\left[(x-R)\sqrt{R^2-(x-R)^2} + R^2 ArcSen\left(\frac{x-R}{R}\right) + \pi R^2/2\right] \rho_L = \pi R^2 \rho_c \qquad (21)$$

Debido a que es prácticamente imposible despejar el valor de la profundidad, lo que se hace es darle valores a x y sustituirlo en la ecuación anterior. Cuando el valor del término de la izquierda se asemeja con el término de la derecha, entonces el valor de x correspondería con la profundidad con la que se sumergiría el cilindro. Es importante decir que mientras más pequeño sea el incremento del valor de x, la aproximación al término constante sería mayor. Se recomienda que el valor de x se incremente en centésimas del valor de R y establecer un criterio de diferencia entre ambos términos.

Como siguiente ejemplo, tomaremos el cuerpo que se presenta en la figura 7. Este cuerpo es la unión de un trapecio y un paralelepípedo. De esta forma, se van a tener dos casos en los cuales se sumerja el cuerpo. Uno de ellos corresponde al caso en el que el cuerpo se sumerja en la parte del trapecio y el otro caso corresponde a la situación en la que se sumerja más arriba de la parte del trapecio. Cuando no rebase el área del trapecio, se puede decir que la densidad del cuerpo es muy pequeña en relación con la densidad del líquido. En el otro caso, se puede afirmar que la densidad del cuerpo y la del líquido no difieren mucho.

Para el primer caso se tiene que el volumen del líquido desplazado es igual a:

$$\left[\frac{(b-a)\rho_L x^2 + 2ahx}{2h}\right] l \qquad (22)$$

Y el volumen total del cuerpo es igual a:

$$\left(\frac{a+b}{2}\right) h\, l + d\, b\, l \qquad (23)$$

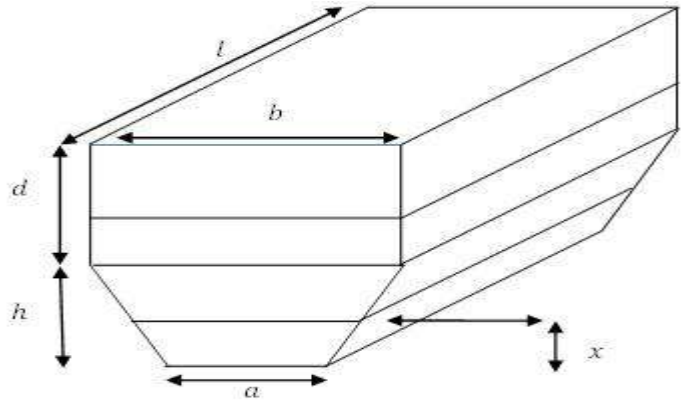


Figura 7. Profundidad a la que se hunde en la zona del trapecio.

Aplicando el Principio de Arquímedes, se tiene:

$$\left[\frac{(b-a)x^2+2ahx}{2h}\right] l\,\rho_L - \left[\left(\frac{a+b}{2}\right)h + d\,b\right] l\,\rho_c = 0 \tag{24}$$

Simplificando:

$$(b-a)\rho_L x^2 + 2ah\rho_L x - (b+a)h^2\rho_c - 2hdb\rho_c = 0 \tag{25}$$

Esta expresión corresponde con una ecuación de segundo grado, cuya solución es:

$$x = \frac{-a\rho_L h + \sqrt{a^2h^2\rho_L^2 + (b^2-a^2)h^2\rho_L\rho_c + 2(b-a)hdb\rho_L\rho_c}}{(b-a)\rho_L} \tag{26}$$

Se tomó el signo positivo de la raíz para garantizar que el resultado sea positivo ya que la profundidad a la que se sumerja el cuerpo no puede ser negativa. Observe también que este resultado no depende de la longitud l del cuerpo.
La siguiente figura muestra el caso en el cual el cuerpo se sumerja a mayor profundidad que la altura del trapecio.

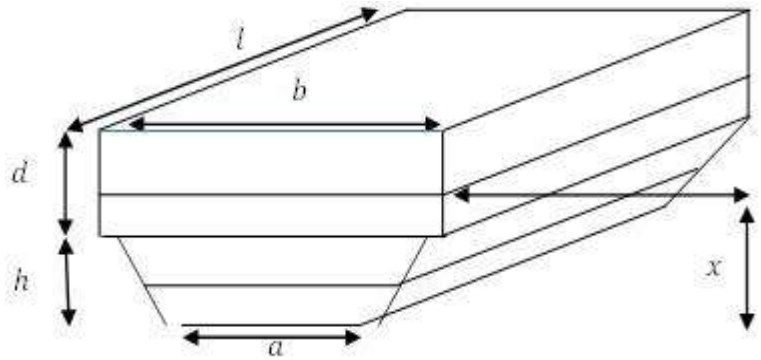


Figura 8. Profundidad a la que se hunde en la zona del paralelepípedo.

Se tiene que el volumen del cuerpo dentro del líquido es igual a:

$$\left(\frac{b+a}{2}\right) h\,l + (x-h)\,b\,l \tag{27}$$

Y el volumen total del cuerpo es igual a:

$$\left(\frac{b+a}{2}\right) h\, l + d\, b\, l \tag{28}$$

Aplicando el Principio de Arquímedes, se tiene:

$$\left[\left(\frac{b+a}{2}\right) h\, l + (x-h)\, b\, l\right] \rho_L - \left[\left(\frac{b+a}{2}\right) h\, l + d\, b\, l\right] \rho_c = 0 \tag{29}$$

Despejando x, se tiene:

$$x = \frac{(b+a)(\rho_c - \rho_L)h + 2(d\,\rho_c + h\,\rho_L)b}{2\, b\, \rho_L} \tag{30}$$

Para que el cuerpo se sumerja más abajo de la parte del paralelepípedo, la densidad del cuerpo debe ser mayor que:

$$\rho_c \geq \frac{(b+a)\, h\, \rho_L}{(b+a)h + 2\, d\, b} \tag{31}$$

Materiales y Métodos

El programa con el que se desarrolló el sistema fue Visual Basic Studio 12. Las variables que se utilizan dependen de la geometría de cada cuerpo. Para activar una simulación se deben introducir los valores de las variables correspondientes con cada tipo de cuerpo. La simulación calculará y mostrará la profundidad a la que se sumerja un cuerpo. Cuando teóricamente la densidad del cuerpo es igual a cero, el cuerpo se encontrará flotando completamente y si las densidades del cuerpo y del líquido son iguales, el cuerpo estará sumergido completamente. Para densidades del cuerpo entre cero y la del líquido, el cuerpo se sumergirá parcialmente. El porcentaje del volumen que se sumerja un cuerpo sólo dependerá del cociente de las densidades multiplicado por el 100%, independientemente de la forma del cuerpo.

Resultados y discusión

La figura siguiente muestra la ventana principal del sistema. En ella se muestran los botones **Continuar** y **Salir**.



Figura 9. Ventana principal del sistema.

Si se hace clic en el botón **Salir**, se desactivará el sistema o se saldrá de él. En el caso en que se haga clic en el botón **Continuar**, aparecerá una ventana como la mostrada en la figura 10. Observe en la figura que se muestran 5 tipos diferentes de geometrías.

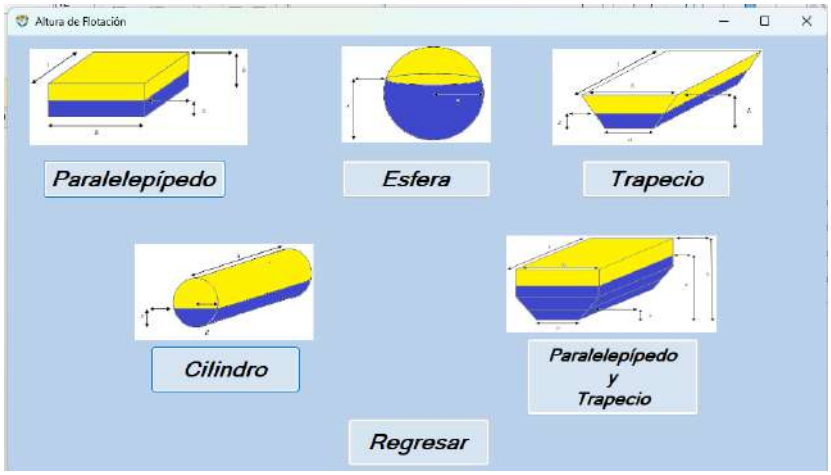


Figura 10. Menú de cuerpos con diferente geometría.

La primera de ellas corresponde con un paralelepípedo cuyas paredes son verticales.

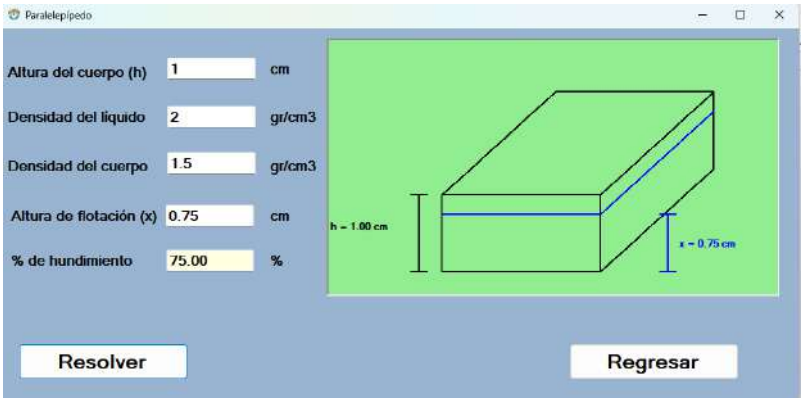


Figura 11. Profundidad a la que se sumerge un paralelepípedo.

Esta geometría corresponde con el caso más sencillo para el cálculo de la profundidad.
La siguiente figura corresponde con una esfera. Por ser un cuerpo cuya sección transversal no es constante, corresponde con una ecuación de tercer grado para el cálculo de la profundidad.

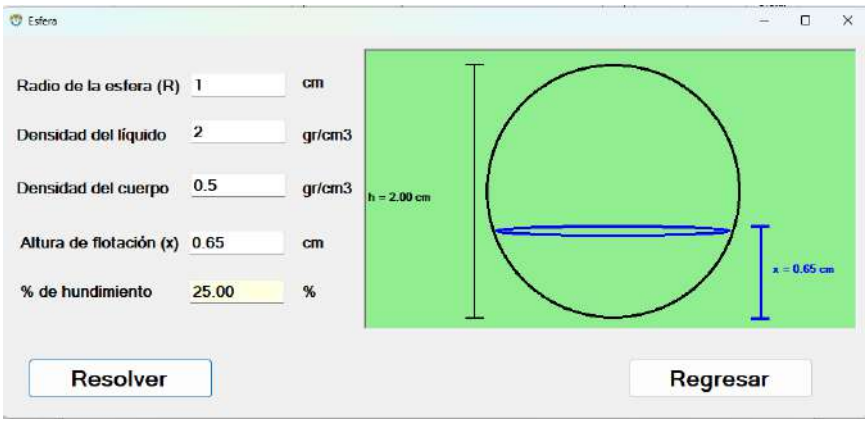


Figura 12. Profundidad a la que se sumerge una esfera.

Como se mencionó anteriormente, las soluciones de esta ecuación son reales, siendo solo una de estas soluciones el valor de la profundidad a la que se hundirá la esfera. Esta solución se

identifica suponiendo que el valor de la profundidad se encuentra entre 0 y el doble del radio de la esfera. El resto de las soluciones de la ecuación de tercer grado, no se encuentran dentro de este intervalo a pesar de ser reales.

La siguiente figura corresponde con un cuerpo cuya sección transversal es un trapecio. La ecuación que se deduce para este cuerpo es una ecuación de segundo grado. La parte positiva es la profundidad a la que se hundirá el objeto.

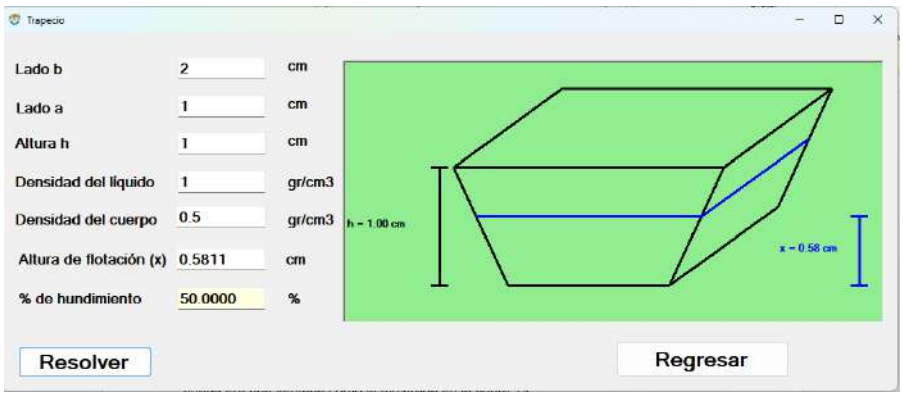


Figura 13. Profundidad a la que se sumerge un trapecio.

La siguiente figura corresponde con un cilindro cuya ecuación incluye términos trigonométricos por lo que es prácticamente imposible despejar la profundidad. Para saber su valor, lo que se hace es colocar los términos que contienen la profundidad en la parte izquierda de la igualdad y en la derecha los términos constantes. Así, se procede a dar valores a la profundidad hasta que coincida o se aproxime mucho el término de la derecha con el de la izquierda. Como los incrementos de la profundidad son discretos, no necesariamente van a coincidir siempre ambos términos. En estos casos, lo que se hace es encontrar la mínima diferencia entre ellos.

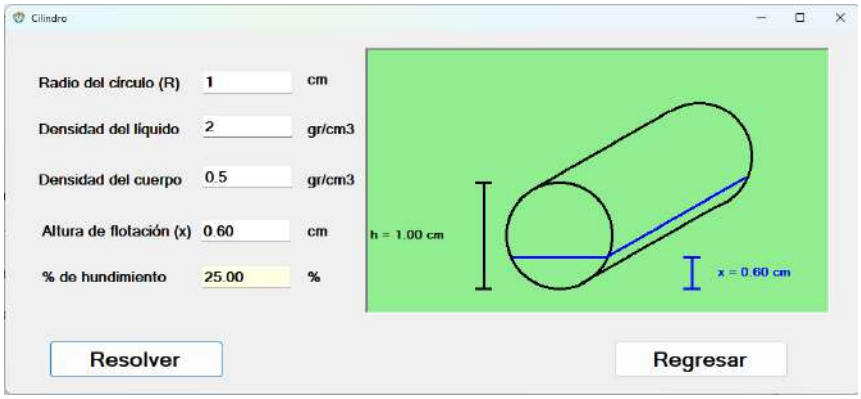


Figura 14. Profundidad a la que se sumerge un cilindro.

Finalmente, se presenta un cuerpo constituido por un paralelepípedo y un trapecio. En esta situación puede suceder que el cuerpo sólo se sumerja no más que la parte del trapecio y en la otra que se sumerja más arriba de la parte del trapecio.

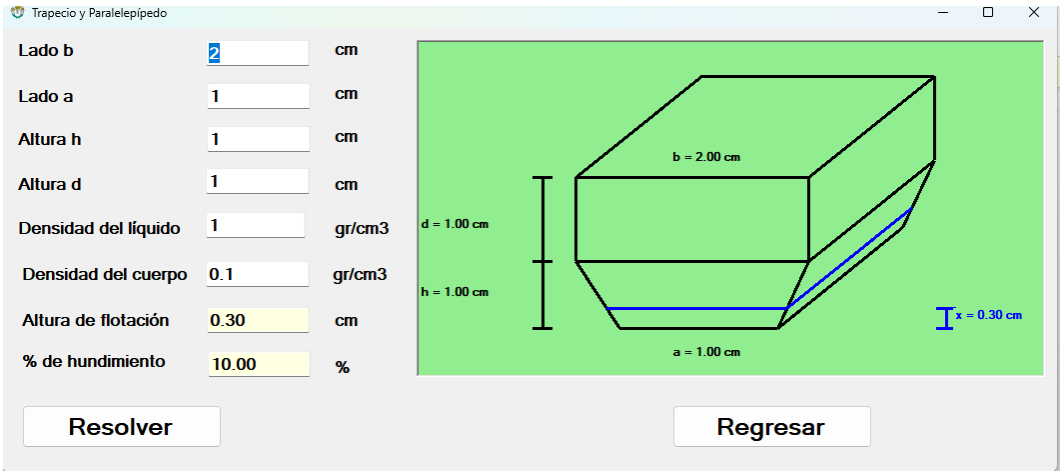


Figura 15. Profundidad a la que se sumerge una combinación de trapecio con paralelepípedo.

Como primer ejemplo, consideremos la figura correspondiente con el paralelepípedo. Al hacer clic sobre el botón de esta figura, aparecerá una ventana como la mostrada en la figura 11. Observe en la figura que se tienen que introducir los valores de la altura del cuerpo, así como la densidad del líquido y la del cuerpo. Con estos datos el sistema calculará la profundidad a la que se sumerja el cuerpo. De igual forma, calculará el porcentaje del cuerpo que se encuentre sumergido. En la figura se observa que la altura del paralelepípedo corresponde con 1 centímetro, la densidad del líquido con 2 gr/cm^3 y la del cuerpo con 1.5 gr/cm^3. Con estos datos observamos que la profundidad con la que se sumergirá el cuerpo es de 0.75 cm y un 75% se encontrará bajo el líquido.

Ahora consideremos el caso de una esfera. Al hacer clic sobre el botón relacionado con la esfera, aparecerá una ventana como la mostrada en la figura 12.

En la figura se observa un ejemplo predeterminado en la que en el radio de la esfera es de 1 cm, la densidad del líquido es de 2 gr/cm^3 y la del cuerpo es de 0.5 gr/cm^3. En esta situación se observa que la profundidad a la que se sumerge la esfera no es igual a la mitad del radio de la esfera, sino que es igual a 0.65 cm debido a que la pareces del cuerpo no son verticales. Sin embargo, el porcentaje del cuerpo que se sumerge sí corresponde a la cuarta parte del volumen total de la esfera ya que esa es la proporción entre las densidades.

Consideremos ahora el caso de un cuerpo cuya sección transversal tiene forma de un trapecio. Al hacer clic sobre el botón relacionado con el cuerpo similar a un trapecio, aparecerá una ventana como la mostrada en la figura 13.

En la figura 13 se observa un ejemplo predeterminado en la que el valor de b=2 cm, el valor de a=1 cm, la altura es igual a h=1 cm, la densidad del líquido es igual a1 gr/cm^3 y la densidad del cuerpo es de 0.5 gr/cm^3. Para estos datos, la profundidad a la que se hundirá el trapecio es de 0.5811 cm y se sumergirá el 50% del volumen del cuerpo. Observe que la profundidad a la que se sumerja el cuerpo no corresponde con la mitad de la altura del trapecio ya que sus paredes no son verticales. Lo que sí se puede afirmar es que la mitad del cuerpo se encuentra sumergida y la otra está a flote.

Como siguiente caso, consideremos un cuerpo en forma de cilindro. Con sólo conocer el radio del cilindro, la densidad del líquido y la del cuerpo, se podrá conocer la profundidad a la que se sumerja. La figura 14 muestra un caso particular de un cilindro. Observe en la figura que, si el radio del círculo es de 1 cm, la densidad del líquido es de 2 gr/cm^3 y la del cuerpo de 0.5 gr/cm^3. La profundidad a la que se sumerja el cuerpo es 0.6 cm y el porcentaje del cuerpo sumergido corresponde con el 25%.

El siguiente caso corresponde a un cuerpo que está formado por la unión de un trapecio y un

paralelepípedo. En este caso existen dos profundidades a las que se sumerja el cuerpo: una de ellas corresponde a la parte del trapecio y la otra a la parte del paralelepípedo. Dependiendo de las dimensiones del cuerpo y de las densidades del líquido y del cuerpo, ocurrirá cualquiera de los dos casos. La desigualdad 31 nos dice cuándo el cuerpo se sumergirá hasta la parte del paralelepípedo. Supongamos que el lado b tiene un valor de 2 cm, el lado a, 1 cm, la altura h es igual a 1 cm, la altura d es igual a 1 cm y las densidades del líquido y del cuerpo son 1 y 0.1 gr/cm^3. La figura 15 muestra esta situación.

Conclusiones

Para cada cuerpo se tienen diferentes ecuaciones para calcular la profundidad a la que se sumerjan en un determinado líquido. Estas ecuaciones dependen de la geometría de cada cuerpo y de las densidades del líquido y del cuerpo.
Para deducir las ecuaciones que calculan la profundidad con la que se sumergirán los cuerpos, es necesario conocer las ecuaciones de relacionadas con la forma de cada uno de los cuerpos.
Como se dijo, la profundidad con la que se sumerja un paralelepípedo es proporcional al cociente de la densidad del cuerpo entre la densidad del líquido.
A diferencia de la profundidad a la que se hunda un cuerpo, el porcentaje al que se sumerja depende sólo del cociente de la densidad del cuerpo entre la densidad del líquido, independientemente de la forma del cuerpo.
Para cada cuerpo que se analiza en este trabajo, las simulaciones muestran gráficamente la profundidad a la que se sumerjan. Esto crea una comunicación gráfica que busca aumentar los diferentes estilos de aprendizaje.
Un aspecto importante de la profundidad a la que se sumerja un cuerpo es que pueden usarse recipientes similares a los que se tratan en la simulación para comprobar que los resultados coinciden.
Para el caso de la ecuación que calcula la profundidad a la que se sumerja una esfera, se tiene una ecuación de tercer grado cuyas soluciones son reales. Una de ellas es negativa, la otra tiene un valor por encima del doble del radio de la esfera. La última raíz es la que corresponde con la profundidad.
Para el caso de la ecuación que calcula la profundidad a la que se sumerja un cilindro, su valor es prácticamente imposible de despejar. Para calcular la profundidad, se separa la ecuación en dos partes. La parte izquierda de la igualdad tiene los términos que contienen la incógnita y la parte derecha, los términos constantes. El programa hace variar el valor de la profundidad hasta que ambos términos de la igualdad se asemejen.

Literatura citada

Alonso, M. y Finn, E. J. (1976), Física, Volumen I: Mecánica. México, D.F.: Fondo Educativo Interamericano.

Beltrán, V. y Braun, E. (1970), Principios de Física. México, D.F.: Trillas.

Resnick, R. y Halliday, D. (1980), Física. Vol. I. México, D.F.: CECSA.

Serway, R.A. (1985), Física. México, D.F.: Interamericana.

Tipler, P. A. (1995), Física. México, D.F.: Reverté.

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Desarrollo de herramientas web para el diseño hidráulico de sistemas de riego

Ambrosio Ambrosio-Juan Pablo[1*]; González Camacho-Juan Manuel[1]; Ambrosio Ambrosio-Carlos Ulises[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

El diseño hidráulico de sistemas de riego requiere integrar información sobre gasto disponible, presión de operación, características de las tuberías y topografía del terreno. En sistemas de pequeña y mediana escala, el acceso a herramientas especializadas puede limitar a técnicos, estudiantes y productores. El objetivo de este trabajo fue desarrollar herramientas web gratuitas para apoyar el prediseño hidráulico mediante aplicaciones independientes para el dimensionamiento de líneas laterales, tuberías secundarias y principales, así como la estimación de la potencia requerida para el equipo de bombeo.
La metodología incorpora el cálculo de pérdidas de carga mediante la ecuación de Hazen-Williams y factores de salidas múltiples, considerando el gasto, diámetro y pendiente de las tuberías. Como caso de estudio se empleó una huerta de naranja Valencia de 9.88 ha, con 1,504 árboles, abastecida por un pozo con un gasto disponible de 12 L s^{-1}. Los resultados permitieron proponer tres unidades de riego, laterales de polietileno de 16 mm, tuberías secundarias telescopiadas y una línea principal de 100 mm (4 pulgadas). Para la condición crítica se obtuvo un gasto de diseño de 10.52 L s^{-1} y una pérdida de carga de 19.34 m en la línea principal. La potencia requerida fue de 14.77 HP, correspondiente a un equipo comercial de 15 HP. Las herramientas desarrolladas permiten evaluar alternativas de diseño y apoyar la toma de decisiones durante el prediseño sin requerir software especializado.

Palabras clave: riego presurizado; microaspersión; diseño hidráulico; aplicación web; pérdidas de carga.

Abstract

The hydraulic design of irrigation systems requires the integration of information on available flow rate, emitter operating pressure, pipe characteristics, and terrain topography. In small- and medium-scale systems, access to specialized tools may be limited for technicians, students, and farmers. The objective of this study was to develop free web-based tools to support the preliminary hydraulic design of irrigation systems through standalone applications for sizing lateral, secondary, and main pipelines, as well as estimating the power required for pumping equipment. The methodology incorporates head-loss calculations using the Hazen-Williams equation and multiple-outlet factors, considering flow rate, pipe diameter, and slope.

[1]Posgrado en Socioeconomía, Estadística e Informática-Cómputo Aplicado. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C.P. 56264. *ambrosio.juan@colpos.mx; jmgc@colpos.mx,
[2]Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola-Ingeniería Mecatrónica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México – Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56230. ambrosioambrosioulisese0@gmail.com *Autor de correspondencia.

A 9.88-ha Valencia orange orchard with 1,504 trees, supplied by a well with an available flow rate of 12 L s^{-1}, was used as a case study. The results led to the proposed configuration of three irrigation units, 16-mm polyethylene lateral lines, telescoping secondary pipelines, and a 100-mm (4-in) mainline. Under the critical operating condition, a design flow rate of 10.52 L s^{-1} and a head loss of 19.34 m in the mainline were obtained. The estimated power requirement was 14.77 HP, corresponding to a commercial 15-HP pumping unit. The developed tools allow users to evaluate design alternatives and support decision-making during the preliminary design phase without requiring specialized software.

Keywords: pressurized irrigation; micro-sprinkler irrigation; hydraulic design; web-based tools; head losses.

Introducción

El agua constituye uno de los recursos fundamentales para la producción agrícola y la seguridad alimentaria; sin embargo, su disponibilidad se encuentra sometida a una presión creciente debido al incremento de la demanda, la variabilidad climática y la competencia entre diferentes usos. La agricultura continúa siendo el principal usuario del agua dulce a nivel mundial, mientras que una proporción importante de las tierras agrícolas se encuentra en regiones sometidas a estrés hídrico (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2026). En este contexto, mejorar la eficiencia y sostenibilidad del uso del agua en la agricultura representa un desafío prioritario, particularmente para los sistemas productivos de pequeña escala.

El riego permite incrementar la productividad agrícola y reducir la dependencia de la precipitación; no obstante, su eficiencia depende en gran medida de un diseño adecuado de la infraestructura hidráulica. Los sistemas de riego presurizado requieren considerar de manera conjunta las características de la fuente de abastecimiento, las necesidades del cultivo, las condiciones del suelo y topografía, el tipo y espaciamiento de los emisores, los caudales disponibles y las características de las tuberías. Phocaides (2007) señala que el diseño hidráulico de estos sistemas comprende una serie de cálculos interrelacionados que incluyen la selección de emisores, dimensionamiento de laterales, tuberías secundarias y principales, así como la determinación de las pérdidas de carga y requerimientos de presión. En este contexto, se han desarrollado metodologías y herramientas para apoyar el análisis y la gestión de sistemas presurizados, como MASSPRES, propuesta por Lamaddalena et al. (2024).

Actualmente existen herramientas especializadas para el diseño hidráulico de sistemas de riego, como IRRICAD y WCADI (IRRICAD, 2024; RIVULIS, 2025). Sin embargo, su disponibilidad, costo o complejidad pueden limitar su utilización por estudiantes, técnicos y pequeños productores. En contraste, las aplicaciones web permiten ejecutar procedimientos de cálculo directamente desde un navegador y facilitar el acceso a herramientas de apoyo para la toma de decisiones. En este sentido, el presente trabajo propone el desarrollo de una plataforma web modular para el diseño hidráulico de sistemas de riego, mediante herramientas independientes para el dimensionamiento de laterales, tuberías secundarias y principales, además de la estimación del equipo de bombeo. La aplicación se evalúa mediante un caso de estudio correspondiente a una huerta de naranja Valencia ubicada en Tamaulipas, México.

Objetivo

Desarrollar herramientas web para el diseño hidráulico de sistemas de riego, mediante el dimensionamiento de líneas laterales, tuberías secundarias y principales, y la estimación de la potencia del equipo de bombeo

Materiales y Métodos

Tecnologías computacionales empleadas y base de datos

El lenguaje de programación empleado fue JavaScript (MDN Web Docs, 2026), debido a su capacidad para ejecutar aplicaciones interactivas directamente en el navegador. Además, cada herramienta fue desarrollada como una aplicación independiente, lo que permite ejecutar sus cálculos sin depender de las demás aplicaciones. Por ejemplo, la aplicación para el diseño de máxima lateral, no tiene conexión a ninguna base de datos o a otra aplicación, esto permite su funcionamiento incluso cuando otras herramientas tengan errores de despliegue. Adicionalmente, JavaScript tiene una vasta gama de librerías disponibles que permitió implementar las fórmulas hidráulicas y el despliegue de los resultados mediante el uso de elemento HTML.

El desarrollo tecnológico se llevó a cabo de manera modular, esto permitió aislar cada componente, permitiendo el desarrollo simultaneo de herramientas y la reutilización de código de manera eficiente. Para el desarrollo modular de la interfaz se utilizó ReactJS (React, 2026), una biblioteca de JavaScript orientada a la construcción de interfaces de usuario mediante componentes reutilizables. La gestión de las dependencias y librerías se realizó mediante npm (Node Package Manager). El IDE empleado fue Visual Studio Code, debido a su flexibilidad para integrar extensiones que facilitan la codificación en JavaScript. Por ejemplo; identación automática, estilo automático, sugerencia de código, detección de errores, y administración de variables y funciones.

Finalmente, el despliegue de la aplicación se realizó mediante Netlify (Netlify, 2026), una plataforma de servicios para la construcción y publicación de aplicaciones web. Esto permite disponer de una versión accesible mediante un navegador web sin requerir instalación local por parte del usuario.

La base de datos inicial se construyó utilizando especificaciones técnicas de tuberías proporcionadas por fabricantes y distribuidores, complementadas con tablas de conversión de unidades para estandarizar los parámetros utilizados por la aplicación (CRESCO, n.d.; Empresa Mexicana de Manufacturas, S.A. de C.V., 2018; Alphagroup, 2019).

Metodología de diseño

Diseño de la línea de riego o lateral

La variación del caudal y de la presión a lo largo de una línea lateral se debe principalmente a las características de los emisores y a las pérdidas de carga por fricción (HF), accesorios y desnivel topográfico. Las pérdidas localizadas se incorporan mediante una longitud equivalente, sumada a la longitud real de la tubería. El diseño consiste en determinar el número máximo de salidas N que permita mantener HF por debajo de la pérdida permisible (HFp), considerando como referencia el 20 % de la presión de operación del emisor, ajustado por el desnivel del terreno. Para ello, se inicia el cálculo con una salida y se incrementa progresivamente N hasta superar HFp.

Primero se determina la longitud equivalente (Le) de los accesorios y perforaciones de la línea lateral mediante la ecuación de Darcy-Weisbach (1):

$$Le = 2.2139KD^{4.75}Q^{-1.75}\eta^{-0.25} \quad (1)$$

donde: Le: Longitud equivalente, m; K: Coeficiente de carga cinética; D: Diámetro de la tubería, m; Q: Caudal, m^3/s; η: Viscosidad cinemática del agua, constante ~ 1,0x10-6 m^2/s.

La pérdida de carga inicial (HF′) se calcula mediante la ecuación de Hazen-Williams, considerando la longitud real más la longitud equivalente y sin considerar todavía el efecto de las salidas múltiples (ecuación 2):

$$HF' = 10.643\frac{L}{D^{4.87}}\left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} \quad (2)$$

donde, HF': Pérdida de carga, en metros de columna de agua, m; L: Longitud de la tubería, en m; D: Diámetro de la tubería, en m; Q: Caudal, en m^3/s; C: Coeficiente de Hazen-Williams. Engineers Edge, LLC (2024) presenta una tabla de referencia para diferentes materiales.
Posteriormente, la pérdida de carga se ajusta mediante el factor de salidas múltiples o factor de Christiansen F, calculado con la ecuación (3), donde m=1.85 para Hazen-Williams (Christiansen, 1942). Finalmente, la pérdida de carga total de la línea lateral se obtiene mediante la ecuación (4):

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2} \quad (3)$$

donde: F: Factor de salidas múltiples, adimensional; N: Número de salidas; m: Coeficiente que depende del exponente de velocidad en la ecuación de caída de presión (para Hazen Williams, m = 1.85).

$$HF = HF' * F \quad (4)$$

donde: HF: Pérdida de carga total sobre la línea de riego lateral con salidas múltiples, en metros. El procedimiento es iterativo: mientras HF≤HFp, se incrementa el número de salidas en una unidad (N=N+1). El proceso finaliza cuando HF>HFp, seleccionándose el número máximo de salidas que cumple la condición de diseño. La aplicación muestra los resultados obtenidos para cada salida, permitiendo visualizar el incremento de la pérdida de carga a lo largo de la línea lateral.

Diseño de la línea secundaria o tubería porta lateral

La tubería secundaria o porta-laterales tiene la función de abastecer de agua a las salidas que alimentan las líneas laterales. Su dimensionamiento consiste en determinar los diámetros y longitudes de tubería que permitan satisfacer la pérdida de carga permisible (HFp) al entregar el caudal requerido en la última salida. Para este trabajo se consideró como referencia HFp=10% de la presión de operación del emisor; para una presión de 20 m.c.a., corresponde a 2.0 m, ajustándose adicionalmente por el desnivel topográfico.

El procedimiento utiliza como datos de entrada el tipo de tubería disponible en la base de datos de la aplicación, el número máximo de diámetros a considerar (ND), la longitud total de la línea (L), el caudal de cada salida (qs), la distancia a la primera salida (S0) y la separación constante entre salidas (Se). El caudal se convierte internamente a $m^3\ s^{-1}$ para efectuar los cálculos. Cuando las salidas presentan separaciones heterogéneas, se recomienda utilizar el módulo de diseño de tubería principal. A partir de estos datos, la aplicación evalúa iterativamente las tuberías disponibles hasta identificar aquellas que satisfacen HF<HFp. Inicialmente se determina el número de salidas (N, ecuación 5), el caudal total (Q, ecuación 6) y la relación entre la distancia a la primera salida y la separación entre salidas (rs, ecuación 7):

$$N = \frac{L - S0}{Se} \tag{5}$$

$$Q = qs * N * \frac{1}{1000 * 3600} \tag{6}$$

$$rs = \frac{S0}{Se} \tag{7}$$

El factor de Christiansen obtenido mediante la ecuación (3) se ajusta considerando rs, mediante la ecuación (8):

$$F1 = \frac{N * F + rs - 1}{N + rs - 1} \tag{8}$$

Finalmente, la pérdida de carga se calcula considerando inicialmente la tubería como un conducto de flujo completo mediante la ecuación (2), y posteriormente se corrige mediante el factor de salidas múltiples ajustado, de acuerdo con HF=F1*HF′. El diámetro seleccionado debe satisfacer la condición de pérdida de carga permisible.

Cuando ND≥2, la aplicación permite optimizar la configuración mediante tuberías telescopiadas, buscando dos o más diámetros que cumplan HF=HF0+HF1≤HFp. Para dos diámetros, D0>D1, se implementaron dos procedimientos: método iterativo y método de bisección. El método iterativo distribuye progresivamente las salidas entre los dos diámetros hasta superar la pérdida de carga permisible, conservando la configuración anterior como solución. El método de bisección, basado en Jiménez y Ramírez (2018), determina el número de salidas de cada tramo mediante la búsqueda de N0 y N1 dentro de un intervalo definido entre 0 y N, hasta alcanzar la tolerancia establecida.

Para ND≥3, el procedimiento se repite utilizando como punto de partida el tramo de menor diámetro obtenido en la etapa anterior, hasta alcanzar el número de diámetros solicitado o hasta que no sea posible obtener una configuración que satisfaga HFp. Como resultado, la aplicación proporciona para cada diámetro Di la longitud Li, pérdida de carga HFi y número de salidas Ni.

Diseñador de tubería principal

El diseño de la tubería principal consiste en dimensionar los tramos que conducen el gasto requerido hacia las líneas secundarias, considerando como ruta crítica aquella que requiere mayor energía para abastecer la sección de riego. La aplicación evalúa cada tramo mediante la velocidad permisible (Vp) y la pérdida de carga. Como criterio de diseño, se considera un intervalo de velocidad de 0.3 a 2.5 m s^{-1}; velocidades inferiores pueden favorecer la acumulación de sedimentos, mientras que velocidades elevadas pueden incrementar los efectos de vibración y provocar daños sobre la tubería (Boman & Shukla, 2004).

Para cada tramo se introducen el material y diámetro nominal de la tubería, el gasto (Q), la longitud, incluyendo la longitud equivalente de accesorios cuando corresponde, y la pendiente del terreno. La pendiente positiva representa un tramo ascendente y se suma a la pérdida de carga, mientras que una pendiente negativa representa un tramo descendente y se resta a la pérdida de carga.

La velocidad del flujo se determina mediante la ecuación (9), mientras que la pérdida de carga por fricción se calcula mediante la ecuación (2):

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \tag{9}$$

donde V es la velocidad del flujo, en m s^{-1}; Q es el gasto, en m^3 s^{-1}; y D es el diámetro interno, en m. Finalmente, la aplicación verifica que la velocidad se encuentre dentro del intervalo permisible y genera un indicador de estado para cada tramo. El procedimiento se repite para los diferentes tramos de la red y, para la ruta crítica, se obtiene la pérdida de carga total, el gasto y la velocidad máxima del sistema.

Estimación del equipo de bombeo

La selección del equipo de bombeo depende principalmente de la disponibilidad y características de la fuente de agua, el nivel dinámico, la demanda hidráulica y la carga total requerida por el sistema. En fuentes como pozos o norias, se debe determinar mediante un aforo el gasto máximo que puede suministrarse de manera sostenible. Asimismo, el nivel dinámico y las características de la fuente permiten definir el tipo de equipo de bombeo más adecuado. Para estimar la potencia requerida, primero se calculan las pérdidas de carga por fricción del sistema (ecuación 10), considerando las líneas lateral, secundaria y principal:

$$HFsys = HFl + HFs + HFp \quad (10)$$

donde HFsys es la pérdida de carga total del sistema, HFl la correspondiente a la línea lateral, HFs a la línea secundaria y HFp a la línea principal, todas expresadas en m.c.a. Posteriormente, se incorporan las pérdidas adicionales (HFa), correspondientes a profundidad de bombeo, filtración, medidor de agua, presión requerida por los emisores, accesorios y otros componentes no incluidos previamente. La carga total requerida se obtiene como: HT=HFsys+HFa.

El gasto de diseño (Q) corresponde a la demanda máxima del sistema o de las unidades de riego que operen simultáneamente, limitada por la disponibilidad de la fuente. Con estos parámetros, la potencia hidráulica estimada del equipo de bombeo se determina mediante la ecuación 11:

$$HP = (Q * HT)/(76 * \eta) \quad (11)$$

donde HP es la potencia requerida de la bomba, en HP; Q el gasto, en L s^{-1}; HT la carga total requerida, en m.c.a.; 76 la constante de conversión de unidades y η la eficiencia de la bomba, expresada en decimal.

Finalmente, en esta aplicación se consideró un factor de seguridad de 12–20 % sobre la potencia calculada. El resultado constituye una estimación preliminar; la selección definitiva debe verificarse con las condiciones reales de operación, calidad del agua, características de la fuente de agua, accesorios, desnivel topográfico y curvas de rendimiento del fabricante.

Caso de estudio

Con el objetivo de mostrar el procedimiento a seguir para diseñar un pequeño sistema de riego por microaspersión. Usaremos un predio ubicado en el ejido la concepción en el municipio La Soledad, Tamaulipas, México. En la Figura 1, se puede apreciar la geometría del predio, misma que representa 9.88 hectáreas. El agricultor tiene establecido cultivo de naranja valencia, en base a la información proporcionada por el propietario el marco de plantación es de 8 metros entre cada planta y 8 metros entre cada hilera. Después de validar con una imagen satelital, se tiene 32 plantas por 47 líneas; resultando 1, 504 árboles. La fuente de agua es una noria con capacidad de mantener un gasto de 12 litros por segundo a una profundidad de 15 metros.

En la siguiente sección de resultados se podrán visualizar los resultados obtenidos y la explicación de cómo se utilizó cada aplicación para calcular cada subcomponente del sistema de riego.

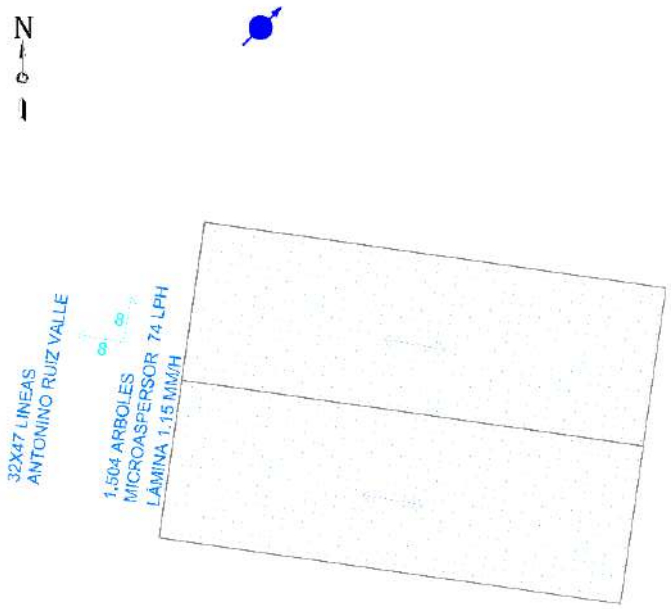


Figura 16. Predio de C. Antonino Ruiz Valle, ubicado en el ejido la Concepción, en el municipio, La Soledad, Tamaulipas, México. Superficie aproximada de 9.88 hectáreas. Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

Todas las aplicaciones desarrolladas se encuentran disponibles en el sitio web de AgroTools, donde también se proporciona información general del proyecto, documentación técnica y videotutoriales para su utilización (Ambrosio, 2025).

Diseño de la línea de riego o lateral

Para evaluar la longitud máxima de las líneas laterales se utilizó la herramienta *Máxima Lateral* de AgroTools. Se analizaron dos alternativas bajo las mismas condiciones de operación: presión del emisor de 20 m.c.a., pérdida de inserción de 0.35 m, gasto de 74 L h^{-1}, espaciamiento entre salidas de 8 m, coeficiente de Hazen-Williams de 140, pérdida permisible de 20 % de la presión de operación y pendiente nula. La opción A consideró una manguera de polietileno con diámetro interno de 13 mm, mientras que la opción B utilizó un diámetro interno de 16 mm.

En la opción A, la pérdida de carga aumentó de 0.03 m en la primera salida hasta 4.71 m en la octava, superando la pérdida permisible de 4.0 m. Por lo tanto, se estableció un máximo de 7 micro aspersores por lateral. Considerando los 47 árboles por fila, esta configuración requeriría siete subsecciones de riego, incrementando el número de unidades y válvulas necesarias.

La opción B presentó menores pérdidas de carga debido al mayor diámetro de la manguera (ver Figura 2). Para su máxima capacidad de 11 salidas, la pérdida de carga alcanzó 4.06 m, valor ligeramente superior al límite permisible de 4.0 m. Sin embargo, al considerar la configuración seleccionada de 8 árboles por lateral, la pérdida de carga se redujo a 1.71 m, por lo que esta alternativa proporciona un margen adecuado para la operación del sistema.

Con base en la comparación, se seleccionó la opción B, utilizando manguera de polietileno de 16 mm y 8 micro aspersores por línea lateral. Considerando 47 árboles por fila (ver Figura 1), esta configuración permite distribuir el riego mediante laterales en ambos sentidos y cubrir la

totalidad de la fila con tres unidades de riego. En el área de estudio se requieren 32 líneas laterales de 368 m cada una, correspondientes a las filas de árboles del predio, para una longitud total aproximada de 11,776 m de manguera. Considerando rollos de aproximadamente 150 m, se estimó la adquisición de 80 rollos de manguera y 1,750 micro aspersores, incluyendo un margen para futuras reparaciones.

N_emitter	Le_real	Le_equiv	Qa_m3/s	HF'	F	HF_meter	Slope	HF+Slope_meter
1	8	8.35	0.000021	0.010955	1.004471	0.011004	0	0.011004
2	16	16.7	0.000041	0.079093	0.639091	0.050548	0	0.050548
3	24	25.05	0.000062	0.251392	0.534391	0.134342	0	0.134342
4	32	33.4	0.000082	0.571054	0.485246	0.277102	0	0.277102
5	40	41.75	0.000103	1.079107	0.456785	0.49292	0	0.49292
6	48	50.1	0.000123	1.815053	0.438238	0.795425	0	0.795425
7	56	58.45	0.000144	2.817226	0.425199	1.197882	0	1.197882
8	64	66.8	0.000164	4.123013	0.415535	1.713256	0	1.713256
9	72	75.15	0.000185	5.769015	0.408086	2.354254	0	2.354254
10	80	83.5	0.000206	7.791158	0.40217	3.133366	0	3.133366
11	88	91.85	0.000226	10.22478	0.397357	4.062889	0	4.062889

Figura 17. Pérdida de carga calculada con *Máxima Lateral* para una manguera de 16 mm, micro aspersores de 74 L h^{-1} a cada de 8 m. Fuente: Elaboración propia.

Diseño de la línea secundaria o tubería porta lateral

Para el diseño de las tuberías que abastecen las líneas laterales se utilizó la herramienta *Diseño de Secundaria* de AgroTools. A partir de la configuración seleccionada de 8 árboles por lateral, se propusieron tres unidades de riego, cada una dividida en dos subunidades controladas mediante un crucero doble (C1, C2 y C3), para un total de seis subunidades. Esta distribución permite mantener las líneas secundarias homogéneas y reducir su longitud, resultando en seis líneas de 130 m cada una, como se muestra en la Figura 3.

Al no considerar inicialmente el desnivel, las seis líneas secundarias presentan las mismas condiciones geométricas y pueden diseñarse de manera equivalente. Para incorporar la topografía del terreno, se generaron las curvas de nivel (Figura 4) mediante Global Mapper (Blue Marble Geographics, 2024), a partir de las cuales se estimó la pendiente de cada línea secundaria.

Se consideraron dos condiciones de demanda. Para las unidades C1 y C2, cada salida de la tubería secundaria abastece 16 árboles, por lo que el caudal requerido es de 1,184 L h^{-1} (74×16). En la unidad C3, cada salida abastece 15 árboles, con un caudal de 1,110 L h^{-1} (74×15).

La configuración propuesta constituye una alternativa de distribución y puede modificarse de acuerdo con las condiciones de operación y las necesidades del productor. Por ejemplo, si se requiere ubicar las válvulas en el margen del predio, cada unidad podría alimentarse mediante una tubería secundaria de 260 m (2 × 130 m). En el caso estudiado se seleccionó la configuración de seis subunidades debido a que las condiciones de operación permitieron la instalación de los cruceros dentro del predio.

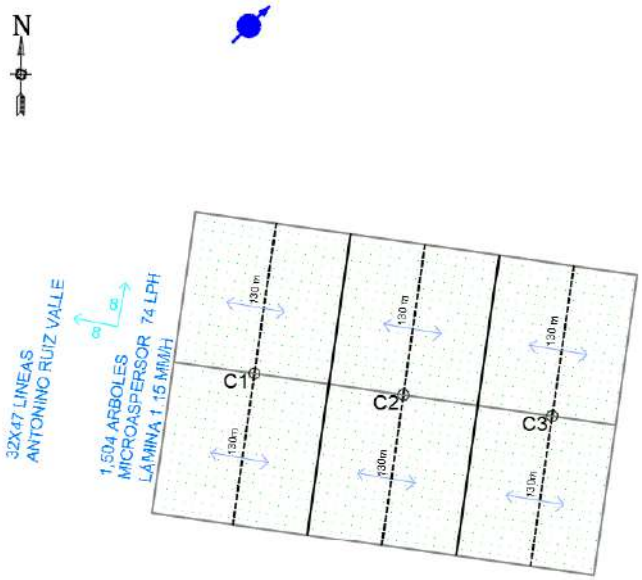


Figura 18. Diseño de la tubería secundaria: tres unidades de riego, cada una controlada mediante un crucero doble (C1, C2, C3) y abastecida por dos subunidades con tuberías secundarias de 130 m y riego en ambos sentidos. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra las curvas de nivel del área de estudio, con una elevación predominante entre 177 y 180 m. En general, el terreno presenta una pendiente favorable al flujo en la dirección de las líneas secundarias; únicamente la secundaria de la tercera unidad de riego, con dirección noroeste, presenta una pendiente en contra de aproximadamente 1%. Esta condición se consideró posteriormente en la estimación del sistema de bombeo.

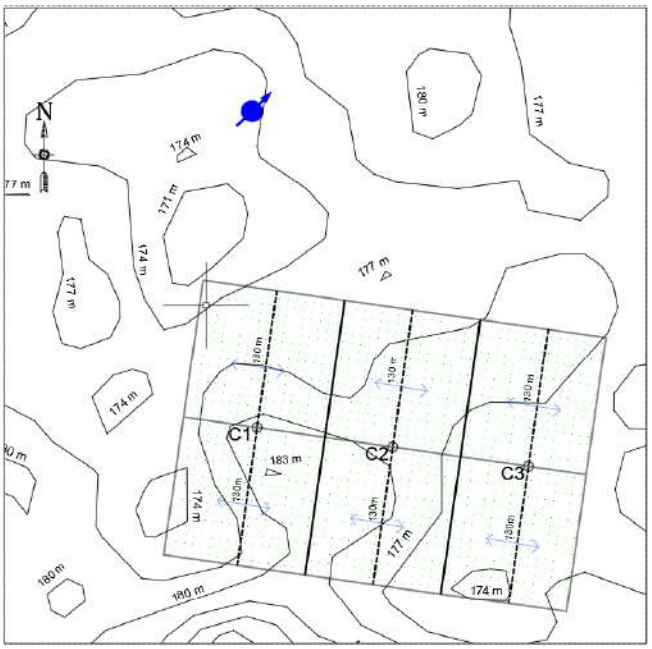


Figura 19. Curvas de nivel del área de estudio generadas a partir del modelo digital de elevación ASTER GDEM v3 mediante *Global Mapper*, con una equidistancia de 3 m. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación *Diseño de Secundaria* se muestran en la Figura 5. Para el caso 1 se estableció una pérdida de carga permisible de 1.5 m, equivalente al 7.5 % de la presión de operación del emisor. Bajo esta condición, el diseño resultó en un tramo de tubería de 75 mm (4 m de longitud), seguido de 126 m de tubería de 64 mm. Para considerar pérdidas adicionales en uniones y reducciones, las longitudes se incrementaron en 20 %. Posteriormente, mediante la función *PIPE ACCOUNTING*, se determinaron los tramos comerciales requeridos por cada subunidad, resultando en 1 tramo de 75 mm y 26 tramos de 64 mm.

Para el caso 2, se obtuvieron 36 m de tubería de 64 mm y 94 m de tubería de 50 mm. Después de aplicar el margen del 20 %, se determinaron 8 tramos de 64 mm y 19 tramos de 50 mm por cada subunidad correspondiente.

Para el dimensionamiento del sistema se consideró como pérdida de carga de la línea secundaria la mayor obtenida entre las subunidades. En este caso, correspondió al caso 1, con una pérdida de carga de HFs=1.42 m. El usuario puede modificar la pérdida de carga permisible de acuerdo con los criterios de diseño establecidos.

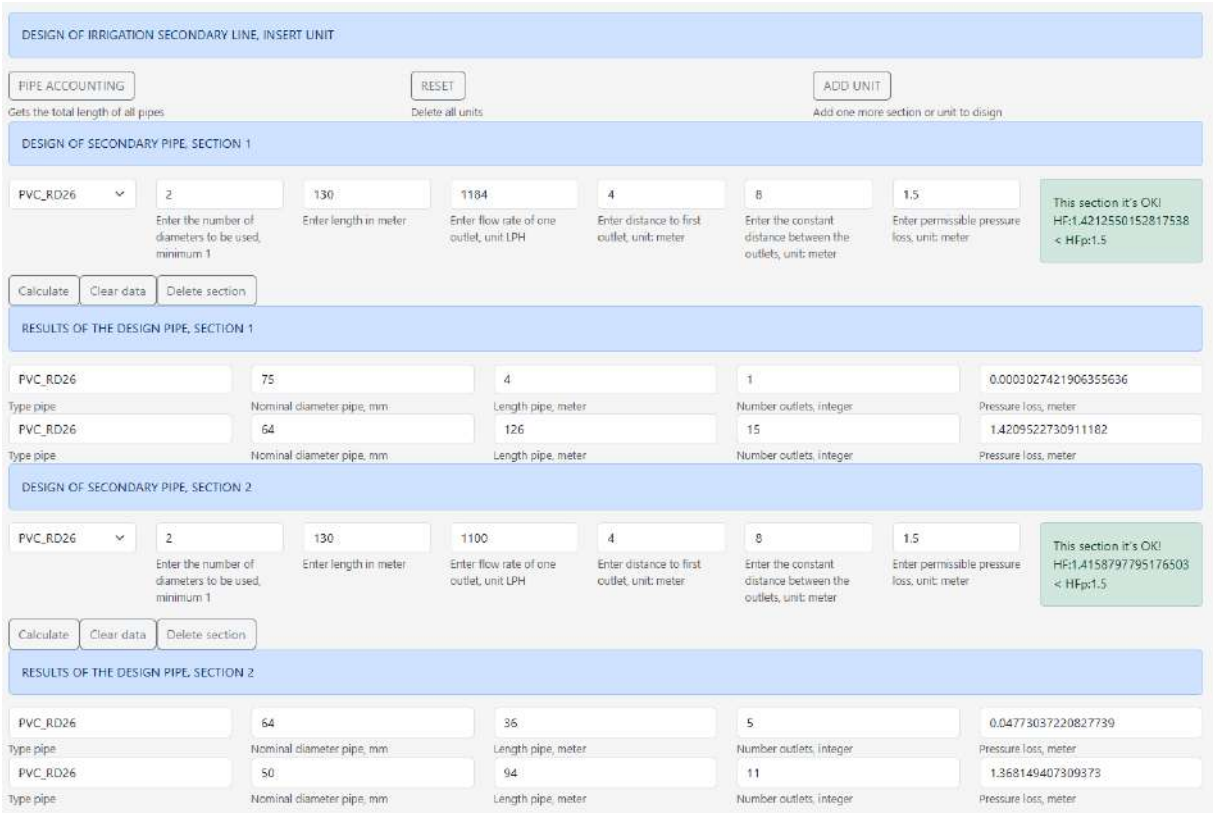


Figura 20. Resultados del diseño de la tubería secundaria para dos condiciones de demanda. Se seleccionaron configuraciones telescopiadas de 75 y 64 mm para el primer caso, y de 64 y 50 mm para el segundo. Fuente: Elaboración propia.

Diseñador de tubería principal

El diseño de la tubería principal se realizó mediante la aplicación *Diseño de Principal* de AgroTools. La Figura 6 muestra la configuración geométrica de la red. El dimensionamiento se efectuó considerando el gasto máximo de operación de la ruta crítica, correspondiente al abastecimiento simultáneo de las subunidades de mayor demanda. En este caso, las unidades

de riego C1 y C2 presentan la misma demanda y cada una está conformada por dos subunidades que pueden operar simultáneamente. Cada subunidad demanda 16×16×74=18944 L h^{-1}, equivalente a 5.26 L s^{-1}; por lo tanto, para dos subunidades simultáneas, el gasto de diseño es de 10.52 L s^{-1}.

Para la unidad de riego C3, cada subunidad demanda 16×15×74=17760 L h^{-1}, equivalente a 4.93 L s^{-1}. Debido a que sus dos subunidades pueden operar simultáneamente, el gasto máximo considerado para esta unidad es de 9.87 L s^{-1}. Para cada tramo de la tubería principal se incorporó la pendiente del terreno obtenida a partir de las curvas de nivel generadas mediante Global Mapper (Figura 4).

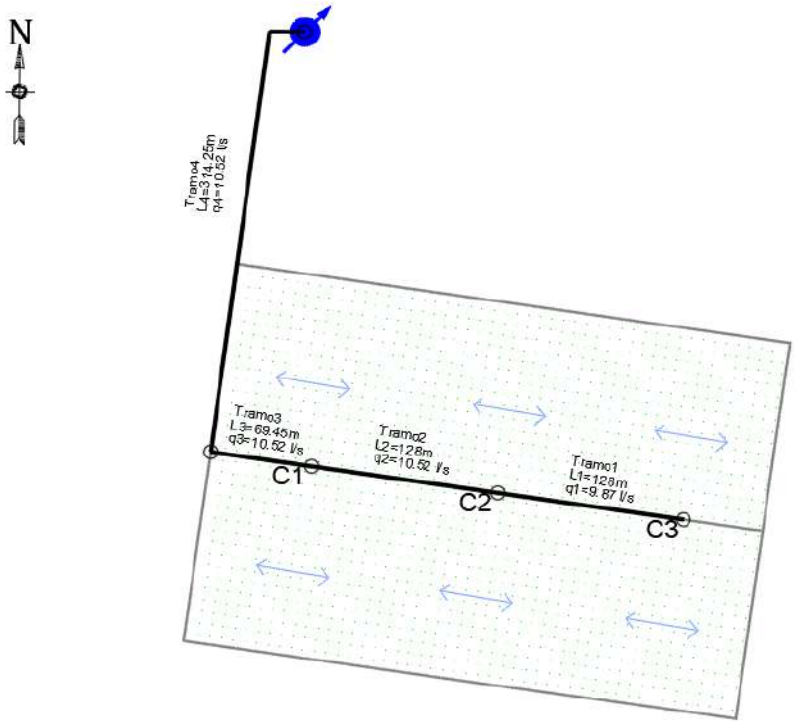


Figura 21. Diseño de la tubería principal en cuatro tramos. El tramo 1 abastece la unidad de riego C3, mientras que los tres tramos restantes se dimensionaron para la condición crítica de 10.52 L s^{-1}, correspondiente a las unidades C1 y C2. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación *Diseño de Principal* se muestran en la Figura 7. El diseño se realiza por tramos, definiendo para cada sección el material, diámetro nominal, gasto, longitud y pendiente. Para el caso de estudio se analizaron cuatro tramos, utilizando tubería PVC RD26 de 100 mm (4"). Los cuatro tramos presentaron diferentes condiciones de pendiente y, por tanto, diferentes pérdidas de carga. El tramo 1, con una pendiente favorable de 1%, presentó una pérdida de carga de 0.25 m y una velocidad de 1.14 m s^{-1}. El tramo 2, con pendiente nula, presentó 1.72 m de pérdida de carga y una velocidad de 1.21 m s^{-1}. En el tramo 3, con pendiente desfavorable de 4% la pérdida de carga resultó 3.71 m, manteniendo una velocidad de 1.21 m s^{-1}. Finalmente, el tramo 4, con una longitud de 314.25 m y una pendiente desfavorable máxima de 3 %, presentó una pérdida de carga de 13.66 m y una velocidad de 1.21 m s^{-1}.

La configuración de la línea de conducción principal presentó una pérdida de carga total de HFp=19.34 m, una velocidad máxima de 1.21 m s^{-1} y un gasto máximo de 10.52 L s^{-1}, por lo que se consideró adecuada bajo los criterios establecidos. Aunque es posible reducir la pérdida de carga del tramo 3 mediante el uso de un diámetro mayor, se consideró técnicamente viable mantener la tubería de 100 mm (4") y compensar las pérdidas mediante la selección del equipo de bombeo.

Finalmente, considerando un margen del 20 % para traslapes, uniones y accesorios, la longitud total de la línea principal fue de 639.7 m, equivalente a 128 tramos comerciales de 6 m de tubería de 100 mm (4") RD26.



Figura 22. Resultado del diseño del primer tramo: tubería PVC RD26 de 4", velocidad de 1.14 m s^{-1} y pérdida de carga de 0.25 m, para un gasto de 9.87 L s^{-1} y una longitud de 128 m. El mismo procedimiento se aplicó a los tres tramos restantes, obteniéndose una pérdida de carga total de HFp=19.34 m. Fuente: Elaboración propia.

Estimación del equipo de bombeo

Para estimar el equipo de bombeo se retomaron los resultados obtenidos en el diseño de las líneas lateral, secundaria y principal. La pérdida de carga del sistema se obtuvo mediante la ecuación (10). Al sustituir los valores obtenidos, se tiene:

$$HFsys = HFl + HFs + HFp = 1.71 + 1.42 + 19.34 = 22.47$$

Las pérdidas adicionales (HFa) se estimaron considerando 15 m correspondientes a la profundidad de bombeo, 20 m de presión de operación, 2 m de pérdida en la descarga, 1 m en el sistema de filtrado, 2 m en piezas especiales y 1.3 m por la pendiente desfavorable de la línea secundaria. Así, HFa=41.3 m y la carga total requerida resulta; HT= HFsys + HFa= 22.47 + 41.3= 63.77 m.

El gasto de diseño corresponde a 10.52 L s^{-1}, asociado a la operación simultánea de las dos subunidades de la unidad crítica. Para la estimación se consideró un gasto de 11 L s^{-1} y una eficiencia de bomba del 75 %, valor que deberá verificarse con el proveedor. La potencia requerida se calculó mediante la ecuación (11). Al sustituir los valores, se tiene:

$$HP = \frac{Q * HT}{76 * \eta} = \frac{11 * 63.77}{76 * 0.75} = 12.31$$

Aplicando un factor de seguridad del 20 %, se obtuvo una potencia requerida de 14.77 HP, por lo que se propone un equipo comercial de 15 HP. La aplicación *Estimación de la Bomba* de AgroTools permite reproducir y validar este cálculo.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten integrar una estimación preliminar de los principales componentes del sistema de riego. La selección definitiva de accesorios y elementos

complementarios (como codos, válvulas, medidor de agua, válvulas de aire, purgas, cruceros y componentes de descarga) deberá realizarse durante la etapa de presupuesto y construcción. La capacidad disponible de la fuente también condiciona el gasto de diseño y el número de subunidades que pueden operar simultáneamente. En este caso, la fuente de agua dispone de 12 L s^{-1}, mientras que la demanda máxima calculada fue de 10.52 L s^{-1}; para la estimación del equipo de bombeo se consideró 11 L s^{-1} como valor redondeado. Esta diferencia proporciona un margen operativo respecto a la demanda calculada.

Conclusiones

El desarrollo de las aplicaciones web permitió integrar en una misma plataforma diferentes procedimientos para el diseño hidráulico de sistemas de riego presurizado, incluyendo el dimensionamiento de líneas laterales, tuberías secundarias y principales, así como la estimación de la potencia requerida para el equipo de bombeo.

El caso de estudio demostró la utilidad de las herramientas para evaluar y comparar diferentes configuraciones hidráulicas. La comparación de diámetros en las líneas laterales confirmó que un mayor diámetro interno permite reducir las pérdidas de carga y aumentar el número de emisores que pueden operar bajo una determinada presión. Asimismo, el diseño de las tuberías secundarias permitió evaluar configuraciones telescopiadas y seleccionar alternativas que cumplen con las pérdidas de carga permisibles.

Para la condición crítica del sistema se obtuvo un gasto de diseño de 10.52 L s^{-1} y una pérdida de carga de 19.34 m en la línea principal. Al integrar las pérdidas de carga de las líneas, el desnivel, la presión de operación de los emisores y las pérdidas adicionales, se determinó una carga total de 63.77 m. Con una eficiencia estimada de 75 %, la potencia calculada fue de 12.31 HP y, al aplicar un factor de seguridad del 20 %, se obtuvo una potencia requerida de 14.77 HP, correspondiente a un equipo comercial de 15 HP.

En conjunto, las herramientas desarrolladas constituyen una alternativa de acceso gratuito para apoyar el prediseño y la evaluación de sistemas de riego presurizado, particularmente en aplicaciones de escala similar al caso estudiado. Su principal ventaja es permitir comparar diferentes configuraciones hidráulicas sin requerir software especializado. Como trabajo futuro se plantea ampliar la base de datos de tuberías, emisores, accesorios y costos, así como validar los resultados mediante mediciones de campo e incorporar métodos adicionales para el cálculo de pérdidas de carga.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ing. César Martínez Martínez por su disposición para compartir los datos del predio utilizados en el desarrollo y evaluación del caso de estudio.

Literatura Citada

Alphagroup. (2019). Conversion tables. https://www.alphagroup.co.th/wp-content/uploads/2019/08/Conversion-Tables.pdf

Ambrosio, J. P. (2025). AgroTools: Herramientas web para el diseño de sistemas de riego [Aplicación web]. Netlify. https://agrotoolscoacolpos.netlify.app/

Blue Marble Geographics. (2024). Global Mapper (Version 26.0) [Computer software]. https://www.bluemarblegeo.com/global-mapper/

Boman, B., & Shukla, S. (2004). Hydraulic considerations for citrus microirrigation systems. University of Florida IFAS Extension. https://ask.ifas.ufl.edu/publication/CH156

Christiansen, J. E. (1942). Irrigation by sprinkling. California Agricultural Experiment Station, Bulletin 670, University of California.

CRESCO. (n.d.). Catálogo de tuberías CRESCO. http://www.trevisa.com.mx/100+pdf/PDF%20web%20PVC/tuberiahidraulica.pdf

Empresa Mexicana de Manufacturas, S.A. de C.V. (2018). Tubería de PVC cédula 40. https://dia.unison.mx/wp-content/uploads/2018/05/SALIDA_HID_WC.pdf

Engineers Edge, LLC. (2024). Hazen-Williams coefficients table. https://www.engineersedge.com/fluid_flow/hazenwilliams_coefficients_table_13220.htm

FAO. (2026). Agricultural water management. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO – Agricultural water management. Disponible en: https://www.fao.org/land-water/water/agricultural-water-management/en

IRRICAD. (2024). IRRICAD: Designs you can trust. https://www.irricad.com/

Jiménez, S., & Ramírez, C. (2018). Diseño hidráulico de tuberías con salidas múltiples mediante métodos numéricos. IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2018. https://www.riego.mx/congresos/comeii2018/assets/ponencias/extenso/18057.pdf

Lamaddalena, N., Salman, M., Pek, E., Ahmad, W., Lebdi, F., & Wahaj, R. (2024). Mapping system and services for pressurized irrigation systems (MASSPRES) (Irrigation and Drainage Paper No. 68). FAO. FAO – MASSPRES

MDN Web Docs. (2026). JavaScript. Mozilla. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript

Netlify. (2026). Netlify documentation. https://docs.netlify.com/

Phocaides, A. (2007). Handbook on pressurized irrigation techniques (2nd ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/4/a1336e/a1336e00.htm
React. (2026). React. https://react.dev/

RIVULIS. (2025). WCADI by RIVULIS: Diseño de riego más rápido y fácil. https://es.rivulis.com/wcadi/

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Efecto de la liofilización sobre la calidad química de café *Coffea arabica var. Castillo* procesado por vía seca y húmeda

Diego Fernando Gasca Bermeo[1], Jaime Daniel Bustos Vanegas[2*], Andrés Felipe Bahamón Monje[3], Nelson Gutérrez[4]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

El secado es una etapa crítica que determina la calidad fisicoquímica del grano de café. Tradicionalmente se emplean el secado solar y mecánico, que exponen el grano a altas temperaturas y oxígeno, favoreciendo la degradación de compuestos bioactivos. La liofilización se ha señalado como alternativa que preserva mejor estos compuestos al evitar el daño térmico y oxidativo, aunque su efecto en grano entero ha sido poco estudiado. El objetivo fue evaluar el efecto de la liofilización, frente al secado solar y mecánico, sobre el contenido de humedad, cafeína, trigonelina y ácidos clorogénicos en café *Coffea arabica var. Castillo* procesado por vía seca y húmeda. Cerezas maduras se procesaron por vía seca y húmeda, y se secaron mediante los tres métodos hasta 9%-12% de humedad (base húmeda). La humedad se determinó por gravimetría (ISO 6673), y el contenido de cafeína, trigonelina y ácidos clorogénicos se cuantificó por HPLC en café verde y tostado. Los resultados mostraron que el café liofilizado, tanto de vía seca como húmeda, presentó los mayores contenidos de ácidos clorogénicos en grano verde (67.37 ± 1.65 y 37.89 ± 2.01 mg/g, respectivamente), con diferencias significativas frente al secado mecánico. La cafeína no mostró diferencias significativas entre tratamientos, mientras que la trigonelina fue mayor en el secado solar. Se concluye que la liofilización favorece la conservación de ácidos clorogénicos en café verde, lo que sugiere su potencial para preservar la calidad química del grano sin afectar significativamente la cafeína.

Palabras clave: ácidos clorogénicos, sublimación, secado de café, HPLC.

Abstract

Post-harvest drying is a critical stage that determines the physicochemical quality of coffee bean. Solar and mechanical drying are traditionally used, but both expose the bean to high temperatures and oxygen, promoting the degradation of bioactive compounds. Freeze-drying has been proposed as an alternative that better preserves these compounds by avoiding thermal and oxidative damage, although its effect on whole coffee beans remains scarcely studied. The objective of this work was to evaluate the effect of freeze-drying, compared with solar and mechanical drying, on the moisture, caffeine, trigonelline, and chlorogenic acid content of *Coffea arabica var. Castillo* coffee processed by dry and wet methods. Ripe cherries were processed by both methods and dried using the three techniques until reaching 9-12% moisture (wet basis). Moisture was determined gravimetrically (ISO 6673) and caffeine, trigonelline, and chlorogenic acid contents were quantified by HPLC in green and roasted coffee.

[1,2,3,4]Maestría en Ciencia y Tecnología del Café, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia. Centro Surcolombiano de Investigación en Café CESURCAFÉ. diegofgasca@gmail.com, jaime.bustos@usco.edu.co (autor de correspondencia), andres.bahamon@usco.edu.co, ngutierrezg@usco.edu.co.

Freeze-dried coffee, from both dry and wet processing, showed the highest chlorogenic acid content in green beans (67.37 ± 1.65 and 37.89 ± 2.01 mg/g, respectively), with significant differences compared to mechanical drying. Caffeine content showed no significant differences among treatments, while trigonelline was highest under solar drying. These findings indicate that freeze-drying favors the retention of chlorogenic acids in green coffee, suggesting its potential as a drying method to preserve bean chemical quality without significantly compromising caffeine content.

Keywords: *Coffea arabica*; postharvest; freeze-drying; chlorogenic acids; HPLC.

Introducción

El café es la segunda bebida más consumida en el mundo después del agua, con un estimado del 80% de la población adulta que consume regularmente bebidas a base de café (Torres-Valenzuela et al., 2019). En 2020, el mercado mundial del café se valoró en más de USD 465 mil millones, siendo *Coffea arabica* L. la especie predominante, con un crecimiento sostenido año tras año. Colombia, reconocida por la alta calidad de su producción cafetera, se ubica entre los principales productores mundiales de café arábica (Delgado et al., 2019).

Actualmente, el café es considerado un alimento funcional debido a los múltiples beneficios asociados a su consumo (Açıkalın & Sanlier, 2021). El grano de café contiene una amplia variedad de compuestos químicos, entre ellos carbohidratos, lípidos, proteínas, alcaloides (como la cafeína y la trigonelina), ácidos carboxílicos, compuestos fenólicos y sustancias volátiles responsables de su aroma característico (Kieu Tran et al., 2020). Estos componentes fisicoquímicos están influenciados tanto por el genotipo de la planta como por los procesos poscosecha, entre los cuales el beneficio, el secado, el almacenamiento y el tueste resultan determinantes para preservar la calidad del producto.

El proceso de secado, en particular, es una de las etapas más críticas del manejo poscosecha, que busca reducir la humedad del grano a valores entre 10% y 12% (Silva et al., 2022). Esta reducción es fundamental para la conservación del café, ya que disminuye la actividad metabólica y la actividad de agua, contribuyendo a mantener las propiedades organolépticas que inciden positivamente en la calidad final de la bebida (Silva et al., 2022).

Tradicionalmente, el secado se ha realizado mediante métodos solares, mecánicos o mixtos, cada uno con características particulares que afectan de manera diferente la composición y calidad del grano. El secado solar, el más antiguo y ampliamente utilizado, consiste en extender los granos en patios o superficies lisas donde se secan bajo luz solar directa, o mediante estructuras tipo invernadero que retienen parcialmente la energía térmica solar para favorecer el secado en camas elevadas. Aunque este método es económico y ambientalmente sostenible, presenta riesgos importantes como la contaminación cruzada, el desarrollo de mohos y la fermentación bajo condiciones de humedad o manejo inadecuado, lo cual puede derivar en pérdida de sabor y acidez. Además, los compuestos sensibles al oxígeno o a la luz pueden degradarse fácilmente durante este proceso (Soeswanto et al., 2021; Dong et al., 2017; Kieu Tran et al., 2020). Por su parte, el secado mecánico emplea equipos especializados como secadores de bandeja, rotativos o de lecho fluidizado, que permiten un secado más rápido y uniforme, aunque pueden dañar el grano si la temperatura del aire de secado no se controla adecuadamente (Soeswanto et al., 2021). También existen secadores híbridos que combinan el secado solar y mecánico, buscando aprovechar las ventajas de ambos métodos, mejorar la uniformidad del secado, preservar mejor los atributos sensoriales del café y reducir los costos operativos y de implementación (Soeswanto et al., 2021).

En la búsqueda de nuevas tecnologías que minimicen el riesgo de pérdida de calidad, se han evaluado métodos alternativos para preservar los compuestos químicos del grano evitando los riesgos asociados a los métodos de secado tradicionales. En cuanto a la liofilización, algunos autores señalan que es el método de secado que conserva los mayores niveles de estos compuestos, ya que preserva la estructura interna del grano y evita el daño térmico y oxidativo propio de los métodos convencionales; como desventaja, el costo del equipo limita su aplicación a gran escala (Adams, 2007; Cheng et al., 2019; Hariyadi et al., 2022). En la industria del café, la liofilización se ha empleado principalmente para la producción de café instantáneo, y su aplicación al secado del grano entero ha sido poco estudiada (Dong et al., 2017), aunque ha mostrado resultados favorables en la retención de grasas, ácidos orgánicos y ácidos grasos monoinsaturados en café Robusta.

Materiales y Métodos

Preparación de la muestra

Se cosecharon cerezas maduras y bien seleccionadas de *Coffea arabica var. Castillo* en la finca La Esperanza, ubicada a 1,150 metros sobre el nivel del mar, en la vereda Los Alpes, municipio de Neiva, Huila (Colombia). Las cerezas se recolectaron durante dos meses del año (noviembre y diciembre) para someterse a dos tipos de beneficio poscosecha:

Vía seca: las cerezas cosechadas en noviembre se transportaron a la Universidad Surcolombiana bajo refrigeración a 4 °C.

Vía húmeda: las cerezas cosechadas en diciembre se despulparon mecánicamente y se sometieron a un proceso de fermentación para la remoción completa del mucílago. El tiempo de fermentación se determinó con el dispositivo Fermaestro® (Sanz-Uribe & Velásquez-Henao, 2022). Posteriormente, los granos se lavaron con agua y se transportaron a la Universidad Surcolombiana bajo refrigeración a 4 °C.

En ambos casos, los frutos de café se clasificaron hidráulicamente, eliminando los frutos de baja densidad (flotes); posteriormente, se descartaron manualmente los frutos y/o granos que presentaran características de inmadurez, madurez incompleta o resecamiento.

Secado

Las operaciones de secado se realizaron en los laboratorios y planta piloto del Centro Surcolombiano de Investigación en Café – CESURCAFÉ, adscrito a la Universidad Surcolombiana (Neiva, Huila, Colombia).

Secado solar

Se emplearon muestras de 2 kg de café (procesado por vía seca y húmeda) por triplicado. Las muestras se secaron en un secador parabólico tipo invernadero, cubierto con película de polietileno transparente de alta densidad que permite el paso de la luz solar directa. Los granos se dispusieron en camas elevadas en una sola capa. La temperatura y la humedad relativa ambiental se registraron con un termohigrómetro, observándose variaciones entre 25 °C y 39 °C, y entre 40% y 80%, respectivamente. El proceso de secado continuó hasta que el contenido de humedad de los granos alcanzó valores entre 9% y 12%.

Secado mecánico

Se utilizó un secador estático con control de temperatura y flujo de aire. Las muestras, con tres réplicas de 2 kilogramos cada una (n = 3), se sometieron a secado con aire a 40 °C durante las

primeras 24 horas; posteriormente, la temperatura se ajustó a 45 °C. La operación continuó hasta que la humedad alcanzó valores entre 9% y 12% (base húmeda).

Liofilización

Las muestras de café se ultracongelaron a −80 °C durante un mínimo de 48 horas. Posteriormente se dispusieron en el liofilizador BIOFASE (BK-FD12P), en bandejas de acero inoxidable, en una sola capa, para asegurar un secado uniforme. Para el café de vía húmeda se emplearon tres réplicas independientes, con lotes de aproximadamente 970 gramos y tiempos de liofilización de 72 horas. Para las muestras de vía seca se emplearon tres réplicas de 1.5 kg, con tiempos de liofilización de 120 horas.

Contenido de humedad

El contenido de humedad se evaluó mediante dos métodos. El primero se determinó con el equipo KETT PM-450, como método rápido de control. El segundo correspondió al método gravimétrico, mediante estufa, de acuerdo con la norma ISO 6673 a 105 °C (International Organization for Standardization, 2003). En este método, 5 gramos de café (verde y tostado) se dispusieron en recipientes previamente pesados, los cuales se colocaron en estufa a una temperatura promedio de 105 °C durante 24 horas para café verde y 16 horas para café tostado; todas las determinaciones de humedad se realizaron por triplicado.

Determinación de cafeína, trigonelina y ácidos clorogénicos por HPLC

La determinación de cafeína, trigonelina y ácidos clorogénicos en café verde y tostado se realizó mediante cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC), siguiendo el procedimiento descrito en la norma ISO 20481:2008, con algunas modificaciones al protocolo de extracción. Se pesaron aproximadamente 200 mg de muestra molida y tamizada (500 micras, café verde o tostado) y se mezclaron con 10 ml de una solución etanol:agua (80:20 v/v). La mezcla se agitó y se colocó en baño de agua a 90 °C durante 30 minutos con asistencia de ultrasonido, para luego enfriarse a temperatura ambiente. Finalmente, los extractos se filtraron a través de una membrana de nylon de 0.20 μm y se almacenaron en viales ámbar de 2 ml para su posterior análisis. El análisis cromatográfico se realizó con una columna InfinityLab Poroshell 120 EC-120, con un flujo de 1.0 ml/min y longitudes de onda de detección de 272 nm para cafeína, 325 nm para ácidos clorogénicos y 264 nm para trigonelina. Cada análisis se realizó por duplicado (Duarte et al., 2010; Naegele, 2013; Navarra et al., 2017; Sánchez-Riaño et al., 2024).

Análisis estadístico

Para cada tratamiento, la masa de café se dividió en tres partes iguales y se procesó por separado. Los resultados de cafeína, trigonelina y ácidos clorogénicos se expresaron como media ± desviación estándar con base en las réplicas. Dado que algunas muestras no cumplieron el supuesto de normalidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis ($p < 0.05$), seguida de la prueba post hoc de Dunn para identificar diferencias entre tratamientos. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software R Studio, versión 4.4.3.

Resultados y discusión

Humedad después del secado

El Cuadro 1 presenta el contenido de humedad en base húmeda para café verde y tostado, previo a los análisis de HPLC. Para el café verde, la humedad varió entre 8% y 12% entre los diferentes

sistemas de secado. El café tostado presentó niveles de humedad entre 1.7% y 2.7%, cumpliendo los requerimientos establecidos por la norma NTC 3534.

Cuadro 1. Contenido de humedad (% base húmeda) de café verde y tostado obtenido mediante diferentes métodos de beneficio y secado.

Vía de beneficio	Tratamiento	Humedad (%, media ± DE)
Vía seca	Solar – verde	10.13 ± 0.33
Vía seca	Liofilizado – verde	12.37 ± 3.08
Vía seca	Mecánico – verde	8.35 ± 0.46
Vía seca	Solar – tostado	2.27 ± 0.16
Vía seca	Liofilizado – tostado	2.29 ± 0.74
Vía seca	Mecánico – tostado	1.69 ± 0.36
Vía húmeda	Solar – verde	10.67 ± 0.51
Vía húmeda	Liofilizado – verde	12.97 ± 3.85
Vía húmeda	Mecánico – verde	11.64 ± 0.49
Vía húmeda	Solar – tostado	2.42 ± 0.14
Vía húmeda	Liofilizado – tostado	2.38 ± 0.49
Vía húmeda	Mecánico – tostado	2.72 ± 0.55

Fuente: elaboración propia con base en los resultados experimentales del estudio.

Durante los procesos de secado solar y mecánico, algunos compuestos tienden a degradarse debido a las altas temperaturas o a la presencia de oxígeno. En la liofilización, al no emplearse convección de aire caliente como mecanismo de remoción de humedad, se previene la oxidación y la degradación térmica de compuestos sensibles. Este proceso se divide en tres etapas importantes. La primera es la congelación, en la que el material se congela a temperaturas inferiores a −40 °C, formando cristales que ayudan a preservar la estructura celular. En la segunda etapa, conocida como secado primario, la presión de vacío (aproximadamente 2 kPa) provoca la sublimación del hielo, que pasa directamente a vapor, eliminando cerca del 90% del agua congelada. Finalmente, la etapa de secado secundario o desorción busca eliminar el agua residual que permanece ligada al material después del secado primario (Hariyadi et al., 2022).

Cafeína, trigonelina y ácidos clorogénicos en café de vía seca

El Cuadro 2 muestra los valores obtenidos de cafeína, trigonelina y ácidos clorogénicos en café verde y tostado procesado por vía seca. Se encontraron diferencias significativas en la concentración de ácidos clorogénicos entre la liofilización y el secado mecánico; sin embargo, no se observaron diferencias significativas frente al secado solar. El contenido de ácidos clorogénicos fue mayor en las muestras liofilizadas (67.37 ± 1.65 mg/g), seguido del secado solar (60.68 ± 5.33 mg/g), y menor en el secado mecánico (57.58 ± 0.51 mg/g). Diversos estudios sugieren que los ácidos clorogénicos del tipo 5-CQA pueden degradarse a temperaturas superiores a 37 °C, volviéndose inestables y transformándose en los isómeros 3-CQA y 4-CQA; adicionalmente, pueden oxidarse en presencia de oxígeno y luz solar, formando quinonas (Kulapichitr et al., 2022).

El contenido promedio de cafeína en café verde procesado por vía seca se obtuvo en el siguiente orden: liofilizado, solar y mecánico, con valores de 12.13 ± 0.54, 11.73 ± 1.13 y 10.89 ± 0.30 mg/g, respectivamente, sin diferencias significativas entre ellos. Un estudio realizado en café Robusta encontró un contenido de cafeína similar entre el secado solar y la liofilización, lo cual podría relacionarse con la estructura relativamente estable de la cafeína (Dong et al., 2017). En cuanto a la trigonelina, las mayores concentraciones se encontraron en el secado solar (15.72 ± 1.34 mg/g), seguido del secado mecánico (14.4 ± 0.09 mg/g) y, finalmente, la liofilización (13.17 ± 0.29 mg/g). Según Dong et al. (2017), la mayor concentración también se obtuvo con secado solar, aunque sin diferencias significativas. Asimismo, se observó que el contenido de ácidos clorogénicos disminuye después del tueste, debido a la degradación térmica que favorece la formación de nuevos compuestos, como lactonas, que contribuyen al amargor y cuerpo del café (Yeager et al., 2023). Como se observa en el Cuadro 2, la cafeína —al ser termoestable, con temperatura de degradación superior a 200 °C (Yeager et al., 2023)— se concentra durante el tueste, principalmente por la pérdida de agua y la liberación de compuestos volátiles (Awwad et al., 2021). Un efecto similar ocurre con la trigonelina, cuya degradación inicia a temperaturas superiores a 250 °C (Honda et al., 2022).

Cuadro 2. Contenido de cafeína (CAF), trigonelina (TRG) y ácidos clorogénicos (CGA) en café de vía seca (verde y tostado) sometido a tres tratamientos de secado: liofilización, mecánico y solar. Valores expresados como media ± desviación estándar en mg/g base seca. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$, Kruskal–Wallis/Dunn) dentro de cada compuesto y estado.

Compuesto	Estado	Tratamiento	Media ± DE (mg/g)	Grupo
CGA	Tostado	Liofilización	16.67 ± 3.94	a
CGA	Tostado	Mecánico	14.04 ± 2.04	a
CGA	Tostado	Solar	17.38 ± 0.79	a
CGA	Verde	Liofilización	67.37 ± 1.65	a
CGA	Verde	Mecánico	57.58 ± 0.51	b
CGA	Verde	Solar	60.68 ± 5.33	ab
CAF	Tostado	Liofilización	13.27 ± 0.65	a
CAF	Tostado	Mecánico	12.38 ± 0.40	a
CAF	Tostado	Solar	13.02 ± 0.46	a
CAF	Verde	Liofilización	12.13 ± 0.54	a
CAF	Verde	Mecánico	10.89 ± 0.30	a
CAF	Verde	Solar	11.73 ± 1.13	a
TRG	Tostado	Liofilización	12.37 ± 1.60	ab
TRG	Tostado	Mecánico	11.25 ± 0.76	a
TRG	Tostado	Solar	16.70 ± 0.17	b
TRG	Verde	Liofilización	13.17 ± 0.29	a
TRG	Verde	Mecánico	14.40 ± 0.09	a
TRG	Verde	Solar	15.72 ± 1.34	a

Fuente: elaboración propia con base en los resultados experimentales del estudio.

Cafeína, trigonelina y ácidos clorogénicos en café de vía húmeda

Se obtuvieron resultados similares para el café procesado por vía húmeda (Cuadro 3). Se observaron diferencias significativas en la concentración de ácidos clorogénicos entre el café obtenido por liofilización y el obtenido por secado mecánico y solar, con mayores concentraciones en las muestras liofilizadas. Las menores concentraciones de ácidos clorogénicos se asocian con la fecha de cosecha y el método de beneficio. Estudios previos han confirmado que el método de beneficio afecta significativamente el contenido de ácidos clorogénicos, dado que este compuesto es soluble en agua y tiende a disolverse y perderse durante el beneficio húmedo (Wulandari et al., 2021). Adicionalmente, pueden ocurrir otros procesos enzimáticos que conducen a la transformación de otros compuestos. La trigonelina es un compuesto parcialmente soluble en agua, lo que explica la menor concentración observada en el café de vía húmeda en comparación con el de vía seca; durante la fermentación y el lavado, la trigonelina se solubiliza parcialmente (Jeszka-Skowron et al., 2023).

Cuadro 3. Contenido de cafeína (CAF), trigonelina (TRG) y ácidos clorogénicos (CGA) en café de vía húmeda (verde y tostado) sometido a tres tratamientos de secado: liofilización, mecánico y solar. Valores expresados como media ± desviación estándar en mg/g base seca.

Compuesto	Estado	Tratamiento	Media ± DE (mg/g)	Grupo
CAF	Tostado	Liofilización	11.54 ± 0.74	–
CAF	Tostado	Mecánico	11.25 ± 0.06	–
CAF	Tostado	Solar	11.78 ± 0.92	–
CAF	Verde	Liofilización	10.31 ± 0.91	a
CAF	Verde	Mecánico	8.65 ± 0.21	a
CAF	Verde	Solar	7.95 ± 0.95	a
TRG	Tostado	Liofilización	8.5 ± 0.32	a
TRG	Tostado	Mecánico	8.56 ± 0.41	a
TRG	Tostado	Solar	8.8 ± 0.72	a
TRG	Verde	Liofilización	9.46 ± 0.69	a
TRG	Verde	Mecánico	10.36 ± 0.09	a
TRG	Verde	Solar	9.7 ± 0.58	a
CGA	Tostado	Liofilización	12.7 ± 0.83	–
CGA	Tostado	Mecánico	12.23 ± 1.55	–
CGA	Tostado	Solar	12.28 ± 1.59	–
CGA	Verde	Liofilización	37.89 ± 2.01	a
CGA	Verde	Mecánico	25.88 ± 4.70	ab
CGA	Verde	Solar	27.52 ± 4.44	ab

Fuente: elaboración propia con base en los resultados experimentales del estudio.

Conclusiones

El método de secado afectó significativamente el contenido de ácidos clorogénicos del café verde de *Coffea arabica var. Castillo*, tanto en el beneficio por vía seca como por vía húmeda.

La liofilización favoreció la conservación de estos compuestos, con concentraciones significativamente mayores que las obtenidas mediante secado mecánico, lo cual se relaciona con la ausencia de convección de aire caliente y, por tanto, con la menor exposición del grano a la oxidación y a la degradación térmica.

El contenido de cafeína no mostró diferencias significativas entre los métodos de secado evaluados, lo que es consistente con la mayor estabilidad térmica reportada para este compuesto. La trigonelina, por su parte, presentó las mayores concentraciones en el secado solar.

Estos resultados sugieren que la liofilización es una alternativa viable para preservar la calidad química del café verde, particularmente en cuanto a compuestos funcionales como los ácidos clorogénicos, sin afectar negativamente el contenido de cafeína.

Literatura Citada

Adams, G. (2007). The principles of freeze-drying. En J. M. Walker (Ed.), Methods in Molecular Biology (Vol. 368). https://doi.org/10.1007/978-1-59745-362-2_2

Açıkalın, B., & Sanlier, N. (2021). Coffee and its effects on the immune system. Trends in Food Science and Technology, 114, 625–632. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.023

Awwad, S., Issa, R., Alnsour, L., Albals, D., & Al-Momani, I. (2021). Quantification of caffeine and chlorogenic acid in green and roasted coffee samples using HPLC-DAD and evaluation of the effect of degree of roasting on their levels. Molecules, 26(24). https://doi.org/10.3390/molecules26247502

Cheng, K., Dong, W., Long, Y., Zhao, J., Hu, R., Zhang, Y., & Zhu, K. (2019). Evaluation of the impact of different drying methods on the phenolic compounds, antioxidant activity, and in vitro digestion of green coffee beans. Food Science and Nutrition, 7(3), 1084–1095. https://doi.org/10.1002/fsn3.948

Delgado, S. R., Arbeláez, A. F. A., & Rojano, B. (2019). Antioxidant capacity, bioactive compounds in coffee pulp and implementation in the production of infusions. Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria, 18(3), 235–248. https://doi.org/10.17306/J.AFS.2019.0663

Dong, W., Hu, R., Chu, Z., Zhao, J., & Tan, L. (2017). Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. Food Chemistry, 234, 121–130. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.156

Duarte, G. S., Pereira, A. A., & Farah, A. (2010). Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods. Food Chemistry, 118(3), 851–855. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.042

Hariyadi, T., Djali, M., Nurhadi, B., & Rosniawaty, S. (2022). The effect of freeze drying and determination of heat transfer on various maturity levels of Robusta coffee fruits. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 12(6).

Honda, M., Takezaki, D., Tanaka, M., Fukaya, M., & Goto, M. (2022). Effect of roasting degree on major coffee compounds: A comparative study between coffee beans with and without supercritical CO2 decaffeination treatment. Journal of Oleo Science, 71(10), 1541–1550. https://doi.org/10.5650/jos.ess22194

International Organization for Standardization. (2003). Green coffee — Determination of loss in mass at 105 °C (ISO 6673:2003).

Jeszka-Skowron, M., Frankowski, R., Zgoła-Grześkowiak, A., & Płatkiewicz, J. (2023). Comprehensive analysis of metabolites in brews prepared from naturally and technologically treated coffee beans. Antioxidants, 12(1). https://doi.org/10.3390/antiox12010095

Kieu Tran, T. M., Kirkman, T., Nguyen, M., & Van Vuong, Q. (2020). Effects of drying on physical properties, phenolic compounds and antioxidant capacity of Robusta wet coffee pulp (Coffea canephora). Heliyon, 6(7). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04498

Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Fang, M., Suppavorasatit, I., & Cadwallader, K. R. (2022). Effect of post-harvest drying process on chlorogenic acids, antioxidant activities and CIE-Lab color of Thai Arabica green coffee beans. Food Chemistry, 366. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130504

Naegele, E. (2013). Determination of chlorogenic acid in coffee products according to DIN 10767 (Nota de aplicación Agilent n.º 5991-2852EN).

Navarra, G., Moschetti, M., Guarrasi, V., Mangione, M. R., Militello, V., & Leone, M. (2017). Simultaneous determination of caffeine and chlorogenic acids in green coffee by UV/Vis spectroscopy. Journal of Chemistry, 2017. https://doi.org/10.1155/2017/6435086

Sánchez-Riaño, A. M., Vega-Oliveros, C., Ladino-Garzón, W. L., Orozco-Blanco, D. A., Bahamón-Monje, A. F., Gutiérrez-Guzmán, N., & Amorocho-Cruz, C. M. (2024). Effects of cherries sanitization methods and fermentation times on quality parameters of coffee beans. Heliyon, 10(13). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33508

Sanz-Uribe, J. R., & Velásquez-Henao, J. (2022). Producción de café con fermentaciones incompletas y fermentaciones prolongadas utilizando el Fermaestro®. Revista Cenicafé, 73(1), e73105. https://doi.org/10.38141/10778/73105

Silva, C. S. da, Coelho, A. P. de F., Lisboa, C. F., Vieira, G., & Teles, M. C. de A. (2022). Post-harvest of coffee: factors that influence the final quality of the beverage. Revista Engenharia na Agricultura – REVENG, 30, 49–62. https://doi.org/10.13083/reveng.v30i1.12639

Soeswanto, B., Lintang Edi Wahyuni, N., & Prihandini, G. (2021). The development of coffee bean drying process technology - A review.

Torres-Valenzuela, L. S., Martínez, K. G., Serna-Jiménez, J. A., & Hernández, M. C. (2019). Drying of coffee pulp: Process parameters, mathematical model and its effect over physicochemical properties. Información Tecnológica, 30(2), 189–200. https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000200189

Wulandari, S., Ainuri, M., & Sukartiko, A. C. (2021). Biochemical content of Robusta coffees under fully-wash, honey, and natural processing methods. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 819(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/819/1/012067

Yeager, S. E., Batali, M. E., Guinard, J. X., & Ristenpart, W. D. (2023). Acids in coffee: A review of sensory measurements and meta-analysis of chemical composition. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63(8), 1010–1036. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1957767

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Simulación sistemática mediante redes neuronales artificiales para determinación del contenido de carbono orgánico en suelos ejidales

Eduardo Michelle Martínez Crucess[1], Raquel Salazar Moreno[1], Oscar Fernández Fernández[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

El cambio climático genera desafíos ambientales y socioeconómicos urgentes, pero también oportunidades para la investigación. Una estrategia clave es la participación voluntaria en el mercado de emisiones de carbono.
Siendo que el suelo es el mayor sumidero terrestre de carbono, la presente investigación busca modelar variables edafológicas bajo proyecciones computacionales.
Se modeló un ecosistema de carbono orgánico en suelos de uso forestal, mediante la correlación de variables relacionadas a los procesos de formación de suelo, tomando puntos georreferenciados de pendiente topográfica del ejido Tequexquináhuac, municipio de Texcoco Estado de México, compuestos por suelos tipo Cambisol a 20 centímetros de profundidad.
Mediante consulta de literatura emitida por WRB (2022) se eligieron parámetros de referencia para las variables densidad aparente, colorimetría, pH, pendiente y contenido de carbono orgánico, por lo que mediante un algoritmo de RNA el análisis de sensibilidad paramétrica y algoritmo de Garson con ajuste de regresión del 83.65% ($R^2 = 0.8365$), indicaron que la variable edáfica que más contribuye al contenido de carbono en suelos es la densidad aparente con un 43.3% de influencia seguido por la saturación de color en suelos hidratados con un 25% de influencia respectivamente. Por otra parte, se observó poco y nulo efecto de la luminosidad (Value) de los suelos hidratados como secos, el pH y la pendiente topográfica.

Palabras clave: Edafología, perceptrón multicapa, regularización bayesiana, colorimetría, forestería.

Abstract

Climate change poses urgent environmental and socioeconomic challenges, while also creating opportunities for scientific research. A key strategy to address it is voluntary participation in the carbon emissions market.
Given that soil is the largest terrestrial carbon sink, this research aims to model edaphic variables using computational projections. An organic carbon ecosystem in forest land-use soils was modeled by correlating variables related to soil formation processes, taking georeferenced points of topographic slope in the Tequexquináhuac *ejido*, municipality of Texcoco, State of Mexico, composed of Cambisol type soils at a depth of 20 centimeters. Through the literature consultation emitted by WRB (2022) reference parameters were chosen as variables like bulk density, colorimetry, pH, slope, and organic carbon content from stratified sampling, an ANN algorithm was designed.

[1]Posgrado en Ingeniería Agricola y Uso integral del Agua, Universidad Autónoma de Chapingo, Carretera México – Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P 56230, MÉXICO. edu.mcrucess89@gmail.com; rsalazarm@chapingo.mx; ofernadezf@chapingo.mx

Through parametric sensitivity analysis and Garson's algorithm with a regression adjustment of 83.65% ($R^2 = 0.8365$), the model indicated that the edaphic variable contributing the most to soil carbon content is bulk density with a 43.3% influence, followed by color saturation in moist soils with a 25% influence, respectively. On the other hand, little to no effect was observed from soil lightness (*Value*) in both moist and dry states, pH, and topographic slope.

Keywords: Soil science, multilayer perceptron, Bayesian regulation, colorimetry, forestry.

Introducción

La creciente concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, particularmente el dióxido de carbono CO_2 ha intensificado el cambio climático global, impactando severamente la resiliencia de los ecosistemas y la seguridad alimentaria. Desde el inicio de la era industrial, las actividades antropogénicas han incrementado la concentración de CO_2atmosférico en un 50%, superando las 420 ppm, niveles sin precedente en los últimos 800,000 años. (NASA.2023).
A nivel global, la vegetación y el suelo juegan un papel crítico mediante los ciclos estacionales de fotosíntesis y secuestro de carbono; sin embargo, este ciclo natural es actualmente insuficiente para mitigar las emisiones industriales. En este escenario, la propiedad social en México —que abarca más de la mitad del territorio nacional— se presenta como un actor clave. El Ejido Tequexquináhuac (Figura 1) posee masas forestales y suelos agrícolas con un potencial de sumidero de carbono que ha sido históricamente subestimado y carece de cuantificación precisa.

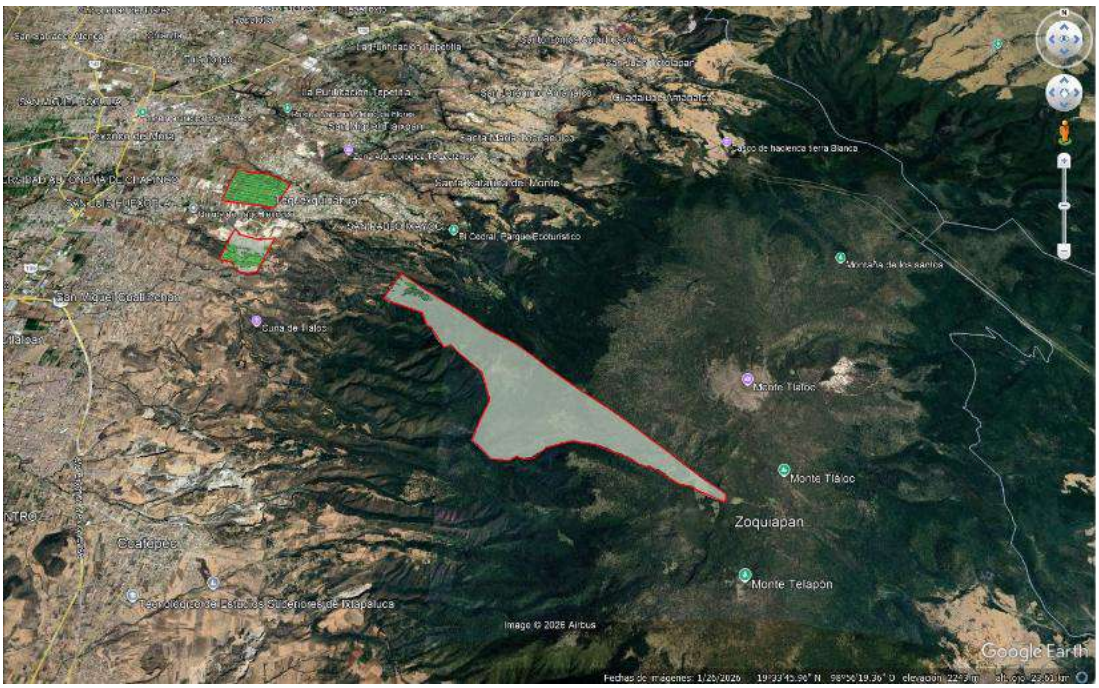


Figura 23 Proyección geográfica en Google Earth del ejido Tequexquináhuac

La presente investigación se justifica en la necesidad de transitar de mediciones globales generalizadas a estimaciones locales de alta precisión. Mediante el uso de Redes Neuronales Artificiales (RNA), es posible modelar la interacción entre el clima, el uso de suelo y medición

de variables reales de suelos ejidales para determinar su potencial como sumideros de carbono. Este enfoque no solo genera conocimiento científico, sino que empodera a las comunidades como agentes estratégicos en la mitigación del cambio climático.

La cuantificación del Carbono Orgánico del Suelo en México atraviesa una etapa de transición tecnológica. Actualmente, la Inteligencia Artificial (IA) se posiciona como una herramienta disruptiva para estudiar la dinámica del carbono. *Grunwald* (2022) destaca que el *Deep Learning* permite modelar la acumulación y respiración de carbono mediante la integración de variables ambientales complejas como la taxonomía de suelos, topografía, litología y actividades humanas. (Figura 2)



Figura 24 Tierras de uso común del ejido Tequexquináhuac compuesta de suelos Cambisol

No obstante, la implementación tecnológica enfrenta desafíos críticos. *Reshmi & Ray* (2025) señalan que, si bien la detección remota satelital facilita el mapeo climático y edafológico de forma accesible, su capacidad está limitada a la superficie del suelo. Esta tecnología presenta dificultades para medir variables a distintas profundidades y para capturar la influencia directa de las prácticas de manejo agrícola en los modelos de acumulación de carbono.

En el ámbito nacional, el secuestro de carbono se determina mediante métodos tradicionales de cobertura forestal, sin embargo, ha tenido un impacto limitado en las políticas públicas debido a la falta de monitoreo continuo, el bajo reconocimiento institucional del suelo como mitigador climático y los elevados costos logísticos del muestreo extensivo.

Ante este panorama, el presente proyecto identifica y aborda tres áreas de oportunidad fundamentales:

Validación Local: Superar la carencia de observaciones de campo en modelos regionales mediante el análisis de laboratorio y muestreos en campo.

Integración Vertical de Datos: Resolver la limitación de la percepción remota integrando variables edáficas brutas (profundidad, pH, densidad aparente).

Impacto Social Transversal: Conectar la innovación tecnológica con la propiedad social, superando el aislamiento actual del sector agrario frente a la ciencia climática.

Esta investigación integra el muestreo estratificado, el análisis químico y la detección satelital para su procesamiento mediante RNA. Este enfoque no solo optimiza recursos mediante el uso de valores de referencia para densidades, sino que genera información geoespacial del Ejido Tequexquináhuac, funcionando como una vía de transición científica hacia beneficios sociales y ambientales tangibles.

Materiales y métodos

Criterio de variables edafológicas y topográficas

Se determino mediante una simulación de Matlab (*R2023b/Deep learning toolbox*) un ecosistema de carbono orgánico en suelos presentado un sistema compuesto por pH, densidad aparente y colorimetría en estado húmedo y seco respecto a la luminosidad y saturación de color en suelos, respetivamente y porcentaje de pendiente, basada en los principios de formación de suelo y literatura consultada WRB. (2022)
El sistema se estructuró mediante una red neuronal artificial de tipo Perceptrón Multicapa supervisada, entrenada mediante combinaciones distintas de algoritmos de aprendizaje, siendo seleccionada Regulación Bayesiana (*br*)

El modelo se compone por un vector de entrada de siete variables (Cuadro 1) y la variable de salida objetivo (D) corresponde al contenido de carbono orgánico del suelo (COS, %), el cual se estimó a partir del contenido de materia orgánica del suelo (MO, %) utilizando el factor de conversión de Van Bemmelen (0.58), asumiendo que la materia orgánica contiene aproximadamente 58 % de carbono. Este procedimiento es comúnmente empleado para suelos tipo Cambisol, por lo tanto:

$$COS = MO * 0.58 \quad (1)$$

Cuadro 5 Variables del vector de entrada en la RNA

Entrada	Unidades	Variable
x_1	D_a , $g * cm^{-3}$	Densidad aparente
x_2, x_3	$Value_H$ $Chroma_H$	Colorimetría en estado húmedo para determinar luminosidad y saturación de color respecto a la escala de color Munsell

$x_{4,}x_5$	$Value_S$ Chroma_S	Colorimetría en estado seco para determinar luminosidad y saturación de color respecto a la escala de color Munsell
x_6	$pH = -\log[H^+]$	Potencial de hidrógeno
x_7	%	Pendiente topográfica del terreno

El procesamiento y arquitectura del algoritmo en Matlab se implementó mediante las siguientes funciones matemáticas y de programación (Cuadro 2)

Cuadro 2 Funciones matemáticas y de activación utilizadas en la arquitectura

Funciones matemáticas y de programación	**Aplicación**
$mapminmax$	Normalización de los datos
$tansig$	Función sigmoide tangente hiperbólica en las capas ocultas para procesar interacciones no lineales
$purelin$	Función lineal en la capa de salida (D)
$fitnet$	Configuración de la red neuronal hacia adelante y ajuste iterativo de pesos y sesgos minimizando el error cuadrático medio (MSE)
abs, sum	Algoritmo de Garson implementado mediante operaciones matriciales sobre los pesos de las conexiones interneuronales (W_{ij} y W_{jk}) para cuantificar el impacto relativo de cada parámetro edáfico en la predicción del carbono orgánico en suelos

En la escala Munsell estándar, la luminosidad (Value) varía de 0 (negro absoluto) a 10 (blanco puro), mientras que la saturación (Chroma) cuantifica la pureza del color desde 1 hacia valores más altos. Los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y la humina presentes en la materia orgánica

absorben fuertemente la luz en el espectro visible. por lo tanto, un incremento en la concentración de humus genera una pigmentación más oscura (disminución drástica del Value). Asimismo, la presencia de humedad altera la refracción de la luz sobre las películas orgánicas, intensificando la saturación cromática (Figura 3)



Figura 25 Determinación de color de suelo seco y suelo húmedo con fundamento en Value y Chroma

Manejo de los datos de colorimetría

El sistema Munsell los tonos oscuros (ricos en materia orgánica) presentan valores numéricos bajos, se aplicó una transformación lineal explícita sobre la matriz de atributos cromáticos para invertir la escala. De este modo, magnitudes numéricas mayores corresponden a una mayor intensidad de humus.

Normalización de magnitudes

Se aplicó la función de procesamiento de Matlab *mapminmax* para homologar el peso de las escalas en la que números grandes opacan a números pequeños, permitiendo que todas las entradas (X) y la salida (D) adopten un intervalo estandarizado [0, 1]

Arquitectura y configuración del perceptrón multicapa

Para la arquitectura de la RNA se implementó un Perceptrón Multicapa (MLP) mediante retro propagación (*backpropagation*) en MATLAB. La red consta de una capa de entrada con 7 variables edafológicas y topográficas, una capa oculta con 15 neuronas definidas bajo el criterio heurístico de Kolmogorov-Arnold (2N + 1) y una capa de salida correspondiente al contenido de Carbono Orgánico del Suelo.

Evaluación de Desempeño

Se realizó una evaluación comparativa de 10 experimentos combinando diversos algoritmos de entrenamiento y funciones de aprendizaje (p. ej., Levenberg-Marquardt, Regularización Bayesiana, Gradiente de escala conjugada, BFGS Quasi-Newton).
La selección del modelo óptimo se basó en la maximización del Coeficiente de Determinación (R^2) y la minimización del Error Cuadrático Medio (MSE) en la fase de prueba.

$$(MSE) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (\gamma i - \hat{\gamma} i)^2 \quad (2)$$

Algoritmo de Garson y Sensibilidad Paramétrica

Para evaluar la contribución de las variables edáficos dentro de la caja negra de la red se implementaron dos métodos:

Análisis de Garson: Se cuantificó la importancia relativa de cada variable de entrada en la arquitectura de pesos sinápticos, uniendo la capa de entrada, la capa oculta y la capa de salida.

Sensibilidad Paramétrica: Se evaluó el impacto funcional a cada predictor manteniendo las demás una deviación estándar mientras las variables se mantienen en su valor medio, registrando el porcentaje de cambio en la salida predicha $(\hat{\gamma})$

Resultados y discusión

El análisis comparativo de la etapa de benchmarking demostró que la ruta de entrenamiento de Regularización Bayesiana (*trainbr*) presenta la mayor convergencia R^2= 0.8373 **(**Figura 4**)** demostrando una solidez metodológica sin llegar al sobreajuste (*overfitting*) en relación con otras rutas.

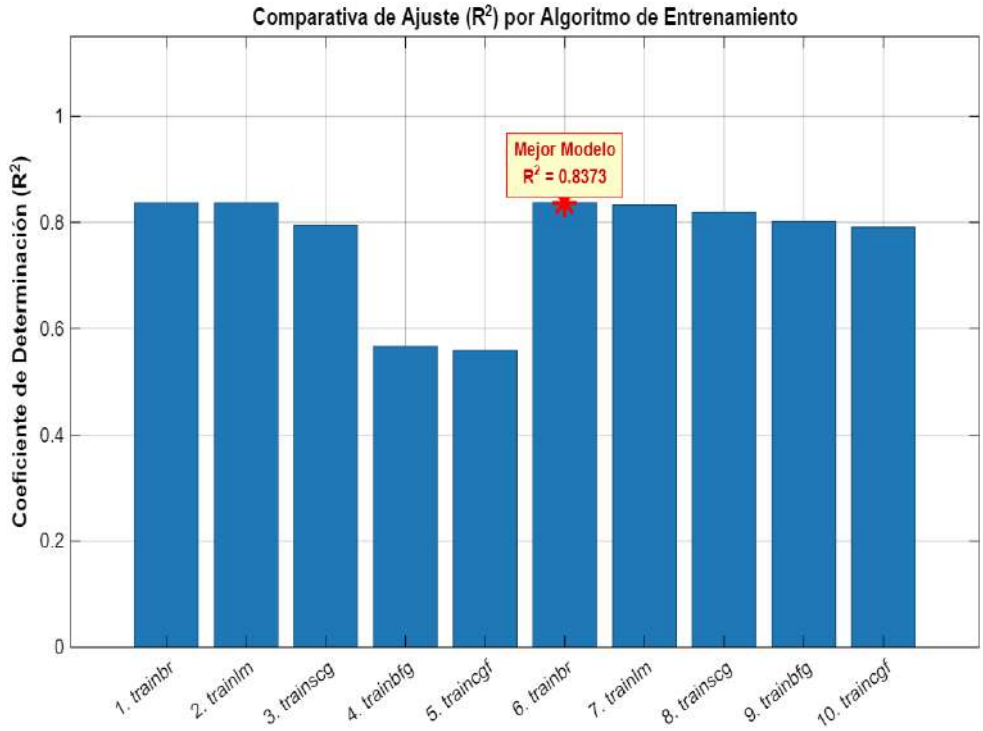


Figura 26 Coeficiente de determinación para distintos algoritmos de entrenamiento

Como se observa en la (Figura 5), el modelo alcanzó un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.8365$ y R = 0.9146, mediante regresión lineal

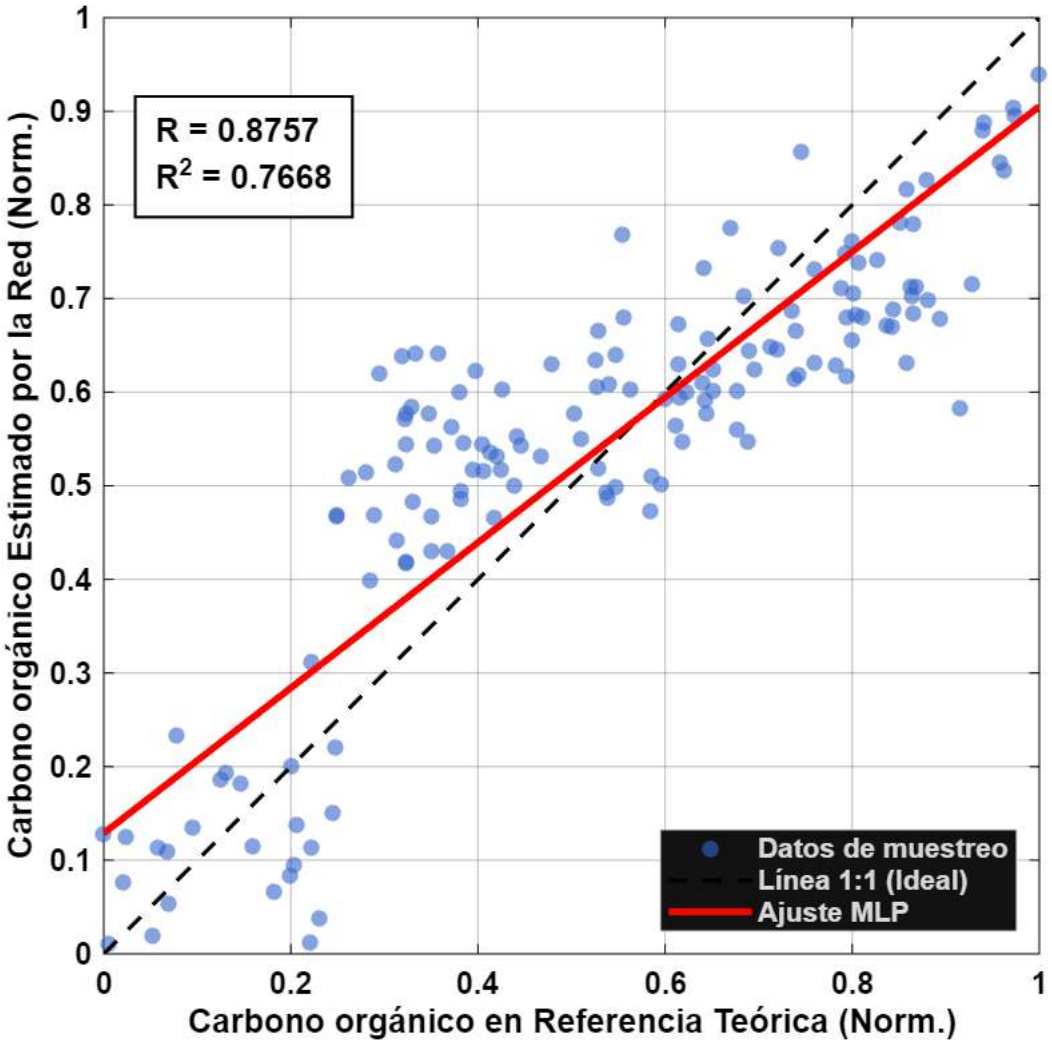


Figura 27. Modelo de regresión lineal sobre los datos de muestreo la ruta de entrenamiento trainbr.

El análisis de sensibilidad (Figura 6) determinó la influencia que tiene cada variable en la salida de carbono orgánico, mientras se mantiene a las demás variables constantes (Cuadro 3).

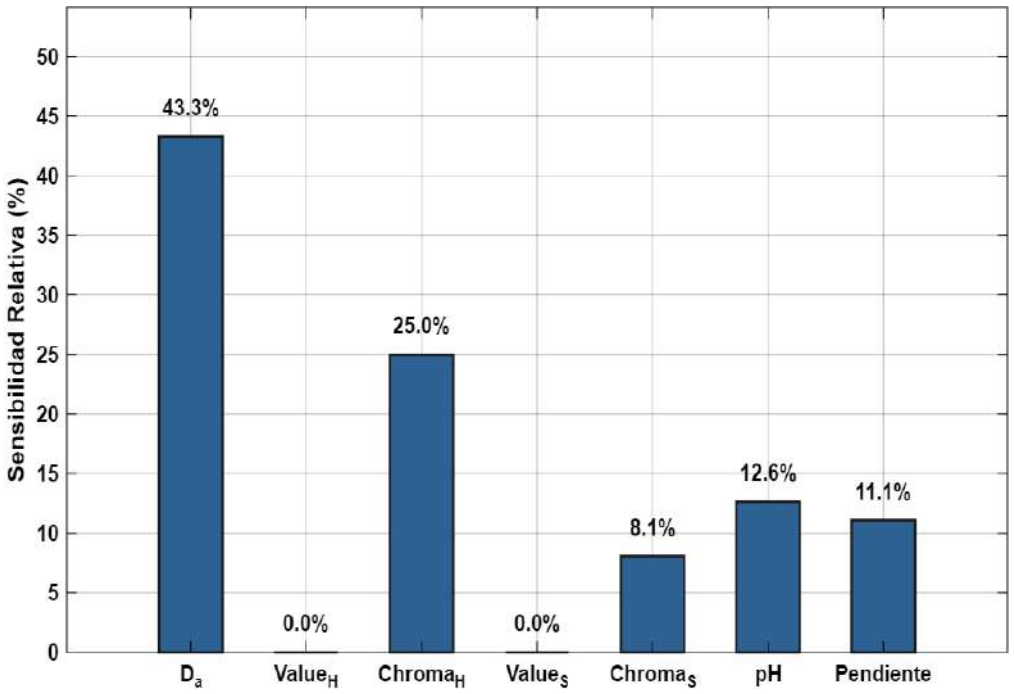


Figura 28 Análisis de sensibilidad paramétrica**Cuadro 3** – Análisis de sensibilidad paramétrica

Variable	**Contribución paramétrica**
D_a	Es la variable con más impacto operacional en el desarrollo del carbono orgánico en suelos, si se sufre pequeñas variaciones o es removida la salida sufre cambios de gran envergadura
$Chroma_H$	Variable con una contribución moderada al desarrollo del carbono orgánico en suelos, su importancia es modesta, pero funciona como un complemento a la densidad aparente para determinar niveles de ajuste más robustos.
$Chroma_S$ $Value_H$ $Value_S$ pH Pendiente	Son variables con poco o nulo impacto operacional en el experimento debido a que no alteran la predicción sobre la variable de salida.

Al aplicar el algoritmo de Garson para desglosar la "caja negra" de la red (Figura **7**), se evidenció que la saturación de color en estado húmedo de suelos (Chroma_H) domina la arquitectura interna de pesos sinápticos, alcanzando una contribución estructural superior al 40%. Esto se debe a que los ácidos húmicos y fúlvicos se encuentran en un estado de mayor solubilidad y dispersión, intensificando la pigmentación cromática del perfil.
Por el contrario, las variables de luminosidad (Value_H y Value_S) mostraron un peso sináptico reducido debido a la baja variabilidad espacial de los tonos claros en la zona de estudio, lo que llevó a la red a descartar la luminosidad como un discriminante primario.

La estabilidad del carbono está regida por puentes catiónicos de Ca^{2+} y microagregación organo-mineral, manteniéndose en una plataforma de saturación uniforme donde variaciones de 0.5 unidades de pH no alteran drásticamente la masa acumulada del carbono organico.
Respecto al pH se menciona que el ecosistema de simulación tiene unos valores reportados de 6.5 a 8.0 de pH, el cual se encuentran en un rango de **neutralidad**, lo que mantiene la degradación de la materia orgánica en una tasa de cambio muy discreta, demostrando que el efecto que el pH tiene sobre el contenido de carbono orgánico en suelos no es significativo en el experimento.

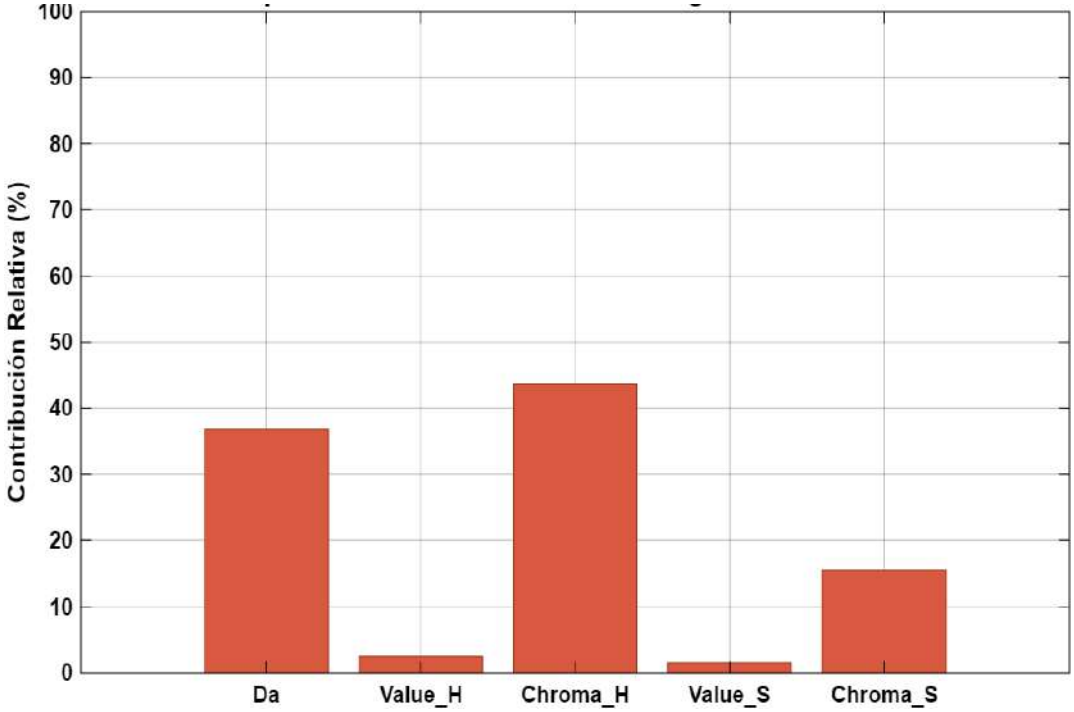


Figura 29 Importancia relativa de variables - Garson

Conclusión

En el presente trabajo se simuló la naturaleza sistémica del carbono orgánico en el suelo, identificando la densidad aparente y la saturación de color como indicadores clave para estimar su presencia y potencial de captura. A partir de estos resultados, se consolida la conservación de los suelos forestales como una estrategia prioritaria de combate contra el cambio climático. La preservación de esta cobertura es determinante, pues la degradación del suelo, los incendios y la extracción aceleran drásticamente la pérdida del carbono acumulado. Asimismo, la implementación de prácticas sostenibles en el manejo del suelo forestal convierte la cuantificación del carbono capturado, en una estrategia para la emisión de certificados o beneficios económicos dentro del mercado voluntario de emisiones.
Esta monetización representa un incentivo clave para los ejidos, al ofrecer un retorno financiero tangible que contrapesa la falta de ingresos inmediatos habitual en la conservación a largo plazo. Finalmente, se sugiere que futuras investigaciones incorporen la determinación in situ de variables edáficas, climáticas y topográficas para desarrollar modelos predictivos más robustos que permitan el desarrollo de bases de datos más completas.

Literatura citada

CONABIO. (2026). Subdirección de Sistemas de Información Geográfica, México. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/ [Consulta: 05 de marzo de 2026].

NASA. (2023). Carbon Dioxide. Global Climate Change: Vital Signs of the Planet. Recuperado de: https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/ [Consulta: 05 de marzo de 2026].

IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources 2022: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (4th ed.). International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna.

Grunwald, S. (2022). Artificial intelligence and soil carbon modeling demystified: power, potentials, and perils. Carbon Footprints, 1(1), 5. https://doi.org/10.20517/cf.2022.03

Sarkar, R., & Ray, R. L. (2025). Application of artificial neural network algorithms to estimate spatial soil organic carbon stock in Prairie lands from remote sensing and soil data pool. Geocarto International, 40(1), Artículo 2597423. https://doi.org/10.1080/10106049.2025.2597423

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Predicción de la temperatura de deshidratado mediante redes neuronales artificiales LSTM en el interior de un secador solar tipo invernadero

Baltazar López Velasco[1], Agustín Ruiz García[1], Irineo Lorenzo López Cruz[1], Ángel Garduño García[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

El objetivo de esta investigación fue desarrollar una red neuronal artificial de memoria a corto y largo plazo (LSTM), para predecir un paso hacia adelante la temperatura del aire (T_a) durante el deshidratado de plátano dominico en un secador solar tipo invernadero. Se utilizaron como entradas variables medidas del clima exterior del secador y considerando a la variable de control al tiempo de encendido/apagado de los extractores (t_ext). Del análisis de correlación se obtuvo que las variables que más influyeron en la predicción de T_a fueron la radiación solar global (R_g) y el déficit de presión de vapor (VPD). Con base en los estadísticos de ajuste se obtuvo que el número óptimo de unidades de memoria de LSTM fue de 100, 100 y 75 usando el método de entrenamiento Adam, RMSprop y SGDM, respectivamente. De la evaluación de las redes LSTM con diferentes métodos de entrenamiento y periodos de inicialización de la memoria de las redes LSTM (offset), todas obtuvieron un ajuste mayor del 96%, un error máximo de 2.25 °C y un error promedio de 1.66 °C en validación. Las redes LSTM desarrolladas predicen de forma satisfactoria la T_a y se pueden utilizar para el diseño de un controlador automático para el control de la temperatura de deshidratado de plátano.

Palabras clave: *Musa paradisiaca variedad sapientum*, propagación de la raíz cuadrática media (*RMSprop*), secado solar.

Abstract

The aim of this study was to develop a Long Short-Term Memory (LSTM) artificial neural network for one-step-ahead prediction of air temperature during the dehydration of banana in a greenhouse-type solar dryer. Variables measured from the outdoor environment of the dryer were used as model inputs, while the on/off operating time of the exhaust fans was considered as the control variable. Correlation analysis showed that global solar radiation and vapor pressure deficit (VPD) were the variables with the greatest influence on air temperature prediction. Based on the goodness-of-fit statistics, the optimal numbers of LSTM memory units were 100, 100, and 75 when using the Adam, RMSprop, and SGDM training algorithms, respectively. The LSTM networks were evaluated using different training algorithms and memory initialization periods (offsets). All models achieved a fit greater than 96%, with a maximum validation error of 2.25 °C and a mean validation error of 1.66 °C. The developed LSTM networks satisfactorily predicted air temperature and therefore represent a suitable approach for the design of an automatic controller for temperature regulation during banana dehydration.

[1] Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO. baltazarlv@outlook.com; aruizg@chapingo.mx; ilopezc@chapingo.mx; agardunog@chapingo.mx

Keywords: *Musa paradisiaca* var. *sapientum;* Root Mean Square Propagation (RMSprop); solar drying.

Introducción

Los productos agrícolas como el plátano son fundamentales para la salud humana debido a su alto contenido en vitaminas, fibra, minerales y compuestos bioactivos, que poseen propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y anticancerígenas (Abbey *et al*., 2023). Sin embargo, es difícil conservar los productos agrícolas frescos durante largos períodos debido a su alto contenido de humedad y susceptibilidad al crecimiento microbiano (Ziv & Fallik, 2021). El secado es un método común para deshidratar productos agrícolas y extender su vida útil (Wu *et al*., 2022).
Los secadores solares tipo invernadero son sistemas sostenibles que utilizan energía renovable para su funcionamiento, reduciendo tanto el consumo de energía, así como las emisiones de CO_2 (Goel *et al*., 2024). Estos sistemas juegan un papel importante en la reducción de las pérdidas postcosecha (30-40 %) al mismo tiempo reducen los costos de secado hasta en un 50% (Shimpy *et al*., 2023).
Por otro lado, el modelado matemático es una herramienta fundamental para comprender los principios de transferencia de calor y masa, predecir el rendimiento del producto y optimizar los procesos de secado en el interior de estos sistemas (Fan *et al*., 2025). Sin embargo, debido al comportamiento altamente no lineal del proceso de secado, resulta complejo determinar el rendimiento de los secadores solares. Por lo anterior, es un desafío buscar nuevas alternativas prácticas para predecir la temperatura del aire dentro de la cámara de un secador solar, con el fin de mejorar los diseños y optimizar el funcionamiento (Tlatelpa Becerro *et al*., 2023).
Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son uno de los modelos más efectivos para predecir el comportamiento de sistemas térmicos (Tlatelpa Becerro *et al*., 2023). Entre las diferentes arquitecturas de RNA, destacan las redes neuronales artificiales de memoria a corto y largo plazo (LSTM) por su capacidad para modelar comportamientos no lineales. Su estructura permite reducir el problema de disminución del gradiente, facilitando almacenar o descartar información históricamente relevante de forma eficiente. Aunque las redes LSTM no se han utilizado para la predicción del clima en secadores solares, han demostrado un desempeño superior al de otras arquitecturas de RNA, como las redes NARX, en la predicción de variables del clima en sistemas similares como los invernaderos de cultivos agrícolas (Jung *et al*., 2020; Liu *et al*., 2022; Yang *et al*., 2023).
El objetivo de la presente investigación fue predecir la temperatura del aire de deshidratado en el interior de un secador solar tipo invernadero durante el deshidratado de plátano utilizando una red LSTM.

Materiales y Métodos

Descripción del secador solar

Las pruebas de secado de plátano dominico (*Musa paradisiaca* var. *sapientum*) se llevaron a cabo en un secador solar parabólico tipo invernadero (Figura 1a) con dimensiones de 10 × 9 m de base y 3.5 m de altura. El sistema está construido de acero galvanizado, cuenta con piso de concreto reforzado, cubierta de policarbonato de doble pared de 0.006 m de espesor y con protección contra rayos UV. En la parte frontal cuenta con dos entradas de aire cada una con 0.3 × 1.5 m y en la pared trasera tiene instalados dos extractores con capacidad de 9,435 m^3 h^{-1} cada uno, accionados mediante motores monofásicos de 0.5 HP. Estos extractores son utilizados para controlar el flujo de aire en el interior del secador y así disminuir la temperatura.

Experimento de deshidratado

Se realizaron tres experimentos de deshidratado de plátano los días 11, 18 y 26 de marzo de 2023, utilizando plátanos con un grado de maduración de 6 a 7 según la escala estándar de Von Loesecke. Los plátanos se pelaron y extendieron como una capa delgada sobre las mesas de secado en el interior del secador (Figura 1b). En el sistema de control se estableció que la temperatura del aire no excediera 50°C, temperatura máxima recomendada para el deshidratado de plátano (Nimnuan & Nabnean, 2022). Durante las pruebas, en la noche las muestras se guardaron en bolsas selladas herméticamente para evitar cambios en su contenido de humedad, y los experimentos finalizaron cuando el producto alcanzó un peso aproximadamente constante.

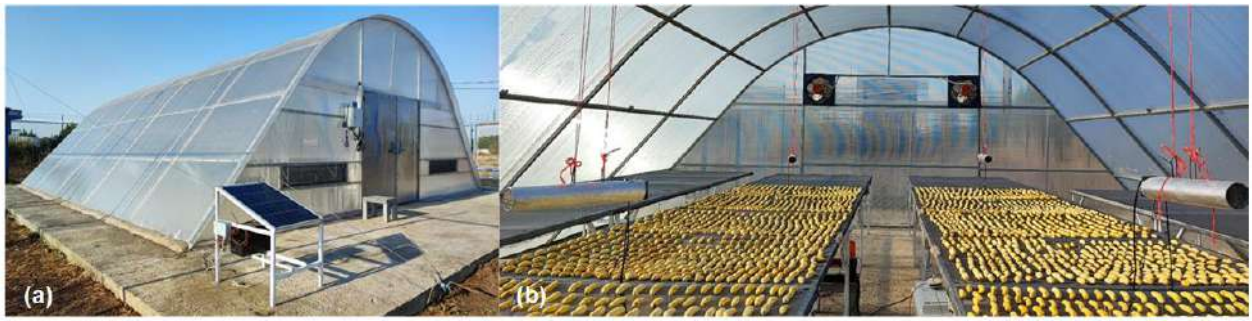


Figura 1. a) Secador solar parabólico tipo invernadero y b) deshidratado de plátano dominico.

Mediciones y sistema de registro de datos

Las variables climáticas en el interior del secador fueron medidas como se describe a continuación (Figura 2). La temperatura T_a (°C) y humedad relativa RH (%) con sensores bme680 (Bosch Sensortec, precisión ±1°C y ±3%, rango de -40° a +85°C y de 0 a 100%) colocados por arriba de las muestras y protegidos de la radiación solar mediante tubos horizontales de 0.5 m de longitud recubiertos de aluminio (Erell *et al*., 2005). La radiación solar global R_g (W m^{-2}), la temperatura T_{am} (°C), humedad relativa RH_{am} (%), velocidad W_s (m s^{-1}) y dirección del viento W_d (°) en el ambiente exterior se registraron cada minuto con una estación meteorológica HOBO U30 (Onset Computer Corporation, EE. UU.).

La pérdida de peso del producto en el tiempo se registró en cuatro muestras en el secador (M_1, M_2, M_3, M_4) (Figura 1 y 2), que se pesaron en intervalos de 0.5 h utilizando una balanza digital VE-1000 con una precisión de ± 0.01 g (Microscopios VELAB). Los experimentos comenzaron con el registro del peso inicial de cada una de las muestras. Al finalizar, el porcentaje de materia seca en las muestras se determinó mediante el método de la estufa, el cual consiste en deshidratar la muestra a 105 °C durante 24 h.

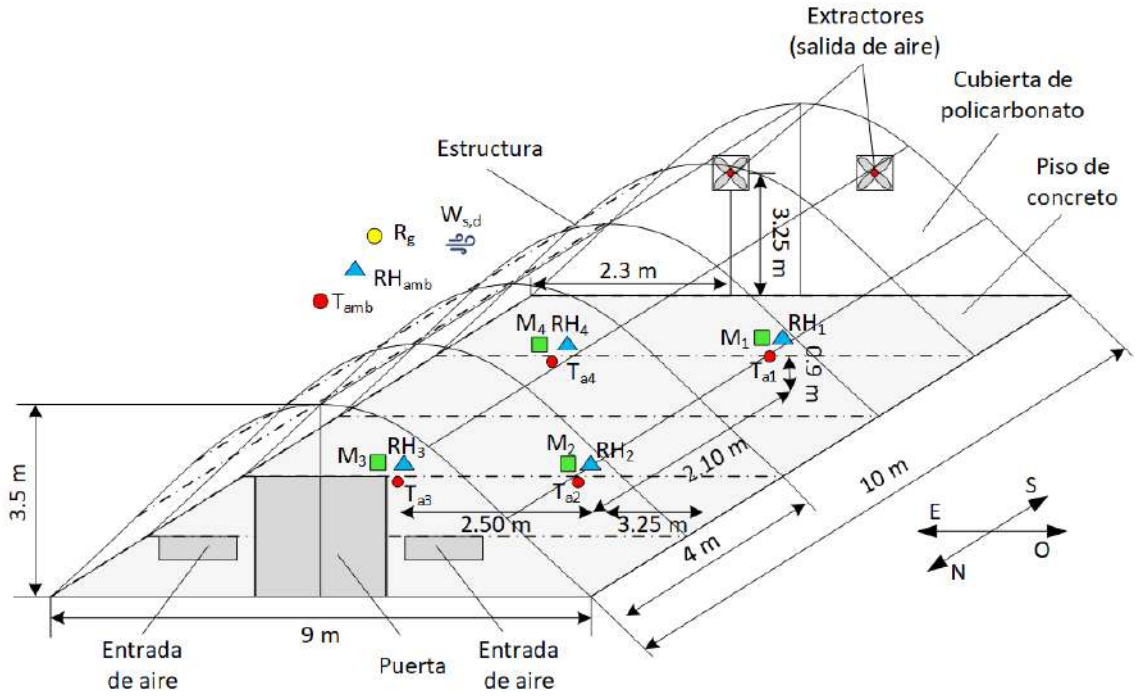


Figura 2. Distribución de los sensores de medición para la temperatura (T_a) y humedad del aire (RH) dentro del secador, muestras del producto (M), temperatura (T_{am}) y humedad del aire (RH_{am}), velocidad (W_s) y dirección del viento (W_d) del clima exterior.

Selección de las variables de entrada

Las variables de entrada para la red LSMT fueron la temperatura (T_{am}) y humedad (RH_{am}) del aire del clima exterior del secador, velocidad del viento exterior (W_s), radiación solar global (R_g) y el déficit de presión de vapor (VPD) calculada con la T_{am} y RH_{am}, con la finalidad de obtener un modelo simple para predecir la temperatura del aire de deshidratado (T_a). Se realizó un análisis de correlación entre las variables de entrada (T_{am}, RH_{am}, W_s, R_g y VPD) y la T_a, para elegir correctamente las variables de entrada, agregando la variable de control (t_{ext}) como variable de entrada.

Construcción de los modelos de RNA-LSTM

Las redes LSTM se construyeron utilizando una arquitectura en lazó cerrado, con el conjunto de datos normalizado y utilizando los datos del primer y segundo experimento para entrenamiento y los del tercer experimento para validación. Se buscó desarrollar un modelo apropiado, sin sobre ajuste, junto con una baja demanda computacional. Por ello, para determinar la estructura óptima de las RNA, se realizaron una serie de pruebas de optimización: se varió el número de unidades de memoria de la red LSTM (*HiddenUnits*) en 25, 50, 75 y 100 unidades, para cada uno de los siguientes métodos de entrenamiento: *Adam* (Estimación adaptativa del momento), *RMSprop* (Propagación de la raíz cuadrática media) y *SGDM* (Descenso de gradiente estocástico con momento). El periodo de inicialización de la memoria de las redes LSTM (*offset*) se estableció en 25. Una vez encontrado el número de unidades de memoria para cada uno de los tres métodos se varió el periodo de inicialización de 25, 50, 75 y 100. Cada una de las pruebas se realizó durante 10 entrenamientos seleccionando la mejor red en función del coeficiente de determinación (ecuación 2) en cada iteración. Los modelos de redes LSTM se entrenaron durante 300 épocas utilizando una tasa de aprendizaje inicial de 0.001, un umbral de gradiente de 1 y un esquema de tasa de aprendizaje por partes con un factor

de reducción de 0.2 cada 100 épocas, preservando el orden temporal de los datos al deshabilitar la reordenación aleatoria de muestras.

Las estadísticas de ajuste utilizadas para evaluar el desempeño de las redes LSMT fueron: el coeficiente de determinación (R^2), el error medio absoluto (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

$$\bar{Y} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Y_i \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{m}(X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^{m}(\bar{Y} - Y_i)^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} |X_i - Y_i| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m}}\sum_{i=1}^{m}(X_i - Y_i)^2 \quad (4)$$

donde X_i es el i-ésimo valor predicho, Y_i es el i-ésimo valor observado e $\bar{Y}$ es la media de los datos observados (Chicco *et al*., 2021).

Resultados y discusión

Variables de entrada a los modelos

La Figura 3 muestra la correlación que tienen las variables del clima exterior del secador, respecto a la T_a. La R_g es la variable que tiene una mayor correlación de 0.89, seguida por la T_{am}, la RH_{am} y el VPD, mientras que la velocidad del viento muestra una baja correlación con la T_a ($R < 0.5$). Dado que el VPD tiene un alto índice de correlación y que se calcula en función de dos variables (T_{am} y RH_{am}) altamente correlacionadas con la T_a, al usarlo en lugar de estas dos variables se reduce el número de variables de entrada al modelo y lo simplifica. Por lo anterior, se decidió utilizar como variable de entrada al VPD en conjunto con la R_g y el t_{ext}.

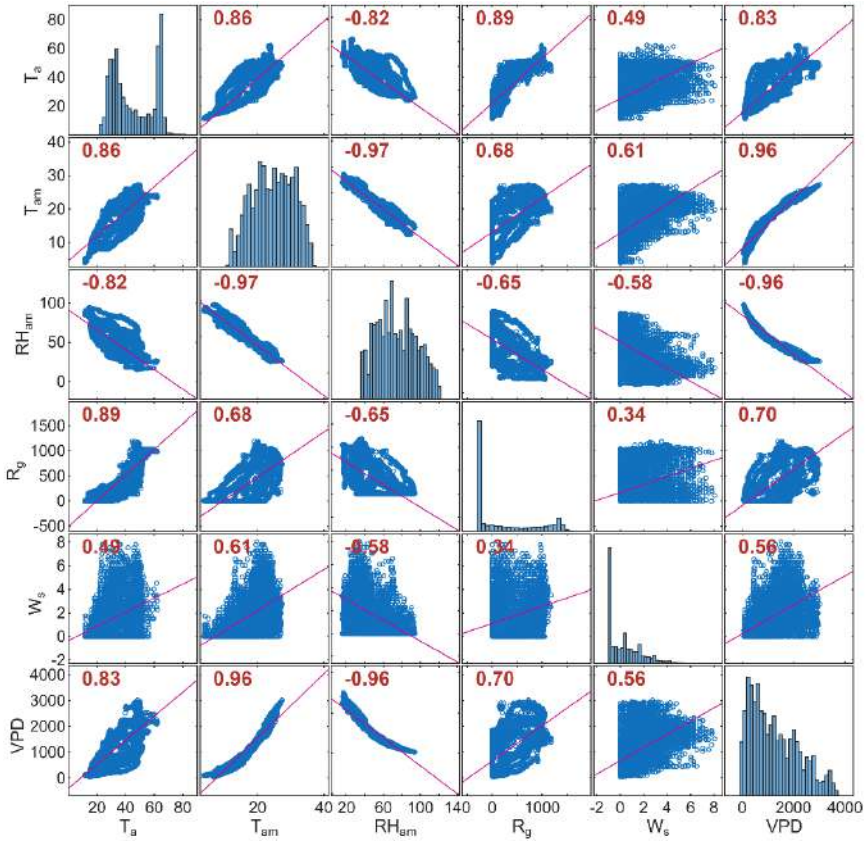


Figura 3. Matriz de correlación de la T_a respecto a las variables del clima exterior del secador.

Mejores modelos de RNA-LSTM.

Para el caso de los modelos de redes neuronales artificiales de memoria a corto y largo plazo (LSTM) desarrollados para predecir la T_a, los estadísticos indican que el número óptimo de unidades de memoria de la red LSTM (*HiddenUnits*) son 100, 100 y 75 cuando se usa el método de entrenamiento *Adam*, *RMSprop* y *SGDM*, respectivamente (Cuadro 1). De los tres métodos de entrenamiento empleados para las redes LSTM, el método *RMSprop* fue el que obtuvo mejor ajuste en general, seguido por el método *Adam*, mientras que el método *SGDM* fue el que menor calidad de ajuste obtuvo con un $R^2 < 0.98$ en validación.

Cuadro 1. Modelos de redes neuronales LSTM obtenidos con diferentes métodos de entrenamiento y *HiddenUnits*.

HiddenUnits	**Método de entrenamiento *Adam***					
	Entrenamiento			***Validación***		
	R^2	***RMSE***	***MAE***	R^2	***RMSE***	***MAE***
25	0.99348	1.07487	0.64076	0.98946	1.30816	0.71116
50	0.99300	1.11421	0.67561	0.99079	1.22323	0.74532
75	0.99413	1.02050	0.63974	0.99315	1.05436	0.61765
100	**0.99509**	**0.93353**	**0.54107**	**0.99330**	**1.04312**	**0.59098**
HiddenUnits	**Método de entrenamiento *RMSprop***					
	Entrenamiento			**Validación**		
	R^2	***RMSE***	***MAE***	R^2	***RMSE***	***MAE***
25	0.99573	0.87001	0.52218	0.99415	0.97468	0.52660
50	0.99594	0.84832	0.48868	0.99447	0.94791	0.50401
75	0.99590	0.85215	0.48734	0.99521	0.88194	0.49150

100	**0.99586**	**0.85656**	**0.48136**	**0.99536**	**0.86841**	**0.48831**

HiddenUnits	**Método de entrenamiento *SGDM***					
	Entrenamiento			**Validación**		
	R^2	***RMSE***	***MAE***	R^2	***RMSE***	***MAE***
25	0.98364	1.70321	1.30438	0.96222	2.47699	1.87149
50	0.98012	1.87766	1.51817	0.97842	1.87181	1.34714
75	**0.98347**	**1.71204**	**1.43039**	**0.97862**	**1.86340**	**1.33401**
100	0.98630	1.55859	1.25708	0.96865	2.25643	1.60759

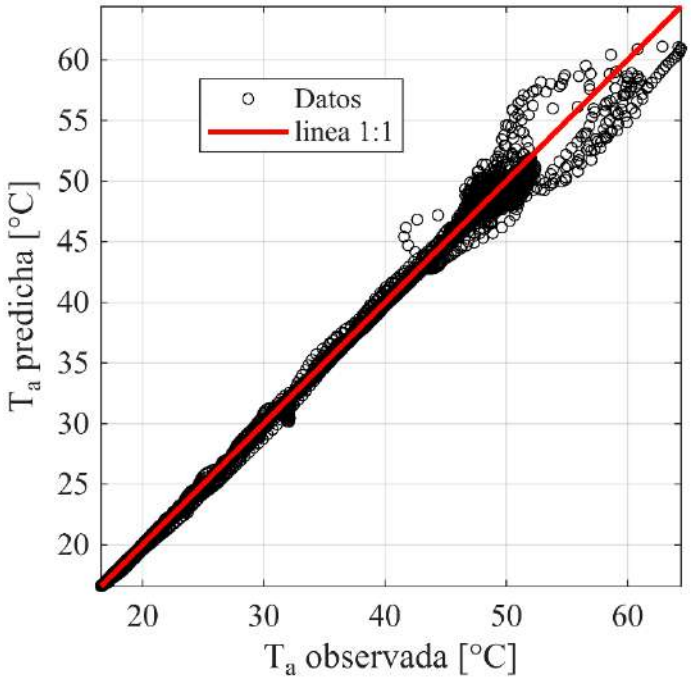
El algoritmo de entrenamiento *RMSprop* obtuvo el mejor desempeño para la predicción de la temperatura en todos los valores de *offset* evaluados, alcanzando valores de R^2 mayores a 0.995 y los menores errores en validación (Cuadro 2). Con la configuración de 100 *HiddenUnits* y un *offset* de 100 se obtuvo el mejor rendimiento (R^2 = 0.99589, RMSE = 0.81685 °C y MAE = 0.45799 °C). El algoritmo *Adam* también mostro un buen desempeño; mientras que el algoritmo *SGDM* presentó los mayores errores en predicción, lo que indica una menor capacidad de predicción de la temperatura un minuto hacia adelante.

Cuadro 2. Modelos de redes neuronales artificiales LSTM obtenidos con diferentes métodos de entrenamiento y *offset*.

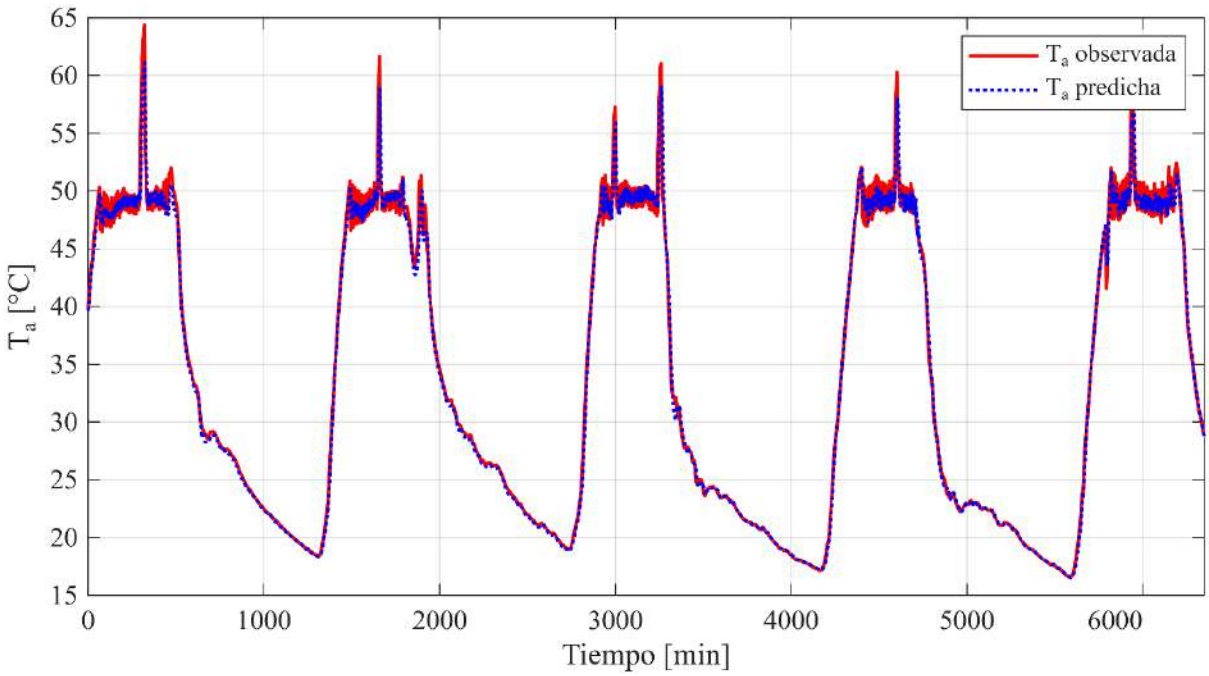
offset	**Método de entrenamiento *Adam* con 100 *HiddenUnits***					
	Entrenamiento			**Validación**		
	R^2	***RMSE***	***MAE***	R^2	***RMSE***	***MAE***
25	0.99509	0.93353	0.54107	0.99330	1.04312	0.59098
50	0.99478	0.96308	0.58312	0.99336	1.03849	0.60161
75	0.99561	0.88542	0.50615	0.99428	0.96385	0.53225
100	0.99541	0.90589	0.51408	0.99393	0.99319	0.57411
offset	**Método de entrenamiento *RMSprop* con 100 *HiddenUnits***					
	Entrenamiento			**Validación**		
	R^2	***RMSE***	***MAE***	R^2	***RMSE***	***MAE***
25	0.99586	0.85656	0.48136	0.99536	0.86841	0.48831
50	0.99584	0.85993	0.49407	0.99544	0.86041	0.46485
75	0.99606	0.83816	0.47057	0.99572	0.83329	0.47175
100	**0.99612**	**0.83325**	**0.48327**	**0.99589**	**0.81685**	**0.45799**
offset	**Método de entrenamiento *SGDM* con 100 *HiddenUnits***					
	Entrenamiento			**Validación**		
	R^2	***RMSE***	***MAE***	R^2	***RMSE***	***MAE***
25	0.98347	1.71204	1.43039	0.97862	1.86340	1.33401
50	0.97877	1.94298	1.58375	0.97919	1.83831	1.43012
75	0.98569	1.59782	1.21934	0.97324	2.08441	1.53307
100	0.98185	1.80247	1.52471	0.96895	2.24541	1.65695

La Figura 4 muestra el comportamiento de la temperatura de secado (T_a) observada y predicha por la red LSTM con la mejor configuración de parámetros (*RMSprop*, 100 *HiddenUnits* y *offset* de 100). La distribución de los datos alrededor de la línea 1:1 muestra una alta relación entre los datos observados y los predichos, confirmando la capacidad de la RNA para la predicción de la T_a un paso hacia adelante (un minuto). Se observa una mayor dispersión en el intervalo de temperaturas más elevadas que van de los 50°C a los 60°C, lo cual se debe a una falla en el sistema de control durante los experimentos que provocó la presencia de valores atípicos

superiores a los 50°C, dificultando el proceso de predicción. De igual forma, alrededor de los 50° C se observa un aumento en la dispersión debido al rápido cambio en la dinámica del sistema ocasionado por la activación de los extractores para el control de la T_a. Estos resultados coinciden con estudios recientes que han utilizado con éxito las redes LSTM para modelar series temporales no lineales de temperatura del aire en invernaderos, donde la capacidad de las redes LSTM para capturar dependencias de largo plazo permite obtener predicciones más precisas que otro tipo de modelos basados en el perceptrón multicapa y redes NARX (Jung *et al*., 2020; Yang *et al*., 2023). Igualmente, la dispersión observada en temperaturas elevadas ha sido reportada en la predicción de la temperatura del aire en un invernadero durante el cultivo de tomate, pepino y pimiento, atribuyéndose a la rápida variabilidad de la temperatura en el interior del sistema (Liu *et al*., 2022).



(a)



(b)

Figura 4. Comparación del valor de la T_a observada y predicha un paso hacia adelante mediante la red LSTM entrenada mediante el algoritmo *RMSprop* con 100 *HiddenUnits* y un *offset* de 100: (a) relación 1:1 entre los valores observados y predichos y (b) evolución temporal de los valores observados y predichos.

Conclusiones

Se evaluaron redes neuronales artificiales LSTM para predecir la temperatura del aire del clima interior durante el deshidratado de plátano dominico en un secador solar tipo invernadero, utilizando como entradas variables del clima exterior del secador. Se propuso combinar las variables de T_{am} y RH_{am} en una sola variable mediante el cálculo del VPD, para reducir el número de variables de entrada a las redes LSTM y así simplificar su arquitectura. El análisis de correlación ayudo a determinar las variables del clima exterior que mayor relevancia tienen para predecir la T_a, permitiendo que las redes LSTM obtenidas presenten una bondad de ajuste similar al de otros investigadores que usan un mayor número de variables de entrada. Las redes LSTM obtenidas que integran a la señal de control como variable de entrada presentaron una bondad de ajuste mayor del 96% en predicción de un paso hacia adelante sobre el conjunto de datos de entrenamiento y validación. Por lo que, las redes LSTM obtenidas al ser confiables pueden emplearse para el diseño de sistemas de control automático del proceso de secado de plátano.

Literatura citada

Abbey, Lord, MacDonald, M., & Ampofo, J. (2023). Fruit and Vegetable Production. *Plants*, *12*(17), 3125. https://doi.org/10.3390/plants12173125

Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, *7*, e623. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623

Erell, E., Leal, V., & Maldonado, E. (2005). Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: an assessment of assively ventilated thermometer screens. *Boundary-Layer Meteorology*, 114(1), 205–231. https://doi.org/10.1007/s10546-004-8946-8

Fan, L., Pei, Y., Zhang, L., Kong, J., & Xu, W. (2025). Applications of Machine Learning Models in Agricultural Product Drying: A Comprehensive Review of Advances, Challenges, and Prospects. *Food and Bioprocess Technology*, *18*(12), 10047–10085. https://doi.org/10.1007/s11947-025-04055-6

Goel, V., Dwivedi, A., Singh Mehra, K., Kumar Pathak, S., Tyagi, V. V., Bhattacharyya, S., & Pandey, A. K. (2024). Solar drying systems for Domestic/Industrial Purposes: A State-of-Art review on topical progress and feasibility assessments. *Solar Energy*, *267*, 112210. https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112210

Jung, D.-H., Kim, H. S., Jhin, C., Kim, H.-J., & Park, S. H. (2020). Time-serial analysis of deep neural network models for prediction of climatic conditions inside a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, *173*, 105402. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105402

Liu, Y., Li, D., Wan, S., Wang, F., Dou, W., Xu, X., Li, S., Ma, R., & Qi, L. (2022). A long short-term memory-based model for greenhouse climate prediction. *International Journal of Intelligent Systems*, *37*(1), 135–151. https://doi.org/10.1002/int.22620

Nimnuan, P., & Nabnean, S. (2022). Improvement of the Thepsatri Rajabhat-type household solar dryer for drying bananas. *Journal of Energy Systems*, 6(4), 573–582.

Shimpy, Kumar, M., & Kumar, A. (2023). Designs, Performance and Economic Feasibility of Domestic Solar Dryers. *Food Engineering Reviews*, *15*(1), 156–186. https://doi.org/10.1007/s12393-022-09323-1

Tlatelpa Becerro, A., Rico Martínez, R., López-Vidaña, E. C., Montiel Palacios, E., Torres Segundo, C., & Gadea Pacheco, J. L. (2023). Dynamic Behavior Forecast of an Experimental Indirect Solar Dryer Using an Artificial Neural Network. *AgriEngineering*, *5*(4), 2423–2438. https://doi.org/10.3390/agriengineering5040149

Wu, J., Zhang, L., & Fan, K. (2022). Recent advances in ultrasound-coupled drying for improving the quality of fruits and vegetables: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, *57*(9), 5722–5731. https://doi.org/10.1111/ijfs.15935

Yang, Y., Gao, P., Sun, Z., Wang, H., Lu, M., Liu, Y., & Hu, J. (2023). Multistep ahead prediction of temperature and humidity in solar greenhouse based on FAM-LSTM model. *Computers and Electronics in Agriculture*, *213*, 108261. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108261

Ziv, C., & Fallik, E. (2021). Postharvest Storage Techniques and Quality Evaluation of Fruits and Vegetables for Reducing Food Loss. *Agronomy*, *11*(6), 1133. https://doi.org/10.3390/agronomy11061133

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Modelos de respuesta de biomasa, rastrojo, rendimiento y componentes en arroz y la densidad de plantación

José Alberto Salvador Escalante Estrada[1], Yolanda Isabel Escalante Estrada[2], Luis Enrique Escalante Estrada[3], Cid Aguilar Carpio[4]

Mesa 1: Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

En México, el arroz (*Oryza sativa* L) ocupa el cuarto lugar en consumo. El objetivo del presente estudio fue determinar la respuesta, a la densidad de plantación (DP) en arroz para: 1) los días a ocurrencia a etapas fenológicas 2) la biomasa, el rendimiento en grano (RG) y sus componentes; 3) la relación entre la biomasa, RG y sus componentes; 4) el mejor modelo que estime el RG en función de sus componentes y 5) la rentabilidad de la producción de arroz. El estudio se realizó en Iguala, Guerrero, México de clima cálido subhúmedo (Aw), durante el ciclo Primavera-Verano de 2018, bajo riego en un vertisol, de textura arcillosa, con pH 7.7. Los tratamientos fueron las DP de 8 (35*35), 11.(30*30), 16 (25*25) y 25 (20*20) plantas por m^2. El diseño experimental fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los resultados indican que el cambio en DP no afecta los días a etapas fenológicas. Hasta con 11 plantas m^{-2} fue el óptimo para mayor altura de planta, tamaño de espiga, macollos m^{-2}, índice de cosecha y RG (730 g m^{-2}). En contraste, con 25 plantas m^{-2} se logra la mayor biomasa y rastrojo. El RG por macollo, macollos por planta y m^{-2}, altura de planta y longitud de espiga presentan una correlación alta con el RG. El modelo que mejor estima a este, involucra la altura de planta y longitud de panícula. Con 11 mil y 16 mil plantas ha^{-1}, se logra la ganancia por peso invertido más alta.

Palabras clave: fenología, altura de planta, índice de cosecha, número de macollos, longitud de espiga.

Abstract

In Mexico, rice (*Oryza sativa* L.) ranks fourth in consumption. The objective of this study was to determine the response of rice to planting density (PD) regarding: 1) the timing of phenological stages; 2) biomass, grain yield (GY), and its components; 3) the relationship between biomass, GY, and its components; 4) the best model to estimate GY based on its components; and 5) the profitability of rice production. The study was conducted in Iguala, Guerrero, Mexico—a region with a warm sub-humid climate (Aw)—during the 2018 Spring-Summer cycle. It was carried out under irrigation on a clay-textured Vertisol with a pH of 7.7. The treatments consisted of PD of 8 (35x35 cm), 11 (30x30 cm), 16 (25x25 cm), and 25 (20x20 cm) plants per m^2. A randomized complete block design with four replications was used. The results indicate that changes in PD did not affect the timing of phenological stages. A density of 11 plants m^{-2} was optimal for maximizing plant height, panicle size, tillers m^{-2}, harvest index, and GY (730 g m^{-2}).

[1]Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Postgrado de Botánica. Carretera México-Texcoco. KM 36.5, Texcoco, Estado de México. jasee@colpos.mx; * autor de correspondencia
[2]Universidad Autónoma del Estado de Guerrero, Chilpancingo, Guerrero, México.
[3]Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero. Cocula, Guerrero, México.

In contrast, the highest biomass and stubble yields were achieved at a density of 25 plants m^{-2}. GY per tiller, tillers per plant and per m^2, plant height, and panicle length showed a high correlation with GY. The best model for estimating GY incorporates plant height and panicle length. The highest return on investment was achieved at densities of 11,000 and 16,000 plants ha^{-1}.

Keywords: phenology, plant height, harvest index, number of tillers, panicle length.

Introducción.

En México, el arroz (*Oryza sativa* L) ocupa el cuarto lugar de los granos básicos que consume la población y es uno de los cultivos objetivo donde se pretende la autosuficiencia nacional. El grano de arroz es rico en vitamina B, calcio, fósforo, hierro, sodio, potasio, bajo contenido de grasa, altamente digerible y no contiene fructosa. Por lo general, se utiliza como guarnición en los platillos típicos. También en la industria cervecera, elaboración de harinas, en la fabricación de alimentos balanceados para consumo animal (SADER, 2023a). Según datos del SIACON (2023), la producción total de arroz superó las 246 mil toneladas en 2022, de este total, la participación de los principales estados productores son los siguientes: Nayarit 29.9%, Campeche 18.8%, Michoacán 13.6%, Veracruz 12.5% y Jalisco 8.7%, de manera conjunta superaron más del 80% de la producción total. Hasta 1988, México fue autosuficiente en la producción de arroz. En 2022, la producción nacional fue de 246 mil toneladas, mientras que el consumo fue de 1.2 millones de toneladas, lo que quiere decir que se cubrió solo 20.5% del consumo nacional, por lo que se importaron 954 mil toneladas, principalmente de Estados Unidos de América y Uruguay, esta tendencia continuará, se estima que para el año 2030 las importaciones habrán superado las 1 000 t.). Actualmente existe una dependencia de las importaciones de este grano. El Arroz Palay es aquel que aún conserva la cascarilla (glumas) o cubierta, con una textura ligeramente áspera. El color del grano es amarillo paja a café claro. En el Estado de Guerrero se extiende en la Región Montaña – Costa Chica y Costa Grande. En el Municipio con mayor producción es Huamuxtitlán con 1,296.36 toneladas (SADER, 2023b). Tradicionalmente, se cultiva en suelo inundado. Por otra parte, los residuos de cosecha como el rastrojo (paja) del arroz también tienen interés comercial, ésta incluye el raquis de la panícula, las vainas, láminas de las hojas y el tallo. Se pueden utilizar en la industria (biocombustible, biogás etanol, papel y fertilizantes) como forraje (por su contenido de proteína), para mejorar la estructura del suelo y como cobertura muerta al suelo (La contaminación, 2021) ha mostrado ser eficaz en el control de maleza; incluso de algunas se han extraído compuestos solubles en agua que inhiben la germinación y crecimiento de las plántulas de diversas especies de maleza (Nagabhushana, *et al.* 1997). La densidad de población (o densidad de siembra) es uno de los factores de manejo agronómico más determinantes en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), ya que regula la competencia intraespecífica por luz, agua y nutrientes, ajustando la arquitectura del dosel y mediante modificaciones en el tamaño del dosel y los componentes del rendimiento. El comportamiento del arroz (*Oryza sativa*) frente a variaciones en la densidad de población se describe mediante modelos ecofisiológicos y matemáticos específicos para biomasa, rendimiento y sus componentes. A diferencia de otros cereales con baja plasticidad, el arroz presenta una alta capacidad de ahijamiento (macollamiento), lo que modifica fuertemente la dinámica entre la densidad inicial y la productividad final. Ortiz *et al.* (2020), reportan que las densidades de población apropiadas para alcanzar un rendimiento alto de arroz, bajo las condiciones edafoclimáticas de Cuba, se deben lograr más de 150 plantas m^{-2}, que garanticen alrededor de 350 a 400 panículas m^{-2} Cruz *et al*. (2023), reportan que cuando se sembró de 140

a 160 kg ha^{-1}, comprobaron que densidades de siembra altas no siempre conlleva a mayor rendimiento porque se incrementó la distribución y la incidencia de las enfermedades, lo que afectó, , el número de granos llenos por panícula y el peso de mil granos. El rendimiento más alto se logró con la siembra de 120 y 140 kg ha^{-1}. El objetivo del presente estudio fue determinar la respuesta, la dosis óptima de fósforo en arroz para: 1) los días a ocurrencia a etapas fenológicas 2) la biomasa, el rendimiento en grano y sus componentes; 3) la relación entre la biomasa, rendimiento en grano y sus componentes; 4) el mejor modelo que estime el rendimiento en grano en función de sus componentes y 5) la rentabilidad de la producción de arroz en función de la densidad de plantación.

Materiales y Métodos

Sitio experimental

El estudio se realizó en Iguala Guerrero, México (18º 25´ N, 99º 35`O y 731 msnm de altitud) de clima cálido subhúmedo (Aw, García, 2004). En un vertisol, en sus primeros 30 cm del perfil de textura arcillosa, buena retención de humedad, pH 7.7, sin problemas de salinidad (0.18 dS m^{-1}), 1.7 a 2.2% de materia orgánica (pobre), 45 kg de $N\text{-}NO_3$ y 14 ppm de fósforo (medio a alto), durante el ciclo Primavera-Verano de 2018 bajo condiciones de riego de auxilio inicial y régimen de lluvia. El clima de esta región se clasifica según Köppen modificado por García (2004), como Awo (w) (i)g, cuyas siglas nos indican que Awo es el más seco de los cálidos subhúmedos con lluvias en Verano y con un cociente <P/T 43.2; (w) nos dice que el porcentaje de lluvia invernal <5 de la anual; (i) denota que hay poca oscilación entre 5 y 7°C; señala que el mes más caliente del año se presenta antes de junio; teniendo una temperatura media anual de 23°C. La precipitación media anual es de 797 mm.

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos fueron cuatro y consistieron en densidades de plantación de 8 (35*35), 11 (30*30), 16 (25*25) y 25 (20*20) plantas por m^2, distribuidos en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. El tamaño de la parcela experimental fue de 15 m^2 (5 x 3 m) de los cuales se cosecharon 8 m^2 (4 x 2 m) que se consideraron como parcela útil, dejando 0.5 m de bordo, la separación entre parcelas fue de 0.5 m a todo el experimento se aplicó 80 kg de nitrógeno en forma de urea; y 80 kg de fósforo en forma de superfosfato simple (19.5% de P_2O_5) aplicado antes de la siembra.

Variedad sembrada

La variedad Morelos A-98 denominación de origen, se sembró en almácigo el 30 de abril y se trasplantó a los 28 días (28 de mayo 2018). Esta variedad se caracteriza por ser resistente al acame y al ataque de la enfermedad “Quema de Arroz” causada por el hongo *Pyricularia oryzae*, la planta presenta 130 cm de altura, floración y madurez fisiológica a los 104 y 178 días de la siembra, respectivamente (Salcedo y Barrios, 2013).

Cosecha

Cuando el grano alcanzó su madurez fisiológica (180 días) y su contenido de humedad fue de 21%, se procedió a cosechar en forma manual la parcela útil de cada tratamiento.

Variables registradas

Elementos del clima y fenología

Promedio de temperatura máxima, mínima y la suma de la precipitación (mm) durante el desarrollo del cultivo.

Los días a ocurrencia a la emergencia (E), floración (F) y madurez fisiológica (MF). A la MF, se realizó la cosecha, se tomaron de la parcela útil y fueron las siguientes: rendimiento peso del grano (RG) al 12 % de humedad del grano. En 10 plantas se registró los componentes del RG como: número de macollos por planta (MP) y por m^2 (MS), rendimiento en grano por macollo (RM) altura de la planta (AP), longitud de panícula (LP) y tamaño de grano (g, TG). El número de granos m^{-2} (NGS), se determinó con el planteamiento RG/ TG; el índice de cosecha (IC) con (RG/BT)*100.

Se aplicó un análisis de varianza (ANDEVA) a las variables en estudio, la prueba de comparación de medias de Tukey y análisis de correlación y regresión para determinar el grado de dependencia entre variables y mediante el procedimiento Stepwise, el modelo que mejor estime el rendimiento en función de sus componentes. El paquete estadístico SAS versión 9.0 fue utilizado para este fin (SAS, 2001).

Resultados y Discusión

Elementos del clima

La temperatura mínima y máxima durante el desarrollo del cultivo osciló para MF entre 20-22 ^oC y 33-38 ^oC, respectivamente. Durante el ciclo del cultivo la lluvia fue de 730 mm.

Fenología

Los cambios en DP no afectaron los días a ocurrencia a etapas fenológicas. Así, la fecha de siembra del almácigo fue el 30 abril; trasplante (30 de mayo 2018) (28 días de edad), la emergencia (E), a los 8 dds, la floración (F, antesis) fue a los 102 días del trasplante y la cosecha 180 días después del trasplante.

Rendimiento y sus componentes

Con excepción del TG, el ANDEVA mostró diferencias significativas para la BT, RG, NG, LP y AP, por efecto de los cambios en DP (Cuadro 1). El RG se incrementó conforme aumentó la DP. El RG más alto (730 g m^{-2}) se logró con la DP de 11 plantas m^{-2} a DP más altas este disminuye hasta 454 g m^{-2}. Lo que indica que la mayor interferencia por insumos reduce el desarrollo de la planta y el RG. La respuesta en BT, RG y RASTROJO presentó una tendencia que se ajustó a un polinomio de segundo grado como se presenta en la figura 1, con sus mínimos (8 y 25 plantas por m^{-2}) y su máximo (11plantas m^{-2}).

Cuadro 1. Rendimiento y sus componentes en arroz (*Oryza sativa* L.) cultivar Morelos A-98 en función de la densidad de población. Verano 2018. Iguala Gro.

PL m^{-2}	RG	NG	RGM	TG	MP	MS	AP	LP
25	454c	1513df	2c	0.0031	225c	9c	134b	28b
16	676b	2080b	3bc	0.0032	272a	17ab	155a	31a
11	730a	2232	4b	0.00327	200b	18a	157a	31a
8	502c	1619c	7a	0.00310	74cd ++	9c	139b	29a
TUKEY0.05	50	100	1	¿?	70	7	10	2

Probabilidad de F	**	**	**	NS	*	*	**	**

RG= rendimiento de grano; TG= peso individual del grano (g); NGS= número de granos m^{-2}; MS= macollos por m^{-2}; RGM= rendimiento en grano (g) por macollo; AP = altura de la planta (cm); LP = longitud de panoja (inflorescencia); PF 0.01 y 0.05, **, *, respectivamente. NS = diferencias no significativas al 0.05 de probabilidad de F.

Materia seca total, Índice de cosecha, rendimiento en grano y rastrojo.

La BT, IC, y RASTROJO presentaron una respuesta semejante a la encontrada con el RG (figura 1) y sus componentes inmediatos con mínimos en las DP más baja y alta y máximo en este caso a 16 plantas m^{-2}. En cuanto el IC más alto con 11 plantas m^{-2} , indica que en esta DP las plantas son más eficientes en acumular mayor materia seca en el grano ya sea por fotosíntesis y traslocación de lo almacenado (Cuadro 2).

Cuadro 2. Biomasa, rendimiento en grano, índice de cosecha y rastrojo en arroz (*Oryza sativa* L.) cultivar Morelos A-98 en función de la densidad de población. Verano 2018. Iguala Gro.

PLANTAS m^{-2}	**BT**	**RG**	**IC (%)**	**RAST**
25	3100a	454c	15c	2646a
16	3000c	676b	22b	2324b
11	2500	730a	29a	1770c
8	2300d	502c	22b	1798c
Tukey 0.05	90	50	3	100
Probabilidad de F	**	**	**	**

RG= rendimiento de grano; BT= biomasa (materia seca), RAST= rastrojo (materia seca);icPF 0.01 y 0.05, **, *, respectivamente. NS = diferencias no significativas al 0.05 de probabilidad de F.

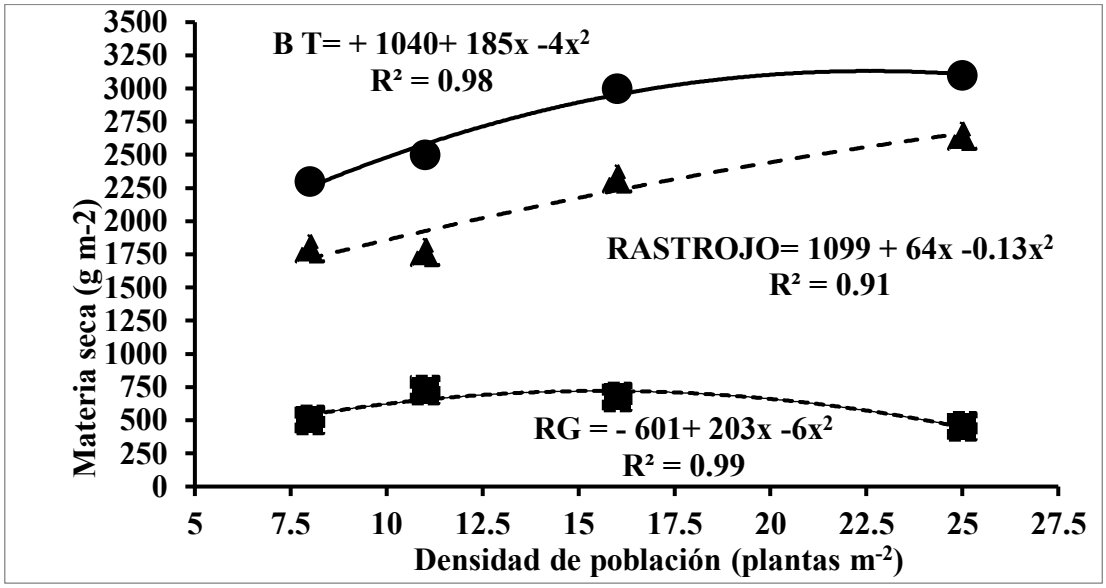


Figura 1. Materia seca total (BT), rendimiento en grano (RG) y rastrojo del arroz A-98 en función de la densidad de población (DP). Verano 2018. Iguala Gro.

Correlación de Pearson del rendimiento en grano, biomasa y sus componentes
El RG presentó una correlación alta (r= 0.97-0.99**) con RGM, MS, MAP, AP LP y r=0.84 con el IC. Esto indica que para incrementar el RG se requieren más peso del grano por macollo, número de macollos por área, mayor longitud de panícula y altura de planta. El incremento en estos atributos se puede lograr en parte con una densidad de población apropiada.

Mejor modelo de estimación del rendimiento en grano en función de sus componentes, mediante el procedimiento Stepwise.
El mejor modelo de estimación del rendimiento (RG) en función de sus componentes involucró a altura de planta y longitud de la panícula (LP) con un R^2=0.99 y con menor varianza del error que con el modelo con una variable (LP) que aun cuando el R^2 fue de 0.99, presentó mayor error de estimación (Cuadro 3) (Escalante, *et al*. 2025). Esto indica, que en plantas de mayor altura y longitud de panícula pude esperarse un RG más alto de arroz. La figura 3, presenta la relación entre el RG estimado con los modelos del cuadro 3, con el RG observado. El modelo que involucra más variables presenta el coeficiente de determinación más alto y menor error de estimación.

Cuadro 3. Mejor modelo de estimación del rendimiento en grano en función de sus componentes, mediante el procedimiento Stepwise. Verano 2018. Iguala Gro.

Modelo que estima el RG	Variable ingresada	R^2	S^2
RG=-1099 + 11AP	AP	0.99	52710
RG= -460 + 19 AP -59 LP.	LP	0.99	16525

RG= rendimiento de grano; AP=altura de planta (cm); LP= longitud de panícula (/cm).

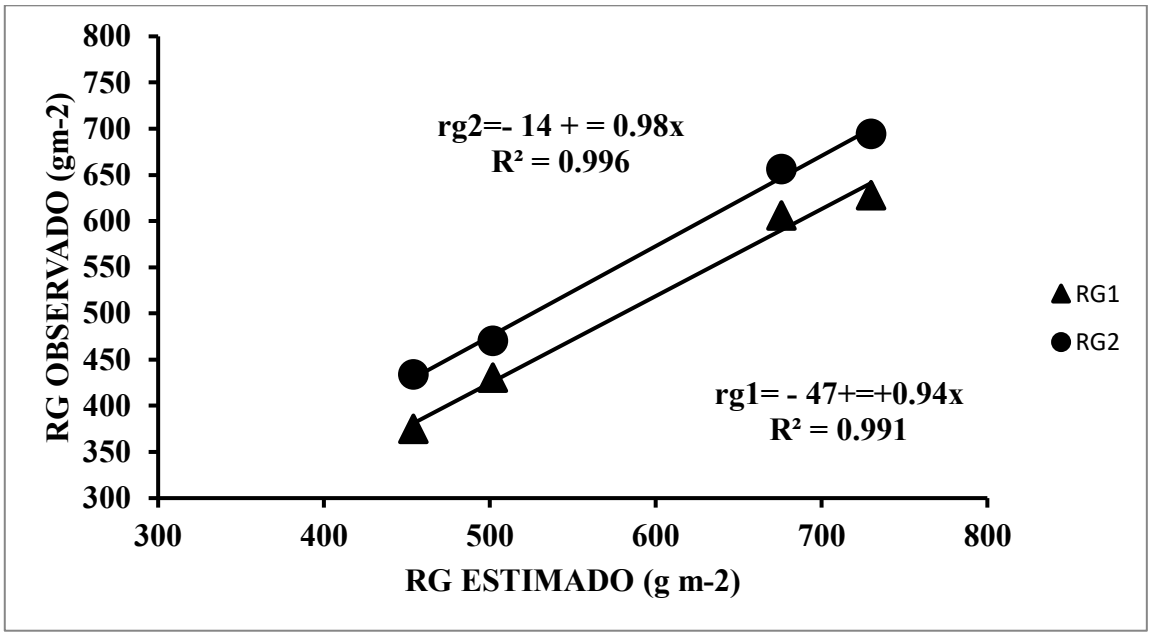


Figura 3. Relación entre el rendimiento estimado mediante los dos modelos con el observado en arroz A-98. Iguala Gro. Verano 2018.

Análisis económico y Rentabilidad

En el Cuadro 4, se observa que la mayor rentabilidad del cultivo fue con la DP de 11 y 16 plantas m^{-2} por obtener el mayor ingreso neto y GPI. Es decir que por cada peso invertido se obtuvo $ 2.3 y 2.4 pesos por peso invertido. En la figura 4 se observa que la GPI en relación con la DP presenta una tendencia de ajuste a un polinomio de segundo grado, en donde los valores mínimos corresponden a la DP más baja y alta bajo dos escenarios. Si el pago es con el precio medio rural de $20.00 por kg de arroz (SIAP, 2024) y el caso extremo que se pague a $10.00 kg^{-1}. Este análisis no toma en cuenta el ingreso de la paja de arroz tipo Morelos que según mercado libre está a $**160 por paca de 20 kg.**

Cuadro 4. Rentabilidad en el cultivo de arroz con respecto a la densidad de población Verano 2018. Iguala Gro.

DP Plantas ha^{-1}	RG ($kg\ ha^{-1}$)	Ingreso total ($)	Ingreso neto ($)	GPI ($)
25	4540	90400	50400	1.3
16	6760	135200	95000	2.4
11	7300	146000	106000	2.3
8	5020	100400	60400	1.5

GPI = Ganancia por peso invertido; Costo medio rural por kg de arroz $20 pesos; costo de inversión estimado de arroz $40,000 ha^{-1}

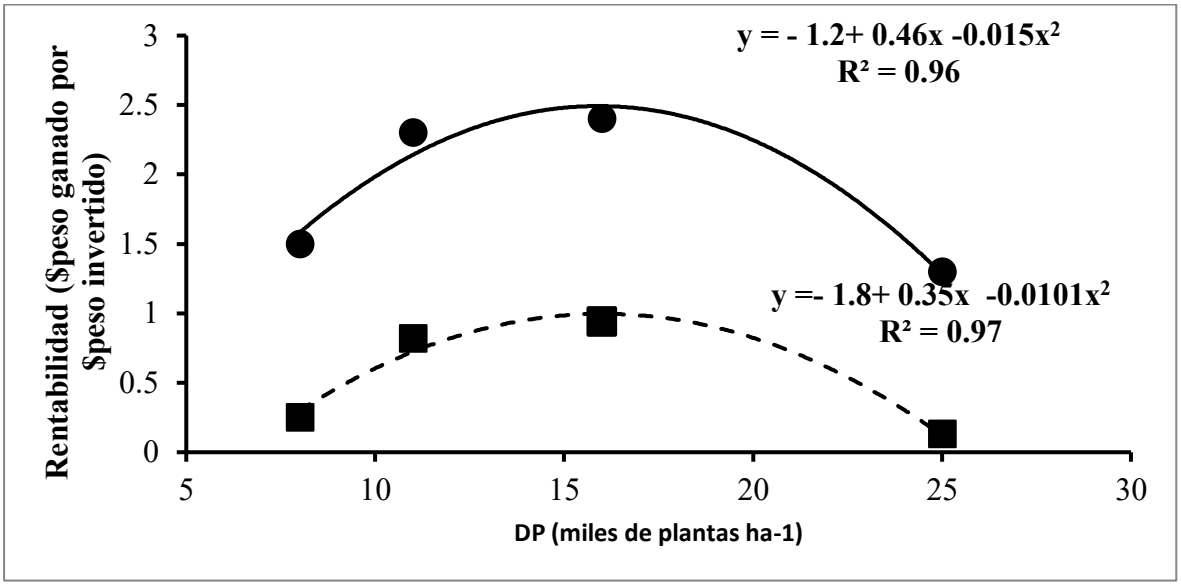


Figura 4.- Dinámica de la rentabilidad del arroz A-98 en función de la densidad de población. Iguala Gro. Verano 2018. Línea negra continua representa el pago del kg del arroz a $20 pesos kg^{-1}; línea discontinua $10 kg^{-1}.

Conclusión

El cambio en densidad de población en el cultivo de arroz no afecta los días a etapas Hasta con 11 plantas m^{-2} fue el óptimo para mayor altura de planta, longitud de espiga, macollos m^{-2}, índice de cosecha y rendimiento en grano. En contraste con 25 plantas m^{-2} se logra la mayor biomasa y rastrojo. El rendimiento por macollo, macollos por planta y m^{-2}, altura de planta y

longitud de espiga presentan una correlación alta con el rendimiento en grano. El modelo que mejor estima el rendimiento involucra la altura de planta y longitud de panícula. Con 11 mil y 16 mil plantas ha^{-1}, se logra la rentabilidad y ganancia por peso invertido más alto en el cultivo del arroz A-98 en clima cálido.

Literatura Citada

Cruz-Triana Ariel, Rivero-González Deyanira, Tania-Rodríguez Aida. (2023). Efecto de densidades de siembra sobre enfermedades y el rendimiento de *Oryza sativa* L. *Cultivos Tropicales. 44, (.3):1-.5*

Escalante Estrada José Alberto Salvador, Escalante Estrada Yolanda Isabel, Escalante Estrada Luis Enrique y Aguilar Carpio Cid. (2025). Modelos de respuesta del rendimiento y componentes en arroz al nitrógeno. Capítulo III:33-41. en: Modelos de optimización en agricultura controlada. México. Editores: Francisco Pérez Soto, Daniel Sepúlveda Jiménez, Oscar Palmeros Rojas, Esther Figueroa Hernández, Lucila Godínez Montoya, Rebeca Alejandra Pérez Figueroa, Pablo Emilio Escamilla García Universidad Autónoma Chapingo.160 p.

García E. (2004). Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Cuarta edición. UNAM. México, D.F. 217 p.

La contaminación. (2021). Utilización de la paja de arroz como biocombustible. https://lacontaminacion.org/utilizacion-de-la-paja-de-arroz-como-biocombustible/. Consultado el 18 agosto 2024.

Nagabhushana, GG; Worshan, AD; Wickliffe, DA; Danehower, AD; corbin.tf. (1997). Evidence, basis, and implications for allelopathicweed-suppression by rye (Secale cereale. L.) covecrop mulch in no tillage crop production. In: Meeting of the Weed Science Society of America, 1997, Orlando, Florida. WSSA Abstracts, volume 37.

Ortiz AE, Rodríguez V, Carrillo JR. (2020). Evaluación de dos variedades de arroz (*Oryza sativa* L.), durante el proceso de secado en el secadero "Emilio Lastre". Revista científico educacional de la provincia Granma. 2020;16. ISSN: 2074-0735.

Salcedo, A. J. & Barrios, G. E. J. (2013). Morelos A-08: cultivar de arroz de grano aromático para el estado de Morelos. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol.4 (6) p. 963-968.
SADER (2023a). Arroz grano básico para los mexicanos, Secretaría de agricultura y desarrollo rural. https://www.gob.mx/agricultura/articulos/arroz-grano-basico-para-los-mexicano. Revisado el 19 agosto 2024.

Statistical Analysis System (SAS Institute). (2001). SAS/STAT. User´s Guide Release 9.1 ed, Cary, NC, USA

SADER (2023b). Ubicación Geoespacial de 6 Municipios con Producción de Arroz Palay en el Estado de Guerrero. SADER. https://campoguerrero.gob.mx/index.php/2023/06/26/ubicacion-geoespacial-de-6-municipios-con-produccion-de-arroz-palay-en-el-estado-de-guerrero

SIACON. (2023). Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. Modulo agrícola estatal del SIACON-NG. México: SIAP-AGRICULTURA. https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430.

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Formulación de una dieta de costo mínimo para tilapia del Nilo mediante programación lineal

Carlos Enrique Álvarez Moreno[1], Sharon Guadalupe Cortés Cortés[1], Jesús Antonio García Martinez[1], Mauricio Cervantes Silva Martínez[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

El costo del alimento limita la rentabilidad de la producción acuícola y puede abordarse mediante modelos de formulación de costo mínimo. El objetivo fue formular, para un lote teórico de 1 kg, una combinación de ingredientes de menor costo para tilapia del Nilo juvenil y verificar la equivalencia de la solución obtenida con Solver de Excel y linprog de MATLAB. Se construyó un modelo determinista de programación lineal con 28 ingredientes candidatos, una restricción de masa y límites nutricionales. El modelo inicial con 16 componentes no presentó una solución factible; por ello, se analizó un modelo reducido con energía, proteína y grasa como restricciones prioritarias. Ambas plataformas produjeron la misma solución, dentro del redondeo numérico: 0.3810 kg de granos y solubles de maíz, 0.0264 kg de semilla de girasol y 0.5926 kg de harina de carne, con un costo objetivo de 4.9387 MXN kg-1. La mezcla calculada aportó 2727.2 kcal kg-1, 36.8 % de proteína y 15.0 % de grasa, valores ubicados dentro de los intervalos especificados. La coincidencia entre plataformas confirmó la implementación computacional del modelo reducido; sin embargo, la formulación no constituye una dieta completa ni validada biológicamente. Se requiere depurar la matriz nutricional, incorporar límites de inclusión y validar digestibilidad, inocuidad y desempeño productivo.

Palabras clave: acuicultura; costo mínimo; formulación de alimento; programación lineal; *Oreochromis niloticus*

Abstract

Feed cost constrains aquaculture profitability and can be addressed through least-cost formulation models. This study aimed to formulate, for a theoretical 1 kg batch, a minimum-cost ingredient combination for juvenile Nile tilapia and to verify the equivalence of solutions obtained with Excel Solver and MATLAB linprog. A deterministic linear programming model was built with 28 candidate ingredients, a mass-balance constraint, and nutrient bounds. The initial model containing 16 nutritional components was infeasible; therefore, a reduced model using energy, protein, and lipid as priority constraints was analyzed. Both platforms returned the same solution within numerical rounding: 0.3810 kg corn distillers grains and solubles, 0.0264 kg sunflower seed, and 0.5926 kg meat meal, with an objective cost of MXN 4.9387 kg-1. The calculated mixture supplied 2727.2 kcal kg-1, 36.8% protein, and 15.0% lipid, all within the specified intervals.

[1]Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C.P. 56230, México. Carlosenrique.amoreno@gmil.com; ntonio.garcia.gama@gmail.com;
[2]Colegio de Posgraduados Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco. km 36.5, Texcoco, Estado de México. cervantes.mauricio@colpos.mx;

Cross-platform agreement confirmed the computational implementation of the reduced model; however, the formulation is neither a complete diet nor biologically validated. The nutrient matrix must be refined, ingredient inclusion bounds added, and digestibility, safety, and productive performance experimentally assessed.

Keywords: aquaculture; feed formulation; least cost; linear programming; *Oreochromis niloticus*

Introducción

La acuicultura ocupa una posición creciente en el suministro mundial de alimentos acuáticos. En 2024 produjo 103 millones de toneladas de animales acuáticos y aportó 53 % de la producción mundial de este grupo, lo cual incrementa la necesidad de sistemas productivos eficientes y sostenibles (FAO, 2026). En la producción de tilapia, la alimentación es un componente decisivo del costo y del desempeño del cultivo; por ello, la selección de ingredientes debe conciliar disponibilidad, precio, composición, digestibilidad, inocuidad y respuesta biológica.

La tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) es una especie ampliamente cultivada por su adaptación a diversos sistemas y su capacidad de aprovechar ingredientes de distinto origen. Sus requerimientos cambian con la etapa productiva, la calidad de la proteína y la densidad energética de la dieta (El-Sayed, 2006; National Research Council, 2011). En juveniles, el nivel de lípidos influye tanto en el aporte energético como en el uso de la proteína; no obstante, un valor teórico adecuado no sustituye la evaluación de digestibilidad y crecimiento (Chou & Shiau, 1996).

En este contexto, la formulación de una ración equilibrada debe considerar la etapa de crecimiento, la relación entre proteína y energía y la calidad de las materias primas. Los requerimientos de proteína y aminoácidos cambian con el tamaño del pez, por lo que un nivel apropiado para juveniles no necesariamente resulta adecuado durante la engorda (Furuya et al., 2023; Novodworski et al., 2024). Asimismo, la inclusión de fuentes lipídicas influye en la digestibilidad, la eficiencia alimenticia y la utilización de la proteína como material para la formación de tejido (Batista et al., 2023). La diversidad de ingredientes convencionales y alternativos disponibles amplía las posibilidades de formulación, pero también aumenta la necesidad de establecer límites de inclusión específicos (Zuluaga-Hernández et al., 2023).

El contenido proximal de un ingrediente no representa por sí solo su valor nutritivo. La digestibilidad puede variar considerablemente entre materias primas y métodos de procesamiento, aun cuando presenten concentraciones semejantes de proteína o energía (Mmanda et al., 2020). También se ha observado que dietas isonitrogenadas e isolipídicas producen respuestas distintas en crecimiento, microbiota y condición intestinal cuando cambia el origen de la proteína (do Vale Pereira et al., 2024). Además, la fibra, los inhibidores de proteasas y otros factores antinutricionales pueden reducir el aprovechamiento de los ingredientes vegetales (Ma et al., 2022), aunque ciertos tratamientos tecnológicos o la suplementación enzimática pueden atenuar algunos de estos efectos (Schneider et al., 2025). Por ello, el cumplimiento matemático de los límites nutricionales constituye una primera aproximación y no garantiza la idoneidad biológica de la mezcla.

La programación lineal permite elegir proporciones de ingredientes que minimizan una función de costo bajo restricciones de masa y nutrientes. Para ello se requiere una base consistente de ingredientes, composición nutricional, límites de inclusión y precios. Solver de Excel y linprog de MATLAB implementan este tipo de modelos; si reciben la misma función objetivo,

restricciones y tolerancias, deben converger a soluciones equivalentes dentro del error numérico (Suresh, 2016). Aplicaciones recientes en tilapia muestran el potencial de estas herramientas, pero también la necesidad de adaptar la base de datos a las condiciones locales y al tamaño del pez (Soudah et al., 2023).

Se planteó como hipótesis que Solver y linprog producirían una solución equivalente para un mismo modelo de formulación. El objetivo fue determinar una combinación de costo mínimo para un lote teórico de 1 kg de alimento para tilapia del Nilo juvenil, evaluar la factibilidad del conjunto original de restricciones nutricionales y comparar los resultados obtenidos con ambas plataformas.

Materiales y métodos

Diseño del estudio y población objetivo

Se realizó un estudio computacional determinista de formulación de alimento en la Universidad Autónoma Chapingo. La unidad de análisis fue una mezcla teórica de 1 kg destinada a tilapia del Nilo (Oreochromis niloticus) en etapa juvenil.

La etapa juvenil se seleccionó debido a que los peces jóvenes presentan requerimientos relativamente elevados de proteína y energía para sostener la formación de tejido y el crecimiento corporal. No obstante, las necesidades nutricionales pueden variar de acuerdo con el peso del pez, la temperatura del agua, el sistema de cultivo, la densidad de organismos y la calidad y digestibilidad de los ingredientes utilizados (El-Sayed, 2006; National Research Council, 2011). La mezcla obtenida se considera una formulación teórica y no un alimento completo validado para su suministro directo es por ello que el estudio se limitó a la formulación matemática del alimento.

Selección de los ingredientes

La selección inicial de ingredientes se realizó mediante la consulta de las tablas de composición y valor nutritivo de alimentos de la Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA, 2019). Los ingredientes fueron organizados en las siguientes categorías: Granos de cereales. Subproductos de cereales. Frutos, tubérculos y melazas. Concentrados de proteína vegetal. Alimentos fibrosos. Concentrados de proteína animal. Productos lácteos. Fuentes minerales.

Posteriormente, se efectuó un proceso de filtrado para seleccionar ingredientes que pudieran estar disponibles o adquirirse en la región de Texcoco, Estado de México. La selección se efectuó considerando cuatro criterios principales: disponibilidad regional, costo de adquisición, facilidad de manejo y contribución nutricional. También se procuró incluir ingredientes con funciones complementarias. Los cereales y sus subproductos se consideraron principalmente como fuentes energéticas; las harinas de origen vegetal y animal, como fuentes de proteína; las semillas, como fuentes de proteína y lípidos; y los compuestos minerales, como posibles fuentes de calcio, fósforo, magnesio y sodio.

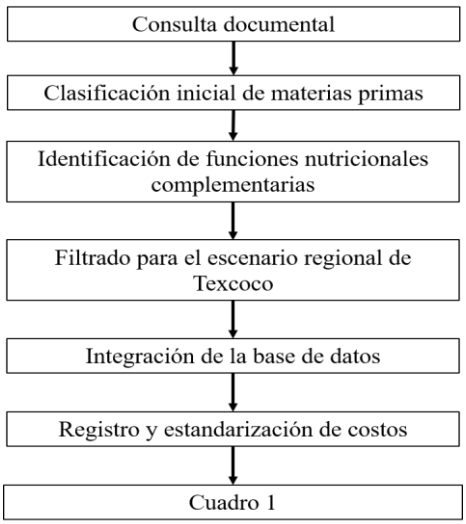


Figura 1. Procedimiento metodológico para la selección de ingredientes y la integración del Cuadro 1.

Definición de los requerimientos nutricionales y escenarios de optimización

Los requerimientos nutricionales se establecieron mediante la revisión de literatura sobre la alimentación de tilapia del Nilo juvenil. Se evaluaron dos escenarios de optimización. El primero correspondió a un modelo completo que incorporó restricciones para 16 componentes: energía, proteína, grasa, carbohidratos, humedad, calcio, fósforo, sodio, magnesio, potasio, manganeso, zinc, hierro, colina, biotina y vitamina E. La factibilidad de este escenario se evaluó tanto con *Solver* de Excel como con la función linprog de MATLAB.

El segundo escenario correspondió a un modelo reducido, en el cual se conservaron como restricciones prioritarias la energía, la proteína y la grasa. Los límites inferiores se fijaron en 2500 kcal kg^{-1} de energía, 32.0 % de proteína y 15.0 % de grasa, mientras que los límites superiores se establecieron en 2875 kcal kg^{-1}, 36.8 % y 17.25 %, respectivamente. Este escenario se utilizó para comparar la implementación y los resultados obtenidos en ambas plataformas; por tanto, la formulación resultante se interpretó como una solución matemática preliminar y no como una dieta nutricionalmente completa.

Formulación matemática

Sea xj la proporción (kg kg-1) del ingrediente j, cj su costo (MXN kg-1) y aij el contenido del nutriente i en el ingrediente j. El modelo general minimizó el costo total sujeto a balance de masa, límites nutricionales y no negatividad:

$$min\ Z\ =\ \Sigma(j=1,\ldots,n)\ cj\ xj$$

$$\text{sujeto a: } Li\ \leq\ \Sigma(j=1,\ldots,n)\ aij\ xj\ \leq\ Ui;\ \ i\ =\ 1,\ldots,m$$

$$\Sigma(j=1,\ldots,n)xj\ =\ 1;\ \ \ xj\ \geq\ 0 \qquad (1)$$

El modelo inicial consideró m = 16 componentes: energía, proteína, grasa, carbohidratos, humedad, calcio, sodio, magnesio, fósforo, potasio, manganeso, zinc, hierro, colina, biotina y vitamina E. Debido a que este sistema no produjo una solución factible con la matriz disponible, se definió a priori para el análisis comparativo un modelo reducido con tres variables nutricionales prioritarias: energía, proteína y grasa. Los intervalos fueron 2500-2875 kcal kg-1, 32.0-36.8 % de proteína y 15.0-17.25 % de grasa.

$$2500 \leq \Sigma\, Ej\, xj \leq 2875$$

$$32.0 \leq \Sigma\, Pj\, xj \leq 36.8$$

$$15.0 \leq \Sigma\, Gj\, xj \leq 17.25$$

$$\Sigma\, xj = 1; \quad xj \geq 0 \qquad (2)$$

Implementación y verificación

El modelo se resolvió con el método Simplex LP de Solver en Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, Estados Unidos) y con linprog en MATLAB (MathWorks, Natick, Massachusetts, Estados Unidos). En MATLAB se utilizó el algoritmo dual-simplex reportado por la salida del solucionador. La equivalencia se evaluó mediante la comparación directa de las proporciones, el costo objetivo y el cumplimiento de los límites. No se realizó un ensayo de alimentación; por tanto, los resultados corresponden exclusivamente a una simulación de formulación.

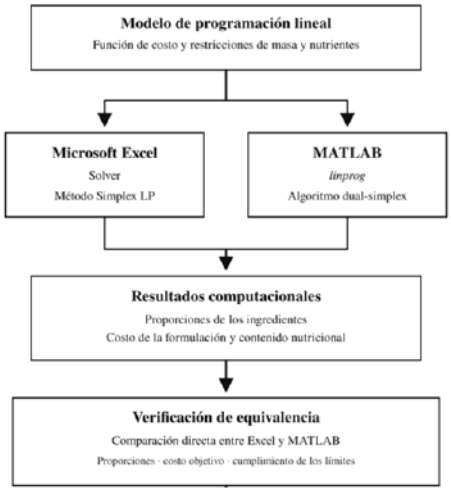


Figura 2. Procedimiento de implementación y verificación del modelo de programación lineal.

Resultados y discusión

La selección dio como resultado una base de datos integrada por 28 ingredientes candidatos. Para cada uno se registró el precio de adquisición por kilogramo, revisado el 20 de enero de 2026 en la región de Texcoco, Estado de México. Los ingredientes considerados y sus costos, expresados en MXN kg^{-1}, se presentan en el Cuadro 1. Los precios variaron entre 3.00 y 132.00 MXN kg^{-1}. Esta diferencia influyó en la formulación, aunque el ingrediente de menor precio no necesariamente representó la mejor opción, pues su selección también dependió de su composición nutricional y del cumplimiento de las restricciones establecidas en el modelo.

Cuadro 1. Ingredientes candidatos y costos nominales empleados en el modelo

Ingrediente	MXN kg-1	Ingrediente	MXN kg-1
Avena	4.50	Harina de soya	6.00
Maíz	6.50	Levadura de cerveza	132.00
Trigo	7.00	Alfalfa	5.20

Ingrediente	MXN kg-1	Ingrediente	MXN kg-1
Granos y solubles de trigo	3.00	Cascarilla de avena	3.80
Granos y solubles de maíz	4.25	Paja de trigo	6.00
Salvado de trigo	3.25	Harina de carne	5.00
Harina de galleta	112.50	Harina de pescado	7.00
Melaza de caña	3.20	Harina de carne de aves	6.50
Patata dulce	18.00	Harina de sangre	4.00
Semilla de girasol	13.50	Harina de huevo	27.80
Lentejas	32.50	Leche descremada	12.30
Lactosuero	4.00	Carbonato cálcico	65.00
Harina de huesos	48.00	Fosfato de roca	15.00
Sulfato de magnesio heptahidratado	45.00	Bicarbonato sódico	40.00

Fuente: Matriz de costos del proyecto (costos revisados 20 de enero de 2026 en región Texcoco).

La integración de 28 ingredientes proporcionó al modelo fuentes diferenciadas de energía, proteína, lípidos y minerales. Esta diversidad es relevante porque la literatura ha documentado el potencial de distintas materias primas y subproductos para sustituir parcialmente las fuentes convencionales. Entre ellos se encuentran la torta de semilla de calabaza (Mounes et al., 2024), el okara procesado procedente de la elaboración de bebidas de soya (Voss et al., 2021) y la harina de larva de mosca soldado negra (Tippayadara et al., 2021). Estos estudios muestran que los subproductos agroindustriales pueden aprovecharse en la alimentación de tilapia, siempre que se conozcan su composición, digestibilidad y nivel de inclusión.

También se han evaluado ingredientes de origen animal o agroindustrial, como los concentrados de proteína de suero y el agua de cola procedente del procesamiento de pescado (Amer et al., 2019; Wattanakul et al., 2019). Sin embargo, los resultados obtenidos con esas materias primas no pueden trasladarse directamente a los ingredientes del presente modelo, debido a diferencias en el procesamiento, la composición y la etapa productiva de los peces. En consecuencia, la disponibilidad regional y el precio fueron criterios apropiados para construir la base inicial, pero una aplicación productiva requeriría complementar los datos tabulados con análisis bromatológicos locales, coeficientes de digestibilidad y límites máximos de inclusión.

Factibilidad y solución del modelo reducido

El modelo que incluyó los 16 componentes nutricionales no presentó una solución factible en ninguna de las dos plataformas. Esto significa que, con los ingredientes disponibles, su composición y los límites establecidos, no fue posible satisfacer simultáneamente todas las restricciones. Este resultado no representa una limitación de la programación lineal, sino una incompatibilidad entre la matriz de composición y las condiciones definidas para el modelo.

Al reducir las restricciones a energía, proteína y grasa, ambas plataformas encontraron una solución óptima integrada por tres de los 28 ingredientes candidatos. La formulación estuvo compuesta por 38.1033 % de granos y solubles de maíz, 2.6404 % de semilla de girasol y

59.2562 % de harina de carne. La suma de las proporciones fue de 99.9999 %; la diferencia respecto a 100 % se atribuyó a la precisión numérica del solucionador. La composición nutricional y el costo de los ingredientes seleccionados se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Datos de los ingredientes con proporción distinta de cero en la solución

Ingrediente	Costo (MXN kg-1)	Energía (kcal kg-1)	Proteína (%)	Grasa (%)
Granos y solubles de maíz	4.25	3070	27.4	12.5
Semilla de girasol	13.50	4450	17.6	42.1
Harina de carne	5.00	2430	43.7	15.4

Fuente: Matriz de trabajo del proyecto.

La formulación proporcionó 2727.2 kcal kg^{-1} de energía, 36.8 % de proteína y 15.0 % de grasa, con un costo mínimo de 4.94 MXN kg^{-1}. La proteína alcanzó el límite superior establecido, mientras que la grasa coincidió con el límite inferior. Esto indica que ambas restricciones fueron determinantes para establecer las proporciones de los ingredientes y el costo de la solución. La comparación de las proporciones y del costo mínimo obtenidos mediante Solver de Excel y linprog de MATLAB se presenta en el Cuadro 3. Para facilitar la comparación, los resultados de ambas plataformas se expresaron con cuatro cifras decimales.

Cuadro 3. Comparación de la solución obtenida en Excel y MATLAB

Componente	Solver de Excel	linprog de MATLAB	Diferencia absoluta
Granos y solubles de maíz (kg)	0.381033	0.3810	0.000033
Semilla de girasol (kg)	0.026404	0.0264	0.000004
Harina de carne (kg)	0.592562	0.5926	0.000038
Costo mínimo (MXN kg-1)	4.94	4.9387	0.0013

Fuente: Resultados del modelo.

La inclusión de 59.2 % de harina de carne evidencia una característica habitual de los modelos que minimizan exclusivamente el costo: cuando no se establecen límites de inclusión, el solucionador puede concentrar la mezcla en el ingrediente que satisface las restricciones al menor precio. Esta proporción no debe interpretarse como una recomendación nutricional. Se ha demostrado que fuentes proteicas con concentraciones semejantes de proteína pueden producir respuestas diferentes en crecimiento, conversión alimenticia, microbiota y excreción de nutrientes (Shaw et al., 2022; do Vale Pereira et al., 2024). Incluso las formulaciones elaboradas con criterios ambientales o de aceptación social pueden modificar el consumo voluntario y el crecimiento de la tilapia (Mendes et al., 2024).

La aceptación del alimento representa otra limitación que no fue incorporada al modelo. La palatabilidad depende del origen y procesamiento de las materias primas y no puede predecirse únicamente a partir de sus contenidos de proteína, grasa y energía. Los hidrolizados proteicos obtenidos de diferentes subproductos, por ejemplo, pueden producir respuestas distintas en la aceptación de los gránulos (Alves et al., 2019). De manera semejante, la incorporación de enzimas puede mejorar el aprovechamiento de ingredientes vegetales, pero sus efectos

dependen de la composición completa de la dieta y deben comprobarse mediante ensayos de digestibilidad y alimentación (Schneider et al., 2025).

La grasa alcanzó el límite inferior de 15 %, lo que confirma su influencia sobre la estructura de la solución. No obstante, el contenido total de lípidos no informa sobre la composición de ácidos grasos, su digestibilidad ni sus posibles efectos metabólicos. La suplementación con fosfolípidos puede modificar la digestibilidad de los lípidos y la eficiencia alimenticia en juveniles (Batista et al., 2023), mientras que dietas experimentales con contenidos elevados de grasa han mostrado la necesidad de vigilar la condición hepática, el estrés oxidativo y la respuesta inflamatoria (Rashwan et al., 2024). Estos antecedentes no demuestran que la mezcla calculada produzca efectos adversos, pero justifican incorporar la calidad de los lípidos, límites prácticos por ingrediente y una validación biológica antes de recomendar su utilización.

Cumplimiento de restricciones y alcance de la solución.

El aporte nutricional calculado y su relación con los límites establecidos se presentan en el Cuadro 4. La energía se mantuvo dentro del intervalo permitido, mientras que la proteína alcanzó el límite superior y la grasa el límite inferior. La masa total fue de 0.999999 kg, valor que se consideró equivalente a 1 kg dentro de la tolerancia numérica empleada por los solucionadores.

Cuadro 4. Aporte calculado y límites del modelo reducido

Variable	Límite inferior	Resultado	Límite superior	Condición
Energía (kcal kg-1)	2500	2727.2	2875	Cumple
Proteína (%)	32.0	36.8	36.8	Cumple; límite superior activo
Grasa (%)	15.0	15.0	17.25	Cumple; límite inferior activo
Masa (kg)	1.0	0.999999	1.0	Cumple por redondeo

Fuente: Cálculos del modelo reducido.

La proteína y la grasa actuaron como restricciones activas, por lo que tuvieron una influencia directa en la composición de la mezcla. Esto también indica que una modificación en sus límites o en los precios de los ingredientes podría cambiar las proporciones de la solución. La coincidencia entre *Solver* y *linprog* confirmó que el modelo reducido fue implementado de manera equivalente en ambas plataformas, en concordancia con otras aplicaciones de programación lineal en la formulación de alimentos para tilapia (Soudah et al., 2023).

La inclusión de 59.26 % de harina de carne muestra una limitación del modelo reducido. Aunque la mezcla cumple con las tres restricciones nutricionales, esta proporción puede resultar poco adecuada desde el punto de vista nutricional, tecnológico y de inocuidad. Para obtener una formulación aplicable sería necesario incorporar límites de inclusión por ingrediente, proteína digestible, aminoácidos esenciales, fibra, cenizas, fósforo disponible, vitaminas, minerales, factores antinutricionales y condiciones de procesamiento. También podrían considerarse criterios relacionados con la disponibilidad de las materias primas y el impacto ambiental, además del costo (Heidari et al., 2021).

No se realizó una comparación directa con alimentos comerciales porque el costo calculado únicamente considera el precio de adquisición de las materias primas. Además, la formulación

obtenida no incluye los costos de transporte, molienda, mezclado, peletizado, aditivos, control de calidad ni pérdidas de procesamiento, y tampoco representa un alimento nutricionalmente completo. En consecuencia, el valor obtenido no permite afirmar que exista ahorro, rentabilidad o un mejor desempeño productivo. El aporte del estudio consiste en la formulación del modelo matemático, la identificación de la ausencia de una solución factible en el escenario completo y la obtención de resultados reproducibles en Excel y MATLAB.

Conclusiones

Solver de Excel y *linprog* de MATLAB proporcionaron resultados equivalentes para el modelo reducido de programación lineal. Para una formulación de 1 kg, la solución estuvo integrada por 0.3810 kg de granos y solubles de maíz, 0.0264 kg de semilla de girasol y 0.5926 kg de harina de carne, con un costo de 4.9387 MXN kg^{-1}. La mezcla cumplió con los intervalos establecidos para energía, proteína y grasa, lo que permitió comprobar la correcta implementación del modelo en ambas plataformas.

El modelo con 16 componentes nutricionales no presentó una solución factible con la matriz y los límites utilizados. Esto no se debió al número de restricciones por sí mismo, sino a la imposibilidad de satisfacerlas simultáneamente con los ingredientes disponibles. Además, la elevada proporción de harina de carne muestra que la solución matemática no puede considerarse una dieta terminada. Antes de evaluar su aplicación productiva será necesario revisar la composición y las unidades de la base de datos, establecer límites de inclusión por ingrediente, incorporar nutrientes digestibles y realizar pruebas de elaboración, inocuidad, aceptación, crecimiento y conversión alimenticia. Por tanto, el resultado constituye una formulación computacional preliminar que deberá validarse experimentalmente.

Literatura citada

Alves, D. R. S., de Oliveira, S. R., Luczinski, T. G., Paulo, I. G. P., Boscolo, W. R., Bittencourt, F., & Signor, A. (2019). Palatability of protein hydrolysates from industrial byproducts for Nile tilapia juveniles. *Animals, 9*(6), 311. https://doi.org/10.3390/ani9060311

Amer, S. A., Osman, A., Al-Gabri, N. A., Elsayed, S. A. M., Abd El-Rahman, G. I., Elabbasy, M. T., Ahmed, S. A. A., & Ibrahim, R. E. (2019). The effect of dietary replacement of fish meal with whey protein concentrate on the growth performance, fish health, and immune status of Nile tilapia fingerlings, *Oreochromis niloticus*. *Animals, 9*(12), 1003. https://doi.org/10.3390/ani9121003

Batista, R. O., Richter, B. L., Banze, J. F., Schleder, D. D., Salhi, M., Nobrega, R. O., Oliveira da Silva, M. F., Mattioni, B., Pettigrew, J. E., & Fracalossi, D. M. (2023). Soy lecithin supplementation promotes growth and increases lipid digestibility in GIFT Nile tilapia raised at suboptimal temperature. *Fishes, 8*(8), 404. https://doi.org/10.3390/fishes8080404

Chou, B. S., & Shiau, S. Y. (1996). Optimal dietary lipid level for growth of juvenile hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*. *Aquaculture, 143*(2), 185–195. https://doi.org/10.1016/0044-8486(96)01266-5

do Vale Pereira, G., Teixeira, C., Couto, J., Dias, J., Rema, P., & Gonçalves, A. T. (2024). Dietary protein quality affects the interplay between gut microbiota and host performance in Nile tilapia. *Animals, 14*(5), 714. https://doi.org/10.3390/ani14050714

El-Sayed, A.-F. M. (2006). *Tilapia culture*. CABI Publishing.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2026). *The state of world fisheries and aquaculture 2026*. https://doi.org/10.4060/cd8357en

Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. (2019). *Tablas FEDNA de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos* (4.ª ed.). https://www.fundacionfedna.org/ingredientes-para-piensos

Furuya, W. M., da Cruz, T. P., & Gatlin, D. M., III. (2023). Amino acid requirements for Nile tilapia: An update. *Animals, 13*(5), 900. https://doi.org/10.3390/ani13050900

Heidari, M. D., Gandasasmita, S., Li, E., & Pelletier, N. (2021). Proposing a framework for sustainable feed formulation for laying hens: A systematic review of recent developments and future directions. *Journal of Cleaner Production, 288*, 125585. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125585

Ma, S., Wang, H., Dou, Y., Liang, X., Zheng, Y., Wu, X., & Xue, M. (2022). Anti-nutritional factors and protein dispersibility index as principal quality indicators for soybean meal in diet of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* GIFT), a meta-analysis. *Animals, 12*(14), 1831. https://doi.org/10.3390/ani12141831

Mendes, R., Rema, P., Dias, J., Gonçalves, A. T., Teodósio, R., Engrola, S., Sánchez-Vázquez, F. J., & Conceição, L. E. C. (2024). Socially acceptable feed formulations may impact the voluntary feed intake and growth, but not robustness of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fishes, 9*(9), 361. https://doi.org/10.3390/fishes9090361

Mmanda, F. P., Lindberg, J. E., Haldén, A. N., Mtolera, M. S. P., Kitula, R., & Lundh, T. (2020). Digestibility of local feed ingredients in tilapia *Oreochromis niloticus* juveniles, determined on faeces collected by siphoning or stripping. *Fishes, 5*(4), 32. https://doi.org/10.3390/fishes5040032

Mounes, H. A. M., Abd-El Azeem, Z. M. A., Abd El-Bary, D. A., Al-Sagheer, A. A., Abd-Elhakim, Y. M., Hassan, B. A., Sadek, S. S., & Ahmed, K. M. (2024). Effect of substituting soybean meal in *Oreochromis niloticus* diets with pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed cake on water quality, growth, antioxidant capacity, immunity, and carcass composition. *Animals, 14*(2), 195. https://doi.org/10.3390/ani14020195

National Research Council. (2011). *Nutrient requirements of fish and shrimp*. The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/13039

Novodworski, J., Matos, É. J. A., Gonçalves, R. M., Bombardelli, R. A., & Meurer, F. (2024). Protein requirements of fattening Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed fish meal-free diets. *Aquaculture Journal, 4*(3), 135–147. https://doi.org/10.3390/aquacj4030010

Rashwan, A. G., Assar, D. H., Salah, A. S., Liu, X., Al-Hawary, I. I., Abu-Alghayth, M. H., Salem, S. M. R., Khalil, K., Hanafy, N. A. N., Abdelatty, A., Sun, L., & Elbialy, Z. I. (2024). Dietary chitosan attenuates high-fat diet-induced oxidative stress, apoptosis, and inflammation in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) through regulation of Nrf2/Kaep1 and Bcl-2/Bax pathways. *Biology, 13*(7), 486. https://doi.org/10.3390/biology13070486

Schneider, T. L. S., Scheid, R. C., Peixoto, N. C., & Lazzari, R. (2025). Metabolic and intestinal morphometric responses of Nile tilapia fed diets containing soybean and protease. *Animals, 15*(3), 349. https://doi.org/10.3390/ani15030349

Shaw, C., Knopf, K., & Kloas, W. (2022). Fish feeds in aquaponics and beyond: A novel concept to evaluate protein sources in diets for circular multitrophic food production systems. *Sustainability, 14*(7), 4064. https://doi.org/10.3390/su14074064

Soudah, B., Toï, N., Yao, L., Batimsoga, B., Kossoga, A., Bataka, K., Imorou Toko, I., & Omasaki, S. K. (2023). Optimization of feed for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) using an Excel programming model in small-scale feed-mixing operations in Togo. *Aquaculture International, 31*, 3007–3027. https://doi.org/10.1007/s10499-023-01138-z

Suresh, A. V. (2016). Feed formulation software. In S. F. Nates (Ed.), *Aquafeed formulation* (pp. 21–32). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800873-7.00002-6

Tippayadara, N., Dawood, M. A. O., Krutmuang, P., Hoseinifar, S. H., Van Doan, H., & Paolucci, M. (2021). Replacement of fish meal by black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal: Effects on growth, haematology, and skin mucus immunity of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Animals, 11*(1), 193. https://doi.org/10.3390/ani11010193

Voss, G. B., Sousa, V., Rema, P., Pintado, M. E., & Valente, L. M. P. (2021). Processed by-products from soy beverage (okara) as sustainable ingredients for Nile tilapia (*O. niloticus*) juveniles: Effects on nutrient utilization and muscle quality. *Animals, 11*(3), 590. https://doi.org/10.3390/ani11030590

Wattanakul, U., Wattanakul, W., & Thongprajukaew, K. (2019). Optimal replacement of fish meal protein by stick water in diet of sex-reversed Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Animals, 9*(8), 521. https://doi.org/10.3390/ani9080521

Zuluaga-Hernández, C. D., Hincapié, C. A., & Osorio, M. (2023). Non-conventional ingredients for tilapia (*Oreochromis* spp.) feed: A systematic review. *Fishes, 8*(11), 556. https://doi.org/10.3390/fishes8110556

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Generación de Corriente Alterna a Partir de Fuentes de Energía Renovable: Un Enfoque Basado en el Control Conmutado de Convertidores Electrónicos de Potencia

Rogelio Ernesto García Chávez[1], Cristina Estefany Flores Juárez[1]
David Hebert del Valle Paniagua[1], José María Laveaga Vergara[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La generación de corriente alterna a partir de fuentes de energía renovable requiere estrategias de conversión capaces de regular el nivel de tensión de entrada y sintetizar las señales eléctricas requeridas por la carga. En este trabajo se presenta una estrategia de control por modos deslizantes aplicada a un sistema de conversión CD-CA de dos etapas, conformado por un convertidor Boost y un inversor Buck de puente completo. Como fuente primaria se emplea una función variante en el tiempo para representar el comportamiento de una fuente de energía renovable. El desempeño del sistema se evalúa mediante simulaciones numéricas en MATLAB/Simulink, utilizando los parámetros reportados en la literatura para esta arquitectura. Los resultados muestran que el convertidor Boost eleva la tensión de aproximadamente 48 V a 120 V, mientras que el inversor genera las trayectorias alternas de corriente y voltaje siguiendo sus respectivas referencias. Los resultados obtenidos muestran un adecuado desempeño de la estrategia propuesta bajo las condiciones de operación consideradas.

Palabras clave: Control por modos deslizantes, convertidor Boost, inversor Buck de puente completo, conversión CD-CA, energía renovable.

Abstract

The generation of alternating current from renewable energy sources requires conversion strategies capable of regulating the input voltage level and synthesizing the electrical signals required by the load. This work presents a sliding mode control strategy applied to a two-stage DC-AC conversion system composed of a Boost converter and a full-bridge Buck inverter. A time-varying function is used as the primary input to represent the behavior of a renewable energy source. The performance of the system is evaluated through numerical simulations in MATLAB/Simulink, using the parameters reported in the literature for this architecture. The results show that the Boost converter increases the voltage from approximately 48 V to 120 V, while the inverter generates the alternating current and voltage trajectories while tracking their respective references. The obtained results demonstrate an adequate performance of the proposed strategy under the considered operating conditions.

Keywords: Sliding mode control, Boost converter, full-bridge Buck inverter, DC-AC conversion, renewable energy.

[1]Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Posgrado en Socioeconomía, Estadística e Informática. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mexico. C. P. 56264. garcia.rogelio@colpos.mx; cris.cefj@gmail.com; dhvallep@colpos.mx
[2]Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa. Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas. Vasco de Quiroga 4871, Contadero, Cuajimalpa de Morelos, 05348 Ciudad de México. jose.laveaga@cua.uam.mx

Introducción

La disponibilidad de energía eléctrica ha sido un factor determinante para el desarrollo científico, industrial y social de las sociedades modernas. Tradicionalmente, la mayor parte de esta energía ha sido obtenida mediante la explotación de combustibles fósiles, debido a su capacidad para abastecer grandes demandas energéticas. Sin embargo, el uso intensivo de estos recursos ha incrementado considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero, ocasionando importantes efectos sobre el medio ambiente y acelerando los procesos asociados al cambio climático (International Energy Agency, 2026). Ante este panorama, el interés por implementar tecnologías de generación sustentables ha crecido de manera significativa, impulsando el aprovechamiento de fuentes renovables como la energía solar, eólica e hidráulica. Estas tecnologías constituyen alternativas viables para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y avanzar hacia sistemas eléctricos con menores emisiones de carbono (Bhimaraju & Mahesh, 2024). Entre las diferentes tecnologías de generación renovable, la energía fotovoltaica ha adquirido un papel protagónico debido a la abundancia del recurso solar, la reducción sostenida en los costos de fabricación de los módulos fotovoltaicos y la facilidad con la que estos sistemas pueden integrarse tanto en redes eléctricas como en aplicaciones de generación distribuida (Ebadi et al., 2024). No obstante, la electricidad producida por los módulos fotovoltaicos se encuentra en forma de corriente continua, mientras que la infraestructura eléctrica y la mayoría de los equipos de consumo funcionan con corriente alterna. Esta diferencia hace indispensable la utilización de convertidores electrónicos de potencia capaces de realizar la conversión de energía de corriente continua a corriente alterna con elevados niveles de eficiencia y garantizando una adecuada calidad de la energía suministrada a la carga y a la red eléctrica (Boscaino et al., 2024).

El desarrollo de estos convertidores implica afrontar diversos desafíos derivados tanto de la naturaleza intermitente de las fuentes de energía renovable como de las características dinámicas de los convertidores electrónicos de potencia. Las variaciones de la irradiancia y de la temperatura modifican continuamente el punto de operación de los sistemas fotovoltaicos, mientras que la naturaleza conmutada de los convertidores introduce un comportamiento altamente no lineal y de respuesta rápida, lo que dificulta el diseño de estrategias de control capaces de garantizar estabilidad, robustez y una adecuada calidad de la energía. (Zhang et al., 2024). Debido a ello, las arquitecturas de conversión en dos etapas, conformadas por un convertidor CD-CD y un inversor CD-CA, se han consolidado como una solución ampliamente utilizada, ya que permiten regular de manera independiente el voltaje proveniente de la fuente renovable y la generación de la señal alterna requerida por la carga, mejorando la estabilidad y el rendimiento global del sistema (García-Rodríguez et al., 2025)

Dentro de las diferentes metodologías de control disponibles, el control por modos deslizantes constituye una alternativa especialmente adecuada para este tipo de aplicaciones debido a su capacidad para mantener un comportamiento estable aun cuando existen incertidumbres en los parámetros del sistema o perturbaciones externas. Asimismo, su rápida respuesta dinámica y su robustez frente a variaciones en las condiciones de operación lo convierten en una herramienta apropiada para el control de convertidores electrónicos alimentados por fuentes renovables (Sira-Ramírez y Silva-Ortigoza, 2006).

En este contexto, el presente trabajo propone una estrategia de control robusta basada en modos deslizantes aplicada al sistema de conversión CD-CA de dos etapas alimentado mediante una fuente de energía renovable, basado en la topología Boost–inversor Buck de puente completo (García-Rodríguez et al., 2023). Como fuente primaria de alimentación se considera una señal $E(t)$, empleada para modelar el comportamiento variable de una fuente de energía renovable, siguiendo el planteamiento utilizado por Orta-Quintana et al. (2025). La metodología

desarrollada es evaluada mediante simulaciones numéricas, con el propósito de verificar la capacidad del controlador para lograr un seguimiento preciso de las referencias de voltaje y corriente, preservando el desempeño dinámico del sistema.

Materiales y Métodos

De acuerdo con la revisión presentada en la sección anterior, este trabajo aborda la generación de CA mediante el empleo de convertidores electrónicos de potencia y técnicas de control automático. Para ello, se seleccionó como planta de estudio una arquitectura de conversión de dos etapas, integrada por un convertidor tipo amplificador conectado en serie con un inversor Buck de puente completo (ver Fig. 1).

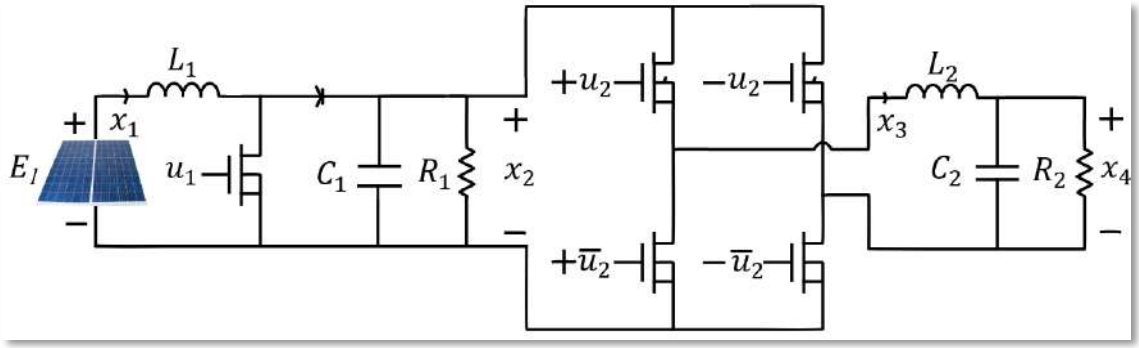


Figura 1. Sistema "convertidor de CD/CD tipo Boost–inversor Buck de puente completo" alimentado por un panel fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia.

Esta configuración permite adaptar el nivel de voltaje suministrado por la fuente renovable y generar una señal de corriente alterna con las características requeridas por la carga. En los siguientes apartados se presenta el modelo matemático de cada uno de los subsistemas que conforman esta arquitectura, el cual constituye la base para el diseño de la estrategia de control propuesta.

Modelo Matemático del Convertidor de CD/CD Tipo Amplificador

El modelo matemático empleado para describir la dinámica del convertidor de CD/CD tipo amplificador corresponde al modelo conmutado de segundo orden propuesto por Sira-Ramírez y Silva-Ortigoza (2006). Dicho modelo está representado por las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & -\dfrac{1-u_1}{L_1}\\ \dfrac{1-u_1}{C_1} & -\dfrac{1}{R_1C_1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\dfrac{E_1}{L_1}\\ 0\end{bmatrix} \tag{1}$$

Donde x_1 representan la corriente que circula en el inductor L_1, mientras que x_2 corresponde al voltaje en el capacitor C_1. El parámetro R_1 denota la resistencia de carga y E_1 representa la fuente de alimentación de esta etapa de amplificación. Por su parte, $u_1 \in \{0,1\}$ corresponde al ciclo de trabajo del interruptor electrónico, el cual constituye la variable de control del convertidor y permite regular el nivel de voltaje de salida.

Modelo Matemático del Inversor Reductor de Puente Completo

El comportamiento dinámico del inversor reductor de puente completo se describe mediante el

modelo promedio de segundo orden reportado por Orta-Quintana et al. (2025). Este modelo representa la dinámica del filtro de salida LC y constituye la base para el diseño de la estrategia de control encargada de generar una señal de corriente alterna con la amplitud y frecuencia deseadas. Las ecuaciones que describen dicho sistema están dadas por:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_3\\ \dot{x}_4\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & -\frac{1}{L_2}\\ \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{R_2C_2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_3\\ x_4\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\frac{E_2}{L_2}\\ 0\end{bmatrix}u_2 \tag{2}$$

En este modelo, x_3 representa la corriente que circula a través del inductor L_2, mientras que x_4 corresponde al voltaje en el capacitor C_2, el cual constituye la salida del inversor. El parámetro R_2 denota la resistencia equivalente de la carga y E_2 representa el voltaje de entrada del inversor, el cual es suministrado por la salida del convertidor CD/CD Boost descrito en la sección anterior (es decir, $E_2 = x_2$). Finalmente, $u_2 \in \{-1,0,1\}$ corresponde a la señal de control del puente completo y determina el voltaje aplicado al filtro LC, permitiendo sintetizar la señal de corriente alterna deseada.

Diseño del Algoritmo de Control Conmutado

Con el propósito de generar la señal de voltaje de CA a partir de las topologías de convertidores propuestas, se implementa una estrategia de control por modos deslizantes (Sliding Mode Control, SMC). Esta técnica de control es ampliamente utilizada en sistemas de estructura variable, particularmente en convertidores electrónicos de potencia, debido a su robustez frente a incertidumbres paramétricas y perturbaciones externas.

De acuerdo con lo expuesto por Sira-Ramírez y Silva-Ortigoza (2006), en convertidores de potencia una estrategia de control directo sobre el voltaje no garantiza la estabilidad del sistema en lazo cerrado. En contraste, al emplear un esquema de control de corriente es posible asegurar estabilidad asintótica del sistema. Bajo este enfoque, el control del voltaje se realiza de manera indirecta, parametrizando la trayectoria de voltaje deseada mediante su correspondiente referencia de corriente, la cual es seguida por el controlador por modos deslizantes.

Con base en el análisis anterior y considerando que el objetivo del controlador es garantizar el seguimiento de las corrientes de referencia, las superficies de deslizamiento se definen como el error entre las corrientes medidas y sus respectivas referencias. De esta manera, las superficies de deslizamiento para los convertidores propuestos están dadas por:

$$z_1 = x_1 - x_1^* \tag{3}$$

$$z_2 = x_3 - x_3^* \tag{4}$$

Las señales de control resultantes se rigen, como en un SMC clásico, mediante el operador signo, $sign(\cdot)$, obteniéndose las siguientes leyes de conmutación:

$$u_1 = 0.5[1 - sign(z_1)] \tag{5}$$

$$u_2 = -sign(z_2) \tag{6}$$

Las corrientes de referencia, x_1^* y x_3^*, que alimentan los lazos internos de control se obtienen a partir de las trayectorias deseadas de voltaje (x_2^* y x_4^*) y la parametrización diferencial de los

sistemas. En particular, la referencia de corriente para el inversor se calcula considerando la dinámica del capacitor de salida y la corriente demandada por la carga, mientras que la referencia correspondiente al convertidor elevador se determina a partir del balance de potencia entre la fuente de alimentación y el convertidor. De esta manera, las referencias quedan definidas como

$$x_1^* = \frac{x_2^{*2}}{R_1 E_1} \tag{7}$$

$$x_3^* = C_2 \dot{x}_4^* + \frac{x_4^*}{R_2} \tag{8}$$

Con las referencias anteriores y las leyes de conmutación definidas en (5) y (6), se garantiza que las trayectorias del sistema converjan hacia las superficies de deslizamiento. En consecuencia, las corrientes de los inductores siguen asintóticamente sus respectivas referencias, permitiendo el seguimiento indirecto de las trayectorias de voltaje deseadas y asegurando la estabilidad del sistema en lazo cerrado.

Resultados y Discusión

Se realizó una validación mediante simulaciones numéricas en MATLAB/Simulink, considerando los parámetros eléctricos de los convertidores y de la carga reportados por García-Rodríguez et al. (2025), correspondientes al sistema Boost–inversor Buck de puente completo. Como alimentación primaria se empleó la señal ($E(t)$), utilizada para representar una fuente de energía renovable, siguiendo la técnica de modelado empleada por Orta-Quintana et al. (2025). El objetivo fue evaluar el seguimiento de las referencias de corriente y voltaje en las dos etapas de conversión bajo las condiciones de operación establecidas.

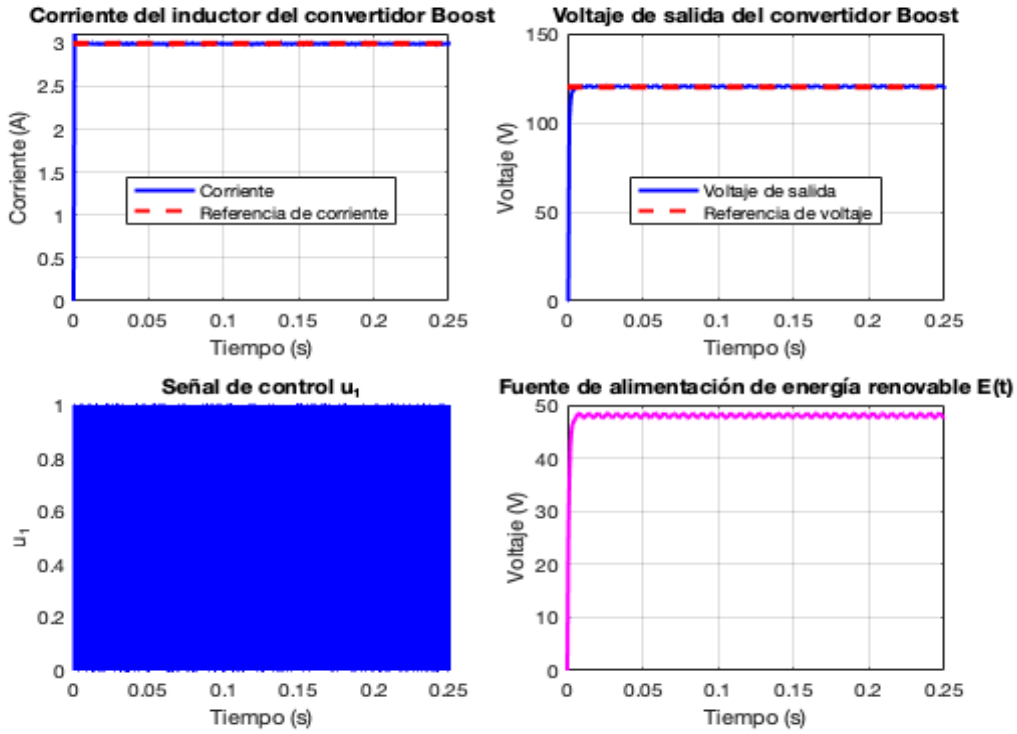


Figura 2. Resultados de simulación del convertidor Boost: corriente del inductor, voltaje de salida, señal de control u_1 y fuente de energía renovable *E(t)*. Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 2 muestra el comportamiento del convertidor Boost. La corriente del inductor presenta un seguimiento cercano de su referencia de aproximadamente 3 A, mientras que el voltaje de salida alcanza aproximadamente 120 V después del transitorio inicial y permanece alrededor de su referencia. La señal de control u_1 presenta el comportamiento conmutado característico del control por modos deslizantes. Por otra parte, la fuente renovable ($E(t)$) se establece alrededor de 48 V, evidenciando la capacidad del convertidor para elevar el nivel de tensión requerido por la segunda etapa.

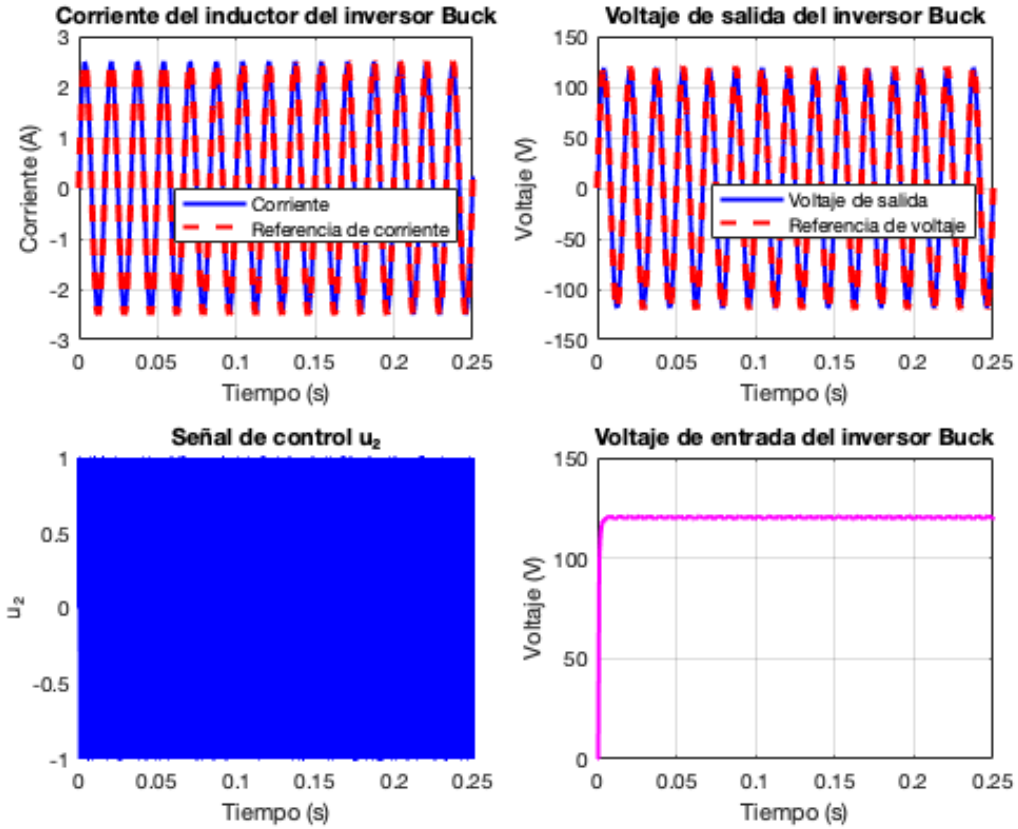


Figura 3. Resultados de simulación del inversor Buck de puente completo: corriente del inductor, voltaje de salida, señal de control u_2 y voltaje de entrada. Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 3 presenta el comportamiento del inversor Buck de puente completo. La corriente y el voltaje de salida siguen sus respectivas referencias alternas, manteniendo la amplitud y frecuencia establecidas. La señal (u_2) muestra la acción de conmutación requerida para sintetizar las señales de salida mediante el filtro LC. Asimismo, el voltaje de entrada del inversor permanece alrededor de 120 V, correspondiente al voltaje regulado por el convertidor Boost.

En conjunto, los resultados muestran un adecuado seguimiento de las referencias en ambas etapas y el funcionamiento coordinado de la arquitectura propuesta, donde el Boost regula el nivel de tensión de CD proveniente de la fuente renovable y el inversor Buck emplea dicho nivel para generar las señales de corriente alterna.

Conclusiones

Se presentó una estrategia de control por modos deslizantes aplicada a un sistema de conversión CD-CA de dos etapas compuesto por un convertidor Boost y un inversor Buck de puente completo. Los resultados de simulación muestran que el Boost eleva la tensión de la fuente renovable de aproximadamente 48 V a 120 V, manteniendo la corriente del inductor alrededor de su referencia. Por su parte, el inversor Buck utiliza este nivel de tensión para generar las trayectorias alternas de corriente y voltaje, observándose un seguimiento adecuado de las referencias establecidas.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran la factibilidad de la arquitectura propuesta para la generación de corriente alterna a partir de una fuente de energía renovable mediante dos etapas de conversión controladas por modos deslizantes. Como trabajo futuro, se considera evaluar el desempeño ante perturbaciones e incertidumbres paramétricas, así como realizar una validación experimental.

Literatura citada

International Energy Agency. (2026). Global Energy Review 2026. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026

Bhimaraju, A., & Mahesh, A. (2024). Recent developments in PV/wind hybrid renewable energy systems: A review. Energy Systems. https://doi.org/10.1007/s12667-024-00679-3

Ebadi, R., Aboshady, F. M., Ceylan, O., Pisica, I., & Ozdemir, A. (2024). Multi-Criteria Decision Making in Optimal Operation Problem of Unbalanced Distribution Networks Integrated With Photovoltaic Units. IEEE Access, 12, 79481–79495. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3394868

Boscaino, V., Ditta, V., Marsala, G., Panzavecchia, N., Tinè, G., Cosentino, V., Cataliotti, A., & Di Cara, D. (2024). Grid-connected photovoltaic inverters: Grid codes, topologies and control techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 189, 113903. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113903

Zhang, Q., Zhai, Z., Mao, M., Wang, S., Sun, S., Mei, D., & Hu, Q. (2024). Control and Intelligent Optimization of a Photovoltaic (PV) Inverter System: A Review. Energies, 17(7), 1571. https://doi.org/10.3390/en17071571

García-Rodríguez, V. H., Ambrosio-Lázaro, R. C., Pérez-Cruz, J. H., Tavera-Mosqueda, S., & Ascencio-Hurtado, C. R. (2025). Bipolar voltage tracking control for DC/DC Boost converter–full-bridge Buck inverter system: Design and analysis. Results in Engineering, 25, Article 103690. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103690

Sira-Ramírez, H., & Silva-Ortigoza, R. (2006). *Control Design Techniques in Power Electronic Devices*. Berlín, Alemania: Springer. pp. 12-45.

García-Rodríguez, V. H., Pérez-Cruz, J. H., Ambrosio-Lázaro, R. C., & Tavera-Mosqueda, S. (2023). Analysis of DC/DC Boost Converter–Full-Bridge Buck Inverter System for AC Generation. Energies, 16(6), 2509. https://doi.org/10.3390/en16062509

Orta-Quintana, Á. A., García-Chávez, R. E., Silva-Ortigoza, R., Marciano-Melchor, M., García-Sánchez, J. R., Roldán-Caballero, A., Silva-Ortigoza, G., & Villarreal-Cervantes, M. G. (2025). Robust two-stage controller for the bidirectional "Full-Bridge Buck inverter–DC motor" fed by renewable energy. Results in Engineering, 26, Article 105209. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105209

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Estrategias prácticas para que profesores de matemáticas diseñen cuestionarios en línea con apoyo de la Inteligencia Artificial Generativa

Noé Ramírez Negrete[1], Oscar Palmeros Rojas[2], Alma Rosa Herrera Flores[3]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Con la llegada de la inteligencia artificial (IA), en particular los modelos de generación de código, las posibilidades de construir Aplicaciones Web educativas, enfocadas en cuestionarios en línea, se ha incrementado, aunque diversas plataformas ofrecen servicios de creación de cuestionarios, no todos se adaptan a las necesidades académicas de los programas de estudio o no es posible colocar notación matemática tipo LaTeX. El objetivo de este trabajo es mostrar una ruta que se siguió en el diseño de una aplicación web para que todos los estudiantes de nuevo ingreso, a la Preparatoria Agrícola, cuenten con una herramienta en línea para repasar y mejorar en la simplificación de fracciones. Para ello se siguieron 3 pasos que consistieron en: 1) acordar los niveles de dificultad, 2) Solicitar a alguna IA código en Python, para generar los ejercicios y 3) Solicitar a alguna IA código en HTML, CSS y JavaScript, para generar la aplicación web. Encontramos que siguiendo estos 3 pasos es posible generar una aplicación web, pero para ello necesitamos A) escribir una buena instrucción (prompt), para que la IA genere el código con la menor cantidad de errores y B) contar con conocimientos básicos de programación en Python y HTML, ya que el código generado por IA, no siempre muestra los resultados esperados y es allí donde es necesario revisar el código para que funcione adecuadamente.

Palabras clave: Cuestionarios en linea, Inteligencia Artificial, Aplicaciones Web Educativas, LaTeX.

Abstract

With the advent of artificial intelligence (AI)—specifically code-generation models—the potential for building educational web applications focused on online quizzes has expanded. However, while various platforms offer quiz-creation services, not all meet the academic requirements of specific curricula or support LaTeX-style mathematical notation. This paper outlines the development process of a web application designed to provide incoming Preparatoria Agrícola students with an online tool for reviewing and improving their skills in simplifying fractions. The process involved three steps: 1) establishing difficulty levels; 2) using AI to generate Python code for the exercises; and 3) using AI to generate HTML, CSS, and JavaScript code for the web application itself. We found that while it is possible to create a web application using this approach, success depends on two factors: A) crafting effective prompts so the AI generates code with minimal errors; and B) possessing basic knowledge of Python and HTML programming, as AI-generated code does not always yield the expected results and requires manual review to ensure proper functionality.

[1, 2, 3]Departamento de Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carr México-Texcoco. Chapingo, Edo México, CP 56230. México. nramirezn@chapingo.mx, opalmerosr@chapingo.mx, aherreraf@chapingo.mx.

Keywords: Online quizzes, Artificial Intelligence, Educational Web Applications, LaTeX.

Introducción

Los cuestionarios en línea son una herramienta que se usa para evaluar el nivel de comprensión de los estudiantes, preparar exámenes. En algunos casos estos cuestionarios incluyen retroalimentación inmediata para que los estudiantes puedan visualizar la respuesta correcta, los pasos para llegar al resultado o el número de aciertos y errores que obtuvieron permitiendo que los estudiantes identifiquen sus fortalezas y debilidades. Diversas investigaciones reportan beneficios de los cuestionarios en línea como incremento en las calificaciones (Awan et al., 2024; Panaoura et al., 2025; Yanuarto & Hastinasyah, 2023). Ross et al. (2018) mencionan que un alto porcentaje de los estudiantes disfruta el desafío de los cuestionarios con niveles de dificultad creciente, así mismo, indica que los cuestionarios adaptativos son la mejor herramienta para conseguirlo.

En internet, existen diferentes plataformas que permiten utilizar cuestionarios de matemáticas en línea, por ejemplo: la.ixl.com, www.matesfacil.com/tests/, www.thatquiz.org/es/, sin embargo, el material de apoyo muchas veces no se adapta a la profundidad de trabajo del profesor (Meishar-Tal et al., 2026). Cuando el instrumento no se adapta a las necesidades del curso, el docente puede recurrir a diseñar el material que necesita, para ello cuentan con otras plataformas como: www.thatquiz.org/es/, www.wiris.com/es/wirisquizzes/, es.educaplay.com/, entre otros. No obstante, esta solución origina otro tipo de problemas, esto se debe a que, en muchos casos las plataformas no pueden mostrar notación matemática como se haría en formato LaTeX. Para saltar este obstáculo, se puede recurrir a colocar imágenes, hecho que convierte al proceso de diseñar el cuestionario en una tarea compleja y que requiere invertir mucho tiempo, Meishar-Tal et al., (2026). Otra opción es recurrir a plataformas de pago, que cuenten con la opción para colocar notación matemática, sin embargo, este camino requiere comprar una licencia mensual o anual, y aun así, habrá ciertas limitaciones como el número de usuarios que pueden acceder a las actividades diseñadas, o el hecho de que la mayoría de las plataformas de paga están en inglés, Cruz et al., (2025).

En los últimos años la Inteligencia Artificial (IA), en particular los grandes modelos de lenguaje (LLM, por sus siglas en inglés), han revolucionado los sistemas conversacionales, generación de código, redacción científica y creación de contenido (Patel & Dholakiya, 2025). Los sistemas conversacionales (Chatbots), han sido los que más se han popularizado entre los estudiantes y la población en general, sin embargo, Buscemi, (2023) destaca que los LLM han demostrado habilidades notables para generar código funcional y resolver problemas complejos. Entre los lenguajes de programación que la inteligencia artificial puede codificar se encuentran: Python, JavaScript, C, Java, HTML5, CSS3, R, LaTeX, entre otros. Python es un lenguaje de programación empleado principalmente para generar ejercicios matemáticos. Por su parte, HTML, CSS y JavaScript son los programas necesarios para generar una aplicación web.

Para poder generar código mediante una inteligencia artificial como Gemini, ChatGPT, DeepSeek o cualquier otra, es importante redactar indicaciones (prompt) de calidad, para redactar una buena indicación Federiakin et al. (2024) mencionan que la estructura básica que debe tener una buena instrucción para hacer una petición a alguna inteligencia artificial es:

- **Instrucción**: tarea específica que guía el comportamiento del modelo.
- **Contexto**: información externa o adicional que proporciona conocimiento de fondo.
- **Datos de entrada**: contenido que el modelo necesita procesar.
- **Indicador de salida**: tipo o formato deseado de la respuesta.

Para DeepSeek (2026) y para Gemini (2026), una buena instrucción tiene la siguiente estructura:

- **Rol**: Define la perspectiva, la especialidad o la personalidad desde la que Gemini debe responder.
- **Tarea u Objetivo**: Describe la acción principal de forma clara y directa utilizando verbos de acción.
- **Contexto o Antecedentes**: Aporta la información de fondo relevante: público objetivo, restricciones, conocimientos previos o el escenario actual.
- **Instrucciones de Formato y Estilo**: Especifica la estructura final del resultado (tablas, código, listas, formato Markdown, LaTeX, tono formal o accesible, longitud, etc.).
- **Restricciones o Deslindes**: Define los límites claros para evitar rellenos inútiles o sesgos no deseados.

El objetivo de este trabajo es mostrar la ruta que el equipo de trabajo utilizó en la generación de una aplicación web visualmente atractiva, interactiva, intuitiva, y personalizada para adolescentes, pero además, que despliegue texto científico estilo LaTeX. La aplicación busca que los estudiantes de nuevo ingreso de la Preparatoria Agrícola, cuenten con una herramienta en línea para repasar y mejorar en la simplificación de fracciones.

Una fracción es una expresión matemática de la forma:

$$\frac{p}{q} \tag{1}$$

con$p$ y $q \in \mathbb{Z}$ y $q \neq 0$.

para que una fracción se pueda simplificar, se requiere que el $\mathrm{MCD}(p, q) \neq 1$.

Una fracción se puede dividir en simplificables y no simplificables. Para fines académicos, se consideró que la simplificable puede ser representada como una de las 3 formas siguientes: $\frac{1}{n}$, $\frac{m}{1}$y $\frac{m}{n}$, con$m$ y $n \in \mathbb{Z}$ y $n \neq 0$.

Materiales y Métodos

En este trabajo se emplearon las inteligencias artificiales Gemini IA (gemini.google.com/app) y DeepSeek (deepseek.com). DeepSeek se utilizó para solicitar la escritura del código o los programas en el lenguaje de Python, mientras que Gemini se utilizó para la construcción las aplicaciones web.

Los pasos que se siguieron son:

1) Construir o acordar la estructura de los niveles de dificultad que tendrá cada cuestionario, así como el tipo de retroalimentación que se le proporcionará al estudiante.
2) Solicitar, a la inteligencia artificial (IA) DeepSeek, el código para generar los niveles de dificultad.
3) Solicitar, a Gemini el código para generar la aplicación web.

Estructura de los niveles de dificultad.

Para la simplificación de fracciones se acordaron 10 niveles de dificultad, esto se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Niveles de dificultad para la aplicación web sobre simplificación de fracciones. Fuente: Elaboración propia.

Nivel	Rango de valores para p y q.	MCD(p, q) esperado
1	[1, 30]	{2,3,5,7}
2	[1, 30]	{4, 6, 9,10,14,15}
3	[31, 60]	{3, 7, 11, 13}
4	[31, 60]	{8, 9, 12, 18, 20, 21, 27, 28, 33, 39}
5	[61,100]	{3, 7, 11, 13, 17}
6	[61,100]	{8, 9, 12, 18, 20, 21, 27, 28, 30, 33, 35, 39, 42}
7	[101-150]	{7, 11, 13, 17}
8	[101-150]	{8, 9, 12, 18, 20, 21, 27, 28, 30, 33, 35, 39, 42}
9	[151-200]	{11, 13, 17, 19}
10	[151-200]	{8, 12, 18, 20, 21, 27, 28, 30, 33, 34, 35, 42}

Solicitud del código en DeepSeek.

Para solicitar el código en Python para generar las diferentes fracciones se construyó la siguiente instrucción (prompt).

Cuadro 2. Instrucción solicitada a DeepSeek, para generar los ejercicios. Fuente: Elaboración propia con apoyo de DeepSeek.

Rol:
Eres un experto desarrollador Python especializado en generación de contenido educativo matemático, con amplia experiencia en algoritmos de generación de fracciones, manejo de números racionales y optimización de código. Tu conocimiento incluye técnicas avanzadas de programación orientada a objetos, manejo eficiente de estructuras de datos y generación de archivos con formato específico para sistemas de aprendizaje.

Instrucción:
Diseña un programa en Python que cumpla exactamente con las siguientes especificaciones para generar 200 fracciones de la forma p/q, organizadas en 10 niveles de 20 fracciones cada uno. El programa debe ser robusto, eficiente y seguir rigurosamente todas las condiciones indicadas. Como experto, asegura que el código sea profesional, bien documentado y siga las mejores prácticas de programación en Python.

Requisitos generales:
1. El programa debe generar exactamente 200 fracciones (20 por nivel).
2. Cada fracción debe ser única dentro de su nivel (no repetir la misma fracción).

3. Debe garantizar que se cumplan las cantidades exactas de cada tipo de ejercicio por nivel (1/n, m/1, m/n, irreducibles).
4. Para las fracciones que se simplifican a 1/n o m/1, los valores de p o q deben comenzar desde 1 hasta el límite superior del rango de cada nivel (según corresponda).
5. El programa debe guardar todas las fracciones en un archivo de texto con el formato JSON especificado.
6. Debe incluir validaciones para asegurar que el MCD(p,q) sea exactamente el valor esperado y que las fracciones generadas sean válidas.
7. No están permitidas las fracciones en las cuales p=q
8. El nombre del archivo de texto es "simplificacion.txt"

Estructura de niveles:
Nivel 1:
- Rango numerador: 1-30, denominador: 2-30
- MCD debe ser primo de {2,3,5,7}
- Distribución: 4 ejercicios → 1/n, 4 → m/1, 8 → m/n, 4 → MCD=1 (irreducibles)

Nivel 2:
- Rango numerador: 1-30, denominador: 2-30
- MCD debe ser de {4,6,9,10,14,15} (compuestos)
- Distribución: 4 → 1/n, 4 → m/1, 8 → m/n, 4 → MCD=1

Nivel 3:
- Rango numerador: 31-60, denominador: 31-60
- MCD debe ser primo de {3,7,11,13}
- Distribución: 3 → 1/n, 3 → m/1, 10 → m/n, 4 → MCD=1

Nivel 4:
- Rango numerador: 31-60, denominador: 31-60
- MCD debe ser de {9,21,33,39,8,12,18,20,27,28} (compuestos)
- Distribución: 3 → 1/n, 3 → m/1, 10 → m/n, 4 → MCD=1

Nivel 5:
- Rango numerador: 61-100, denominador: 61-100
- MCD debe ser primo de {3,7,11,13,17}
- Distribución: 3 → 1/n, 3 → m/1, 11 → m/n, 3 → MCD=1

Nivel 6:
- Rango numerador: 61-100, denominador: 61-100
- MCD debe ser de {9,21,33,35,8,12,18,20,27,28,30,33,39,42} (compuestos)
- Distribución: 2 → 1/n, 2 → m/1, 14 → m/n, 2 → MCD=1

Nivel 7:
- Rango numerador: 101-150, denominador: 101-150
- MCD debe ser primo de {7,11,13,17}
- Distribución: 2 → 1/n, 2 → m/1, 14 → m/n, 2 → MCD=1

Nivel 8:

- Rango numerador: 101-150, denominador: 101-150
- MCD debe ser de {9,21,33,35,8,12,18,20,27,28,30,33,39,42} (compuestos)
- Distribución: 2 → 1/n, 2 → m/1, 14 → m/n, 2 → MCD=1

Nivel 9:
- Rango numerador: 151-200, denominador: 151-200
- MCD debe ser primo de {11,13,17,19}
- Distribución: 2 → 1/n, 2 → m/1, 16 → m/n (NO hay irreducibles en este nivel)

Nivel 10:
- Rango numerador: 151-200, denominador: 151-200
- MCD debe ser de {21,33,34,35,8,12,18,20,27,28,30,42} (compuestos)
- Distribución: 1 → 1/n, 1 → m/1, 18 → m/n (NO hay irreducibles)

Formato de salida:
El archivo debe llamarse “simplificacion.txt” y cada línea debe tener el siguiente formato exacto:

{ level: 1, question: "\\dfrac{27}{30}", num: 9, den: 10, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{9}{10}\\)" },

Donde:
- level: número del nivel (1-10)
- question: fracción original en formato LaTeX (sin simplificar)
- num: numerador simplificado
- den: denominador simplificado (si es 1/n, num=1; si es m/1, den=1)
- error: mensaje con la fracción simplificada en LaTeX

Consideraciones técnicas:
- Usa la función `math.gcd` para calcular el MCD.
- Para generar fracciones con un MCD específico, multiplica el MCD por dos números coprimos (que cumplan con los rangos).
- Asegura que el denominador nunca sea 0.
- Para los casos irreducibles (MCD=1), genera aleatoriamente hasta encontrar un par con MCD=1.
- Para los casos 1/n y m/1, asegura que el numerador o denominador simplificado sea 1 según corresponda.
- Implementa un mecanismo para evitar duplicados dentro del mismo nivel.
- El código debe estar bien comentado y ser fácil de modificar.

Ejemplo de fracción generada:
- Si se genera la fracción 27/30 (MCD(27,30)=3), la salida sería:
  { level: 1, question: "\\dfrac{27}{30}", num: 9, den: 10, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{9}{10}\\)" },

Solicitud del código en Gemini.

Para solicitar el código y generar la aplicación web de simplificaciones se construyó la siguiente instrucción (prompt).

Cuadro 3. Instrucción solicitada a Gemini, para generar la Aplicación Web.
Fuente: Elaboración propia con apoyo de Gemini

Rol:
Actúa como un desarrollador front-end senior especializado en experiencias educativas interactivas. Tu enfoque es crear aplicaciones web accesibles, visualmente atractivas y con una lógica de juego clara, priorizando la usabilidad para adolescentes y el correcto renderizado de notación matemática.

Instrucción:
Quiero que escribas el código HTML, CSS y JavaScript de una aplicación web educativa tipo mathquiz interactivo y atractivo, dirigida a estudiantes de 16 años de México. El tema y título de la aplicación es: “simplificación de fracciones”.

Requerimientos Generales:
Idioma: Español de México.

Tecnología: HTML, CSS (diseño limpio y profesional) y JavaScript. Utiliza MathJax para renderizar todas las expresiones matemáticas.
Estética: Usa una paleta de colores: Azul marino, gris plateado, blanco y negro.

Datos: Los datos adjuntos contienen 20 filas (2 por nivel, del 1 al 10). Las columnas son: 1-Nivel, 2-Pregunta, 3-Respuesta Numerador, 4-Respuesta Denominador, 5-Mensaje de error.

Datos:
{ level: 1, question: "\\dfrac{2}{14}", num: 1, den: 7, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{7}\\)" },
{ level: 1, question: "\\dfrac{5}{25}", num: 1, den: 5, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{5}\\)" },
{ level: 2, question: "\\dfrac{15}{30}", num: 1, den: 2, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{2} \\)" },
{ level: 2, question: "\\dfrac{4}{28}", num: 1, den: 7, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{7} \\)" },
{ level: 3, question: "\\dfrac{3}{48}", num: 1, den: 16, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{16} \\)" },
{ level: 3, question: "\\dfrac{3}{45}", num: 1, den: 15, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{15} \\)" },
{ level: 4, question: "\\dfrac{8}{48}", num: 1, den: 6, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{6} \\)" },
{ level: 4, question: "\\dfrac{9}{36}", num: 1, den: 4, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{4} \\)" },
{ level: 5, question: "\\dfrac{3}{84}", num: 1, den: 28, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{28} \\)" },
{ level: 5, question: "\\dfrac{7}{63}", num: 1, den: 9, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{9} \\)" },
{ level: 6, question: "\\dfrac{18}{72}", num: 1, den: 4, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{4} \\)" },

{ level: 6, question: "\\dfrac{9}{99}", num: 1, den: 11, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{11} \\)" },
{ level: 7, question: "\\dfrac{7}{147}", num: 1, den: 21, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{21} \\)" },
{ level: 7, question: "\\dfrac{7}{119}", num: 1, den: 17, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{17} \\)" },
{ level: 8, question: "\\dfrac{8}{128}", num: 1, den: 16, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{16} \\)" },
{ level: 8, question: "\\dfrac{21}{105}", num: 1, den: 5, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{5} \\)" },
{ level: 9, question: "\\dfrac{11}{165}", num: 1, den: 15, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{15} \\)" },
{ level: 9, question: "\\dfrac{17}{153}", num: 1, den: 9, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{9} \\)" },
{ level: 10, question: "\\dfrac{8}{200}", num: 1, den: 25, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{25} \\)" },
{ level: 10, question: "\\dfrac{12}{156}", num: 1, den: 13, error: "La respuesta correcta es: \\(\\dfrac{1}{13} \\)" }

Lógica del Juego:
- El cuestionario consta de 10 preguntas en total.
- Inicia en el Nivel 1.

Flujo de niveles:
- Si la respuesta es correcta: Sube al siguiente nivel (máximo nivel 10).
- Si la respuesta es incorrecta: Baja un nivel (mínimo nivel 1).
- El nivel más bajo es el nivel 1.
- Cada nivel debe elegir una pregunta aleatoria de las 20 disponibles.

Validación: Compara la entrada del usuario con las columnas 3 y 4.

Estructura de la Interfaz:

- Pantalla de Instrucciones:
Imágenes: logo1.png y logo2.png en la parte superior.
Títulos: "Simplificación de fracciones", Subtítulos: "Preparatoria XX1", "Universidad XX2".
Instrucciones: "La siguiente aplicación tiene como objetivo practicar la simplificación de fracciones".
Pie de página: "Diseñado por: XX3, XX4, XX5".

- Pantalla de Ejercicios:
Encabezado: "Pregunta: X" (izquierda), "Aciertos: X" (centro) y "Nivel: X" (derecha).
Texto en contraste "Simplifica la fracción:".
Centro: Pregunta (MathJax) + signo igual + dos campos de entrada (numerador/denominador con línea horizontal).
Botón de validación (color verde de contraste).

Feedback: Si es correcto, muestra '¡Felicidades acertaste!'. Si es incorrecto, muestra el texto de la columna 5. En ambos casos, añade una pausa de 3 segundos antes de avanzar o retroceder de nivel.

- Pantalla Final:
Nivel >= 8: "¡Felicidades!"
Nivel 5 a 7: "¡Muy bien!, pero necesitas estudiar más"
Nivel < 5: "¡Es necesario estudiar la simplificación de fracciones!"
Mostrar resumen: "Contestaste bien X preguntas" y "El nivel que alcanzaste fue: X".

Consideraciones extra que consideres necesarias (feedback sonoro opcional, confeti al final, efectos visuales al responder, etc.) — incluye al menos un par de efectos para hacerlo más atractivo.

Genera el código completo (HTML, CSS, JS) en una sola pieza funcional, lista para copiar y probar en un navegador.

Resultados y discusión

Si bien con la ayudad de la IA se obtuvo una aplicación para que los estudiantes practiquen la simplificación de fracciones, es importante mencionar que para mejorar la eficacia de las instrucciones (prompt), se decidió utilizar y apoyarnos con la IA, esto es, solicitar una instrucción con las características de una buena instrucción. Es importante mencionar que cada que la IA generaba una instrucción, se tenía que analizar, revisar y modificar de acuerdo a las necesidades de lo que se quería solicitar.

Así mismo se observó que al ejecutar el código generado en Python, por DeepSeek, este programa no arrojaba los resultados esperados o generaba ciclos infinitos, por lo cual, dicho código se tuvo que revisar, estudiar y modificar para depurar los errores. Es decir, no basta con solicitar el código, se requiere tener cierto conocimiento de programación en el lenguaje solicitado, para garantizar que el programa realice las tareas solicitadas.

Finalmente, al solicitar la aplicación web en Gemini, también encontramos ciertos errores, por ejemplo no incluía los 200 reactivos que se le proporcionaron, por lo que se tuvo que revisar y editar el código para agregar los faltantes. Es importante mencionar que también se editaron, en el código, los nombres de los autores por razones de seguridad.

En las imágenes 1, 2, 3, 4 y 5 se puede observar la pantalla de instrucciones, de ejercicios y la pantalla final.



Figura 1. Pantalla de instrucciones de la Aplicación Web.
Fuente: Captura de pantalla de la Aplicación Web.



Figura 2. Pantalla de ejercicios de la Aplicación Web.
Fuente: Captura de pantalla de la Aplicación Web.

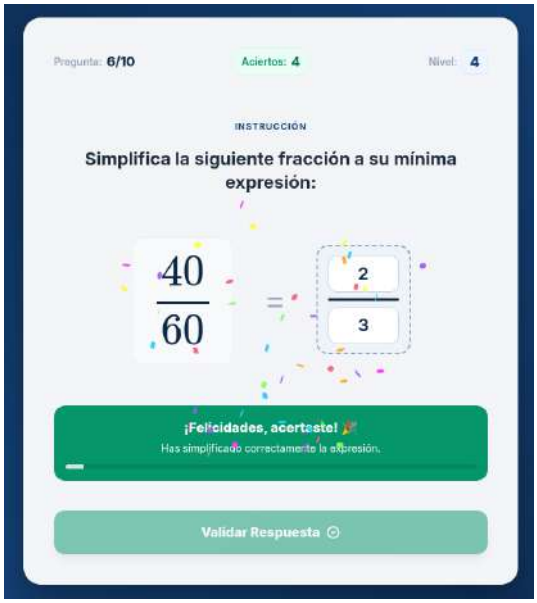


Figura 3. Pantalla de ejercicios que incluye una felicitación cuando la respuesta es correcta.
Fuente: Captura de pantalla de la Aplicación Web.



Figura 4. Pantalla de ejercicios que incluye una retroalimentación cuando la respuesta no es correcta.
Fuente: Captura de pantalla de la Aplicación Web.

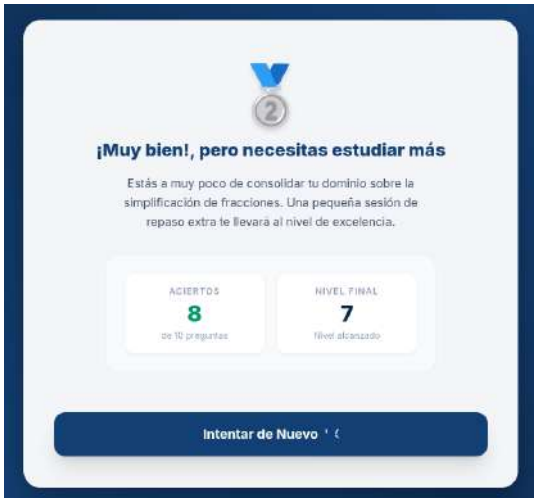


Figura 5. Pantalla final que indica el número de aciertos y el nivel final alcanzado.
Fuente: Captura de pantalla de la Aplicación Web.

Conclusiones

Realizar cuestionarios en línea utilizando inteligencia artificial (IA), es una opción conveniente. Para lograr los resultados esperados, es importante verificar que el prompt siga la estructura de una buena instrucción, esto garantiza que los programas generados tengan la menor cantidad de errores. Es necesario que los creadores cuenten con conocimientos de programación en el lenguaje de interés, en el caso de aplicaciones para matemáticas, se sugiere Python, HTML, CSS y JAvaScript, esto permitirá detectar y corregir algunas de las inconsistencias o errores identificados en el código. Finalmente mencionar y destacar que, con la realización de los tres pasos propuesta en la sección de materiales y métodos, fue posible obtener una Aplicación Web. El mayor tiempo invertido fue en acordar los niveles de dificultad de las aplicaciones.
Como resultado del presente trabajo, actualmente se están construyendo otras aplicaciones web para abordar las operaciones básicas de las fracciones, es decir, sumas y restas de fracciones homogéneas y heterogéneas, así como la multiplicación y división de fracciones.

Literatura Citada

Awan, S. M., Hussain, R., Saleem, K. (2024). Effect of smart classroom's online quiz on academic achievement: An empirical evidence from the high school of Pakistan. Pakistan Journal of Distance and Online Learning, 10(1), 55-66.

Buscemi, A. (2023). A Comparative Study of Code Generation using ChatGPT 3.5 across 10 Programming Languages (Versión 1). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2308.04477

Cruz, M. D. D., Welmer, M. S. W., & Cardoso, V. C. (2025). Conceptions of in-service and pre-service teachers regarding the use of some educational mathematics games. Revemop, 7, e2025003. https://doi.org/10.33532/revemop.e2025003

DeepSeek. (2026, Julio 25). Estructura de un prompt para DeepSeek [Generative AI chat]. DeepSeek V3. https://chat.deepseek.com/a/chat/s/ee25ded2-1584-4580-8237-fed142464caa

Federiakin, D., Molerov, D., Zlatkin-Troitschanskaia, O., & Maur, A. (2024). Prompt engineering as a new 21st century skill. Frontiers in Education, 9, 1366434. https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1366434

Google. (2026, Julio 25). Estructura de un Prompt Efectivo para Gemini [Generative AI chat]. Gemini 3.6 Flash. https://gemini.google.com/app/3077161ed4e9f628

Meishar-Tal, H., Amzalag, M., Persi, J., & Sapir, L. (2026). Drivers and barriers to academic instructors' willingness to adopt student-generated online quiz games as an assessment method. Active Learning in Higher Education, 27(1), 65–82. https://doi.org/10.1177/14697874241286076

Panaoura, A., Tsolaki, E., Charalambides, M., & Pericleous, S. (2025). Online quizzes as a self-assessment tool in higher education: The case of Mathematics in Business Administration. Bolema: Boletim de Educação Matemática, 39, e240124. https://doi.org/10.1590/1980-4415v39a240124

Patel, S., & Dholakiya, R. A. (2025). Large Language Models: Evolution, Architecture, Applications, and Future Horizons. 2025 5th International Conference on Soft Computing for Security Applications (ICSCSA), 1922–1929. https://doi.org/10.1109/ICSCSA66339.2025.11170884

Ross, B., Chase, A.-M., Robbie, D., Oates, G., & Absalom, Y. (2018). Adaptive quizzes to increase motivation, engagement and learning outcomes in a first year accounting unit. International Journal of Educational Technology in Higher Education, 15(1), 30. https://doi.org/10.1186/s41239-018-0113-2

Shao, Z., Zhao, R., Yuan, S., Ding, M., & Wang, Y. (2022). Tracing the evolution of AI in the past decade and forecasting the emerging trends. Expert Systems with Applications, 209, 118221. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118221

Yanuarto, W. N., & Hastinasyah, P. D. (2023). Gamification: Quizizz in Mathematical Game Learning for Secondary Students. Indonesian Journal of Mathematics Education, 5(2), 64–73. https://doi.org/10.31002/ijome.v5i2.6588

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Evaluación del Método Racional en la cuenca río Chapingo, con precipitación puntual y distribuida espacialmente.

Gerardo Emmanuel Cervantes González[1], Erick Giovanni Martínez Esquivel[1], Jorge Víctor Prado Hernández[2]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible.

Resumen

La medición directa de variables hidrológicas en México suele verse limitada por sus elevados costos operativos e instrumental, derivando en la adopción de métodos indirectos desarrollados en el extranjero. Sin embargo, la escasa disponibilidad y baja resolución espacial de la información pluviométrica local incrementan significativamente la incertidumbre en los resultados. Un ejemplo representativo es el Método Racional, ampliamente utilizado en el diseño de obras hidroagrícolas para la estimación del caudal pico (Qp) por su fácil aplicabilidad. La presente investigación evalúa el desempeño del Método Racional en la microcuenca del río Chapingo, analizando la variabilidad en los resultados al comparar el uso de información procedente de una sola estación meteorológica (Chapingo) frente a los datos recabados por tres pluviógrafos instalados dentro del área de estudio. El monitoreo del tirante en la salida de la cuenca se realizó mediante un sensor ultrasónico (SRF06) calibrado con la función caudal-tirante de la sección. La evaluación del modelo se fundamentó en la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Los resultados mostraron que, al utilizar los registros de todos los pluviógrafos distribuidos, el valor del RMSE obtenido fue de 2.090 m^3/s (con un NSE de -9.422), mientras que al emplear únicamente la estación Chapingo el error ascendió a 6.380 m^3/s (NSE de -96.160). Estos hallazgos evidencian una notable mejoría en las estimaciones del Qp al disponer de una mayor densidad de puntos de medición, demostrando que la caracterización espacial de la lluvia es determinante para reducir el sesgo hidrológico.

Palabras claves: Método Racional, RMSE, NSE, caudal pico, variabilidad espacial.

Abstract

Due to high operational costs and the complexity involved in measuring hydrological variables with high precision, estimation methods developed in other countries have been adopted in Mexico. However, the scarce availability and low spatial resolution of local rainfall data significantly increase uncertainty in the outputs. A representative example is the Rational Method, widely used in hydro-agricultural infrastructure design to estimate peak discharge (Qp) due to its ease of application. This research evaluates the performance of the Rational Method in the Chapingo River micro-watershed, analyzing the variability in results when comparing data from a single external meteorological station (Chapingo) against records gathered by a rain gauge network installed within the study area. Streamflow stage monitoring at the watershed outlet was conducted using an ultrasonic sensor (SRF06) calibrated with a stage-discharge relationship.

[1, 2]Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agricola y Uso Integral del Agua, gecgone@gmail.com, jiomt2010@gmail.com, vpradohdez@gmail.com

Model evaluation was based on the Root Mean Square Error (RMSE) and the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). The results showed that using data from all distributed rain gauges yielded an RMSE of 2.090 m³/s (with an NSE of -9.422), whereas relying solely on the Chapingo station increased the error to 6.380 m³/s (NSE of -96.160). These findings highlight a notable improvement in peak flow estimations when a higher density of measurement points is available, demonstrating that the spatial characterization of rainfall is decisive in reducing hydrological bias.

Keywords: Rational Method, RMSE, NSE, peak discharge, spatial variability.

Introducción

Uno de los fenómenos naturales más complejos e impredecibles de analizar es el ciclo hidrológico, el cual constituye el objeto de estudio de la hidrología. Dentro de esta disciplina, existe una rama fundamental conocida como hidrología superficial, la cual se encarga de estudiar el agua que escurre sobre la superficie de una cuenca hasta su salida. Dicho escurrimiento se origina cuando la precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo y satisface el almacenamiento en depresiones, generando un excedente hídrico que fluye por la red de drenaje hasta la salida de la cuenca. La cuantificación de dicho fenómeno resulta fundamental para el diseño y dimensionamiento de infraestructura hidroagrícola, incluyendo obras de captación, redes de alcantarillado y estructuras de control hidráulico (Simpson et al., 2023).

Existen diversos métodos para estimar la escorrentía superficial que fluye a través de la red de drenaje, los cuales se dividen en métodos directos e indirectos. Los métodos directos son los más precisos; sin embargo, el costo de los equipos, su mantenimiento y la mano de obra requerida resultan muy elevados. Por otro lado, se cuenta con métodos indirectos que permiten estimar las variables hidrológicas de interés. Aunque presentan una menor precisión que los métodos directos, su viabilidad económica los convierte en una alternativa accesible. Entre los métodos indirectos más utilizados destacan el Método Racional, el modelo de Green-Ampt y el método del Número de Curva del SCS (SCS-CN) (Kumar et al., 2021).

El Método Racional es comúnmente usado para la estimación del caudal pico (Qp), es decir, el máximo caudal que genera un evento de lluvia dentro de una cuenca debido que requiere poca información para su aplicabilidad (Kencanawati et al., 2021). Al-Amri (et al.,2023) lograron estimar Qp de manera exitosa sobre una cuenca cuya área superaba los 4900 km^2 en una región árida en Arabia Saudita. Por otro lado, Paulíková (et al.,2024) realizaron un estudio a 29 cuencas pequeñas en Eslovaquia, cuyas áreas varían de los 7.94 km^2 a 49.63 km^2, encontrado que el método sobreestimaba en gran medida el Qp. Debido a la naturaleza del Método Racional, es importante considerar que fue desarrollado para cuencas pequeñas. Esto se debe a que asumir una precipitación uniforme en toda la superficie genera un alto grado de incertidumbre a medida que aumenta el área de la cuenca, lo que plantea incógnitas sobre el tamaño límite para su correcta aplicación. Grimaldi y Petroselli (2014) mencionan que una de las principales limitaciones del método es el coeficiente C, pues este no fue derivado de la calibración de coeficientes de escorrentía en cuencas experimentales, sino que fue propuesto mediante la consulta a expertos. Otra de las limitaciones es la clasificación del uso y tipo de suelo, la cual se restringe a pocas categorías; esto introduce cierta subjetividad al depender del criterio de cada especialista, lo que repercute directamente en los resultados obtenidos.

Es por ello por lo que esta investigación busca evaluar la efectividad de este método al aplicarlo en la microcuenca del río Chapingo, en la cual se obtuvieron datos mediante la instrumentación del área de estudio. De este modo, se busca analizar la variabilidad existente entre el uso de

datos de una sola estación meteorológica cercana a la cuenca y la utilización de la información recabada por los instrumentos instalados en su interior. Se plantea como hipótesis que la integración de los datos pluviométricos de los instrumentos internos capturará de forma más precisa la heterogeneidad espacial de la lluvia, reduciendo significativamente la incertidumbre en la estimación de Qp con respecto a los datos provenientes de una única estación externa.

Materiales y Métodos

La presente investigación se desarrolló en la microcuenca del río Chapingo, la cual presenta cinco tipos de suelo: cambisol (39.46 %), feozem (27.84 %), litosol (26.81 %), andosol (5.85 %) y vertisol (0.04 %). Respecto al uso de suelo y cobertura, los cuatro predominantemente observados son reforestación (15.13 %), agricultura de temporal (13.01 %), bosque de pino (13.33 %) y zona urbana (12.21 %) (Piza, 2017).
La microcuenca cuenta con un área total de 15.47 km^2, una pendiente de 33.1% y sus altitudes van desde los de 3580 msnm en el punto más alto, hasta los 2250 msnm en la parte baja. Y sus coordenadas en el extremo más alto de la cuenca son 19° 25’ 15.28” N, 98° 45’ 40.31” W y en el extremo bajo 19° 29’ 22.83” N, 98° 53’ 9.17” W.
Para obtener los datos de precipitación, se contó con tres pluviógrafos y la estación meteorológica de Chapingo. Los pluviógrafos se instalaron en sitios seguros y de fácil acceso, considerando las condiciones óptimas para garantizar una correcta medición. En el Cuadro 1 se muestran las coordenadas de los tres pluviógrafos, así como la ubicación de la estación meteorológica y su área de influencia. Para la obtención del área, se aplicó el método de los polígonos de Thiessen con ayuda del programa ArcGIS. En la Figura 1 se observa la distribución espacial de los puntos de medición y sus respectivas áreas de influencia.

Cuadro 15. Ubicación de los dispositivos de medición de la precipitación.

Marca	Área de influencia de cada dispositivo (m^2)	Nombre	Coordenadas
DAVIS®	8,902,427.80	Tequexquináhuac	19° 29’ 09” N, 98° 53’ 07" W
DAVIS®	697,535.27	Canoas	19° 29’ 32” N, 98° 49’ 32” W
HOBO®	4,332,541.40	San Dieguito	19° 28’ 28” N, 98° 49’ 28” W
Estación Chapingo	1,538,941.30	Chapingo	19° 29’ 40” N, 98° 53’ 19” W

Fuente: Elaboración propia

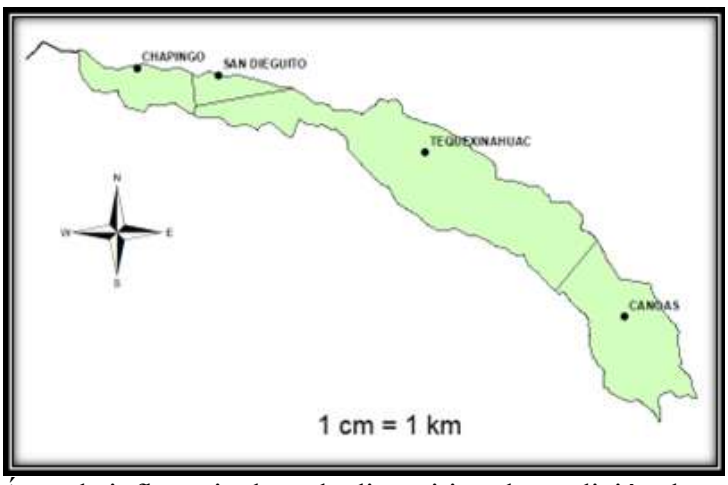


Figura 30. Área de influencia de cada dispositivo de medición de precipitación.

Fuente: Elaboración propia

Los pluviógrafos instalados corresponden a dos marcas (DAVIS® y HOBO®). En los Cuadros 2 se presentan las especificaciones técnicas de los dispositivos utilizados, respectivamente, mientras que en la Figura 2 se muestran los equipos instalados en sus puntos correspondientes.

Cuadro 2. Especificaciones técnicas del pluviómetro DAVIS®

Marca	DAVIS®	HOBO®
Modelo	6462	RG3-M
País de origen	Estados Unidos	Estados Unidos
Tasa máxima de lluvia	1.0 cm por hora	12.7 cm por hora
Precisión	0.2 mm	0.2 mm
Dimensiones (sin picos)	23.5 cm de ancho x 26 cm alto x 28 cm profundo.	25.72 cm alto x 15.24 diámetro; 15.39 orificio receptor
Precisión de tiempo	1.0 segundos	1.0 segundos

Fuentes: Adaptado de Replacement Rain Cone Kit Instrcution Sheet (SKU 6462), por Davis Instruments, 2019, p. 1; y Adaptado de Data Logging Rain Gauge RG3 and RG3-M User's Manual, por Onset Computer Corporation, 2018, p. 2.



Tequexquináhuac Davis ® | Canoas Davis ® | San Dieguito Davis ®

Figura 31. Pluviómetros instalados en la parte alta y media de la microcuenca del Rio Chapingo. Fuente: Elaboración propia

El periodo de toma de datos abarcó del 23 de agosto al 19 de noviembre de 2019. Los pluviógrafos fueron programados para registrar información a intervalos de un minuto. Estos datos de precipitación se analizaron bajo dos enfoques para estimar el Qp mediante el Método Racional: en el primero se utilizaron únicamente los registros de la estación meteorológica de Chapingo, mientras que en el segundo se utilizó la información recolectada en los cuatro puntos de medición.

Este método considera una cuenca semipermeable en la que solo una fracción de la precipitación con intensidad "i" escurre directamente hacia la salida. Si se asume que durante el evento de lluvia (o al menos una vez alcanzado el caudal de equilibrio) la capacidad de infiltración se mantiene constante, la fórmula del Método Racional se expresa como:

$$Q_p = C \cdot i \cdot A_c \tag{1}$$

Donde Qp es el caudal pico (m^3/s), A es el área de drenaje (m^2), i es la intensidad de lluvia (m/s) y C el coeficiente de escorrentía (adimensional). La intensidad de lluvia se obtiene a partir de una curva intensidad-duración-frecuencia, utilizando como entrada, tanto el periodo de retorno como una duración igual al tiempo de concentración; el valor del coeficiente de escorrentía es una función del uso de suelo, la condición de cobertura, grupo de suelo y la pendiente de la cuenca. Para el valor del coeficiente de escorrentía se utilizaron los propuestos por Aparicio (2018) y las propuestas por el Colegio de Postgraduados (1980).

La evaluación se realizó mediante medición directa a través del método de caudal-tirante calibrada, una adaptación del sistema de sección-pendiente. Su aplicación requiere la topografía de un tramo y las marcas de nivel máximo del agua durante el paso de la avenida. Esta metodología emplea el modelo matemático de Manning para calcular la velocidad del agua en función de su tirante como se observa en la Ecuación 2.

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S_f^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

Donde v representa la velocidad media del agua que se promedia a través de toda la sección trasversal (m/s), R es el radio hidráulico (m), n es el coeficiente de rugosidad de Manning ($s/m^{1/3}$) y S_f representa la pendiente de la línea de energía(m/m). Asumiendo que los valores de n y S_f se mantiene contantes independientemente del nivel del agua, y contando con la topografía de la sección transversal levantada, es posible adaptar la ecuación para estimar el caudal en función del tirante o nivel que alcance el flujo del cauce. (Ferguson, 2021)

El caudal se obtuvo en la salida de la cuenca, en la cual se instaló un sensor ultrasónico (modelo SRF06) para medir el tirante del flujo en la sección transversal de control. Con ayuda de la función caudal-tirante, calibrada previamente por Ríos (2017), se determinó el caudal que circula por dicha sección a intervalos de un minuto. El punto de salida se localiza dentro de una estación hidroclimatológica de la Conagua (19° 29′ 09″ N, 98° 53′ 07″ O).

En la evaluación del desempeño del Método Racional, se utilizó el parámetro estadístico de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), el cual es ampliamente empleado para medir el rendimiento de modelos hidrológicos; al respecto, Chai y Draxler (2014) señalan al RMSE como una métrica estándar para la evaluación de errores en modelación. La ecuación correspondiente se expresa como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}(y_j - \hat{y}_j)^2}{N}} \tag{3}$$

Donde y_j representa el valor j-ésimo observado, $\hat{y}_j$ es el valor j-ésimo estimado, N es el número de datos (adimensional) y $RMSE$ es el Raíz del Error Cuadrático Medio. Las unidades de y_j, $\hat{y}_j$ y RMSE están representadas según el parámetro que se va a analizar, para nuestro caso serías m^3/s, ya que analizaremos es Qp. Entre más cercano a 0 sea el valor obtenido por el RMSE, el valor estimado es más cercano al valor observado.

Otro de los parámetros estadísticos más utilizados en la hidrología es la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Ecuación 4), el cual nos proporciona la precisión de las estimaciones del modelo con respecto a valores observados, pues este criterio mide la cantidad de variabilidad de las observaciones que hay generadas por la simulación. (Cabrera, 2017)

$$NSE = 1 - \left(\frac{RMSE}{\sigma_{OBS}}\right)^2 \quad (4)$$

NSE representa la Eficiencia de Nash-Sutcliffe ó número de Nash (adimencional), RMSE= Raíz del Error Cuadrático Medio (según el parámetro a evaluar) y σ_{OBS} = Desviación estándar de los valores observados (según el parámetro a evaluar).

Resultados y discusión

En el presente trabajo se consideraron los siguientes supuestos:

- Se consideró únicamente la precipitación en forma líquida.
- Se asume que el escurrimiento superficial generado en el río Chapingo se concentra en la estación de aforo de Tlapeaxco.
- Se asume que la precipitación registrada por los pluviógrafos es uniforme dentro de su correspondiente área de influencia, delimitada mediante el método de los polígonos de Thiessen.
- Se asume que el escurrimiento superficial registrado fue provocado exclusivamente por la precipitación efectiva.
- Para el escenario que emplea únicamente los datos de la estación meteorológica de Chapingo, se asume que la precipitación registrada es uniforme en toda la extensión de la microcuenca del río Chapingo.

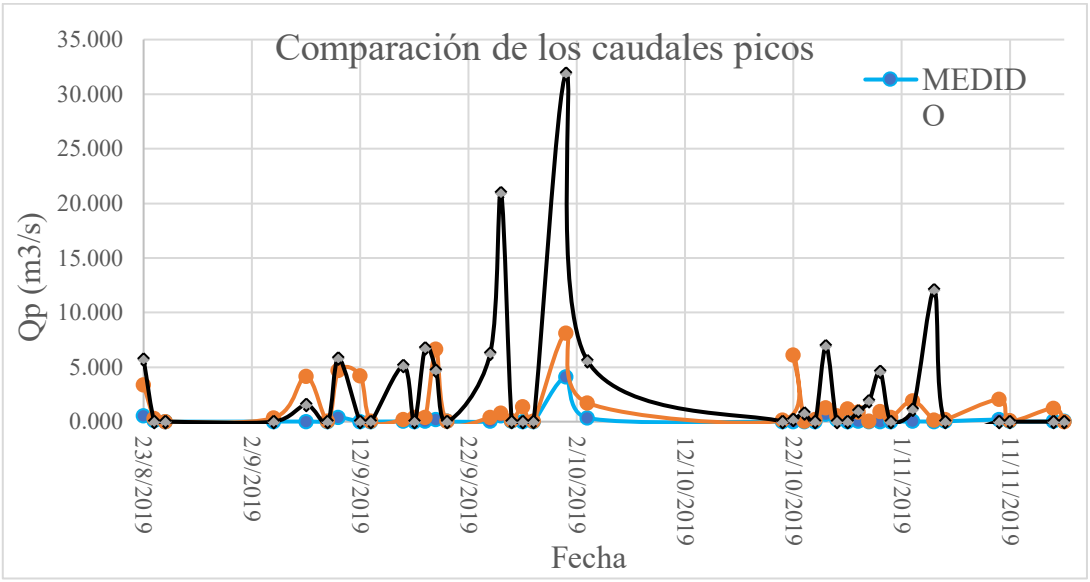


Figura 32. Comparación de los caudales picos. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3 se muestra la comparación obtenida de haber estimado los caudales picos, utilizando los datos recabados de todos los puntos de medición (Qp TE) y utilizando solo la información de la estación meteorológica de Chapingo (Qp EC), y el Qp medido directamente

en la salida de la cuenca (MEDIDO). Se puede observar que el Método Racional, bajo ambas estrategias de información pluviométrica, sobreestima el Qp respecto al medido directamente en la salida de la cuenca en la mayoría de los eventos analizados.

En el Cuadro 3 se observan los valores del RMSE para el Qp TE y para Qp EC, los cuales resultaron en 2.090 y 6.380 m^3/s, respectivamente. Por lo tanto, al aplicar el Método Racional para estimar el Qp, resulta indispensable utilizar un mayor número de puntos de registro pluviométrico, ya que esto genera una mejora significativa en los resultados.
De igual manera, se pueden apreciar los valores del coeficiente NSE para el Qp TE y Qp EC, los cuales resultaron en -9.422 y -96.160, respectivamente. De acuerdo con la clasificación de Ritter y Muñoz-Carpena (2013), ambos valores se ubican dentro de la categoría "no satisfactorio"; sin embargo, el valor de NSE para Qp TE se aproxima en mayor medida al rango aceptable. Esto indica que la discrepancia entre los caudales picos estimados y observados se reduce considerablemente cuando se utiliza la información de los dispositivos distribuidos espacialmente dentro de la cuenca.

Cuadro 3. Evaluación del desempeño de las estimaciones del Qp por el Método Racional

PARÁMETRO ESTADÍSTICO	Qp MEDIDO	Qp TE	Qp EC
Media	0.167	1.362	3.069
Desviación	0.65	2.03	6.27
RMSE		2.09	6.381
NSE		-9.422	-96.16

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan con lo señalado por Vázquez (2018) y Córdoba et al. (2006), quienes sostienen que la precisión en la estimación del Qp depende estrechamente de la cantidad y resolución de los datos disponibles. Asimismo, respaldan la postura de Rojas y González (2015) sobre las limitaciones que impone la escasez de información pluviométrica en México. Al respecto, esta investigación demuestra que al superar dicha limitante e integrar una mayor densidad de información espacial (TE), el Método Racional reduce considerablemente la incertidumbre en la estimación del Qp, alcanzando un valor de RMSE significativamente menor en comparación con el uso exclusivo de la estación Chapingo (EC), lo que se traduce en una mayor eficiencia y exactitud en el modelado.

Conclusiones

La estimación del Qp utilizando información de precipitación distribuida espacialmente en la cuenca incrementó sustancialmente la precisión con respecto al empleo de información de una sola estación puntual. Al utilizar los registros de todos los pluviógrafos, el valor del RMSE fue de 2.090 m^3/s, mientras que al usar únicamente la estación Chapingo el error ascendió a 6.380 m^3/s, evidenciando una notable mejoría en las estimaciones del Qp al disponer de una mayor densidad de puntos de medición pluviométrica.

A pesar del incremento en el número de estaciones analizadas y de la consecuente mejoría en la estimación del caudal Qp, se observa que el Método Racional continúa sobreestimando los valores reales. Dado que este enfoque es ampliamente utilizado en el diseño de obras hidroagrícolas, lograr una aproximación más precisa permitiría optimizar los factores de seguridad y optimar el uso de recursos hídricos, en consecuencia, reducir los costos de inversión y construcción de dicha infraestructura, así como un aprovechamiento más eficiente de este recurso.

Existe un incremento significativo en la precisión de la estimación del Qp mediante el Método Racional al aumentar el número de puntos de medición pluviométrica.

Al utilizar únicamente la información de EC, la estimación de Qp EC resulta considerablemente más elevada que Qp TE, lo cual evidencia una alta sensibilidad y variabilidad en la estimación del Qp al depender de un solo punto de registro.

Al integrar los datos pluviométricos de los instrumentos internos, capturo de forma más precisa la heterogeneidad espacial de la lluvia, reduciendo significativamente la incertidumbre en la estimación de Qp TE con respecto a los datos provenientes de Qp EC.

Literatura Citada

Documento técnico/académico

Cabrera, J. (2017). *Calibración de modelos hidrológicos*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Libros

Aparicio, M. F. (2018). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: LIMUSA.

Palacios Vélez, E., León Zamudio, S. A., Chávez Morales, J., Fernández Peláez, O., & Tijerina Chávez, L. (1977). Manual para proyectos de pequeñas obras hidráulicas para riego y abrevadero (2 vols.). Colegio de Postgraduados; Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Tesis

Piza-Núñez, E. (2017). *Evaluación del escurrimiento calculado con los métodos de Green-Ampt y Curva Numérica en la cuenca del Río Chapingo* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo].

Ríos, P. J. (2017). *Calibración y validación de un sensor ultrasónico para el aforo de cauces naturales* [Tesis de licenciatura no publicada, Universidad Autónoma Chapingo].

Revistas

Al-Amri, N. S., Ewea, H. A., & Elfeki, A. M. (2023). *Stochastic Rational Method for estimation of flood peak uncertainty in arid basins: Comparison between Monte Carlo and First Order Second Moment Methods with a case study in Southwest Saudi Arabia*. Sustainability, 15(6), Artículo 4719. https://doi.org/10.1007/s12517-021-09219-0

Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). *Root means square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature*. Geoscientific Model Development, 7(3), 1247–1250. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014

Córdoba, S. A., Zea, J., & Murillo, W. (2006). *Estimación de la precipitación media, evaluación de la red pluviométrica y cuantificación del balance hídrico en la cuenca del río Quito en el departamento del Chocó, Colombia*. Meteorología Colombiana, 10, 100–110.
Ferguson, R. I. (2021). *Roughness calibration to improve flow predictions in coarse-bed streams. Water Resources Research*, 57(6), e2021WR030114. https://doi.org/10.1029/2021WR030114

Grimaldi, S., & Petroselli, A. (2015). *Do we still need the rational formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins*. Hydrological Sciences Journal, 60(1), 67-77. https://doi.org/10.1080/02626667.2014.880546

Kencanawati, M., Anwar, N., & Maulana, M. (2021). *Modification of basic hydrology formulation based on an approach of the rational method at field measurement*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 930(1), 012051. https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012051

Kumar, A., Kanga, S., Taloor, A. K., Singh, S. K., & Durin, B. (2021). *Surface runoff estimation of Sind river basin using integrated SCS-CN and GIS techniques*. HydroResearch, 4, 61–74. https://doi.org/10.1016/j.hydres.2021.08.001

Paulíková, L., Kohnová, S., Onderka, M., & Danáčová, Z. (2024). *Peak runoff coefficient estimation in small catchments*. Acta Hydrologica Slovaca, 25(2), 233–240. https://doi.org/10.31577/ahs-2024-0025.02.0025

Ritter, A., & Muñoz-Carpena, R. (2013). *Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments*. Journal of Hydrology, 480, 33–45. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004

Rojas, D. S., & González, M. G. (2015). *Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México. Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 70–84. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000200006

Simpson, I., Winston, R. J., Tirpak, R. A., Dorsey, J. D., Stagge, J. H., & Hathaway, J. M. (2023). *Hydrologic responses of single land use urban and forested watersheds and their implications to improving urban drainage design. Journal of Hydrology*, 620, 129430. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129430

Vázquez-Rodríguez, A. L. (2018). *Aplicación internacional del método racional hidrológico: Estudio de las inundaciones en la Região do Norte de Portugal. En M. H. Fernandes, J. A. Rio, & F. C. Marques (Eds.)*, The Overarching Issues of the European Space: Spatial Planning and European Union Policies (pp. 441–450). Faculdade de Letras da Universidade do Porto. https://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/16777.pdf

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Evaluación microclimática multivariante en un invernadero tipo túnel para el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) mediante arquitectura IoT

Carlos Ernesto Luquez Gaitan[1], Natividad Hernández Mendoza[2], Raudel Flores Moreno[3], Samuel Rivera López[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La agricultura de precisión en invernaderos enfrenta el reto de modelar sistemas no lineales y acoplados. Este estudio evaluó el microclima de un invernadero tipo túnel (Texcoco, México) con cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.), utilizando una arquitectura IoT basada en microcontroladores ESP32, módulos de comunicación LoRa SX1278 y sensores DHT22, FC-28 y un registrador de CO_2 (Extech SD800), que recolectó 4,320 registros cada 5 minutos durante 15 días. Mediante análisis descriptivo, Análisis de Componentes Principales (PCA), Análisis Factorial y Correlación Canónica (CCA) diferenciados para los periodos diurno y nocturno, se caracterizaron las variables de temperatura, humedad relativa, concentración de CO_2 y humedad del suelo. Los resultados revelaron una fuerte correlación inversa entre temperatura y humedad relativa, con un coeficiente de correlación de Pearson de -0.989 y un coeficiente de determinación R^2 de 0.977, así como una modulación biológica del CO_2 por fotosíntesis durante el día (403.77 ppm) y respiración nocturna (435.37 ppm). La humedad del suelo se mantuvo altamente estable (media de 39.0 % con desviación de 1.87 %), evidenciando el efectivo desacoplamiento del sistema de riego por goteo respecto a las oscilaciones atmosféricas. Estos hallazgos proporcionan la base empírica necesaria para implementar futuros algoritmos de predicción temporal con redes LSTM, estableciendo los límites de control estadístico y las relaciones funcionales que gobiernan el microclima en esta estructura de producción local.

Palabras clave: Agricultura de precisión; correlación; redes LSTM.

Abstract

Precision agriculture in greenhouses faces the challenge of modeling nonlinear and coupled systems. This study evaluated the microclimate of a tunnel-type greenhouse (Texcoco, Mexico) with lettuce cultivation (*Lactuca sativa* L.), using an IoT architecture based on ESP32 microcontrollers, LoRa SX1278 communication modules, and DHT22, FC-28 sensors, and a CO_2 datalogger (Extech SD800), which collected 4,320 records every 5 minutes over 15 days. Through descriptive analysis, Principal Component Analysis (PCA), Factor Analysis, and Canonical Correlation Analysis (CCA) differentiated for daytime and nighttime periods, the variables of temperature, relative humidity, CO_2 concentration, and soil moisture were characterized. The results revealed a strong inverse correlation between temperature and relative humidity, with a Pearson correlation coefficient of -0.989 and a determination coefficient R^2 of 0.977, as well as a biological modulation of CO_2 by photosynthesis during the day (403.77 ppm) and nighttime respiration (435.37 ppm).

[1]Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Texcoco, Edo. México, México. C.P. 56230. carlosluquezgaitan@gmail.com, Sriveral@chapingo.mx, raudel.flores@uptex.edu.mx (autor de correspondencia), natividad.hernandez@uptex.edu.mx
[2]Universidad Politécnica de Texcoco, San Miguel Cuatlinchan, Texcoco, Edo. México, México. C.P. 56250.

Soil moisture remained highly stable (mean of 39.0 % with a standard deviation of 1.87 %), evidencing the effective decoupling of the drip irrigation system from atmospheric oscillations. These findings provide the empirical basis necessary to implement future temporal prediction algorithms with LSTM networks, establishing the statistical control limits and functional relationships that govern the microclimate in this local production structure.

Keywords: Precision agriculture; correlation; LSTM networks.

Introducción

En la actualidad, la agricultura mundial se enfrenta al desafío crítico de satisfacer la creciente demanda de alimentos sin comprometer la sostenibilidad medioambiental ni la disponibilidad de recursos naturales finitos como el agua y la tierra (Yu et al., 2021). Las necesidades de espacio, tierra y recursos para la producción de alimentos han tomado en los últimos años un enfoque de sostenibilidad por el aumento constante de la demanda social, siendo motivo de preocupación (Yu et al., 2021). Frente a la creciente variabilidad climática y la degradación ecológica, la agricultura de precisión en entornos controlados (CEA) y en particular la producción bajo invernadero se ha consolidado como un enfoque tecnológico clave para garantizar la resiliencia productiva, prolongar los periodos de cultivo y maximizar la eficiencia en el uso de insumos (Ragaveena et al., 2021; Wang et al., 2026). No obstante, la dinámica interna de un invernadero constituye un sistema no lineal, dinámico y fuertemente acoplado, donde variables térmicas, hídricas y atmosféricas interactúan en función de las condiciones meteorológicas exteriores, la física de la estructura y la propia actividad ecofisiológica del cultivo (Xiong & Su, 2025; Ma et al., 2019).

Entre los factores microclimáticos decisivos para el desarrollo vegetal, la temperatura del aire, la humedad relativa, la concentración de dióxido de carbono (CO_2) y el estado hídrico del sustrato ejercen un control directo sobre la fotosíntesis, la transpiración y el estado fitosanitario de las plantas (Jung et al., 2022; Rabbi et al., 2019). Fluctuaciones extremas en el déficit de presión de vapor (DPV) inducidas por temperaturas elevadas y bajas humedades relativas obligan al cierre estomático, desacelerando el crecimiento; por otra parte, niveles excesivos de humedad nocturna cercanos al punto de rocío favorecen la condensación foliar, detonando patógenos fúngicos severos (Rabbi et al., 2019). En consecuencia, el monitoreo, caracterización y modelado oportuno de estas interacciones es indispensable para evitar condiciones subóptimas y fundamentar estrategias de control automatizado (Jeon et al., 2025; Arnaud et al., 2026).

Con el advenimiento de la era del *Big Data*, las tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial (IA) han revolucionado la supervisión agrícola moderna (Hosny et al., 2025; Rudrakar & Rughani, 2024). La integración de microcontroladores de bajo costo y redes de sensores inalámbricos (como la arquitectura LoRaWAN) permite capturar series temporales multivariantes de alta resolución temporal que registran minuciosamente el microclima interno en invernaderos (Flores-Moreno et al., 2026). Para interpretar esta abundante información, métodos analíticos avanzados, que abarcan desde el Análisis de Componentes Principales (PCA), Análisis Factorial y Correlación Canónica (CCA) hasta arquitecturas de aprendizaje profundo como las Redes de Memoria a Largo y Corto Plazo (LSTM) y enfoques híbridos o de conjunto, han demostrado una capacidad excepcional para extraer patrones ocultos, aislar relaciones causales, predecir variaciones ambientales y respaldar sistemas de alerta temprana o control predictivo en invernaderos inteligentes (Guo et al., 2026; Kar et al., 2024; Soori et al., 2023; Xie & Xu, 2026; Xiong & Su, 2025).

En este contexto, investigaciones recientes han explorado diversas aproximaciones para el modelado y predicción del microclima en invernaderos. Guo et al. (2026) desarrollaron un marco de pronóstico y alerta temprana con modelos de conjunto basados en LSTM para la predicción de emisiones de N_2O, demostrando que el modelo AdaBoost-LSTM alcanzó valores de R^2 superiores y mayor robustez frente a datos faltantes. Por su parte, Kar et al. (2024) emplearon un enfoque basado en aprendizaje profundo con redes LSTM apiladas para la predicción de la altura del oleaje, logrando errores de predicción del 3% mediante el uso de atributos temporales con codificación posicional. Soori et al. (2023) ofrecen una visión general de los avances en IA, aprendizaje automático y aprendizaje profundo aplicados a sistemas robóticos avanzados, destacando su potencial para transformar la navegación autónoma y la gestión de sistemas complejos.

En el ámbito específico de la agricultura en invernadero, Xie y Xu (2026) propusieron un modelo híbrido basado en una estructura mecanicista que combina Redes Neuronales Convolucionales (CNN) y LSTM para la predicción del rendimiento de tomate, logrando valores de R^2 de 0.96 y RMSE de 0.21 en sus conjuntos de datos de validación. Xiong y Su (2025) exploraron métodos de modelado híbrido que combinan modelos mecanísticos con redes LSTM para la predicción del clima en invernaderos, demostrando que el modelo de corrección residual basado en LSTM ofrece una mayor precisión y capacidad predictiva. Abdal et al. (2026) implementaron un sistema híbrido de IoT y aprendizaje automático para un invernadero hidropónico autónomo, utilizando una arquitectura LSTM optimizada que alcanzó un R^2 de 0.989 y un RMSE de 0.451 °C en la predicción de temperatura. Yan et al. (2025) emplearon redes de perceptrón multicapa (MLP) y de función de base radial (RBF) para la predicción a corto plazo de la temperatura y la humedad relativa en invernaderos, obteniendo un RMSE de 0.439 °C y un R^2 de 0.997 para la temperatura con el modelo MLP optimizado.

Asimismo, Jeon et al. (2025) implementaron un modelo Attention-LSTM en un invernadero real para emular la toma de decisiones experta en control ambiental, reduciendo las operaciones innecesarias de los actuadores y estabilizando el microclima interno. Onu et al. (2026) propusieron un modelo predictivo basado en LSTM con mecanismo de atención (LSTM-AT) para la temperatura del aire en invernaderos, alcanzando un R^2 mínimo de 0.95 y un RMSE máximo de 1.35 °C. Wang et al. (2026) presentaron un marco para la predicción del microclima en invernaderos utilizando redes LSTM con arquitectura codificador-decodificador multivariante (MED-LSTM), logrando valores de MAE de 0.89 para la temperatura y 8.31 para la humedad. Arnaud et al. (2026) desarrollaron un marco de control predictivo basado en datos que utiliza redes LSTM y GRU dentro de una arquitectura de Control Predictivo Basado en Modelos (MPC), demostrando que los controladores basados en GRU y LSTM superaron significativamente a un controlador MPC convencional, reduciendo los incumplimientos de los límites de humedad del 54.77% al 15.45%. Finalmente, Yang et al. (2023) desarrollaron un modelo FAM-LSTM para la predicción a múltiples pasos de la temperatura y la humedad en un invernadero solar, logrando errores de predicción de temperatura en rangos de [-0.5; 0.9] °C para horizontes de 12 horas.

A pesar de los importantes avances en el modelado climático y de rendimiento en invernaderos, persiste la necesidad de evaluar el acoplamiento multifactorial en estructuras de escala real utilizadas ampliamente en regiones en desarrollo. En el contexto mexicano, las estructuras de tipo túnel de 60 m² (12 m de largo × 5 m de ancho × 2.70 m de altura) representan una de las configuraciones más extendidas y eficientes para la pequeña y mediana producción agrícola. Sin embargo, la caracterización cuantitativa de sus patrones nictemerales (día/noche) y la separación de la dinámica atmosférica respecto a la edáfica bajo este tipo de instalaciones aún requieren una mayor profundización empírica y analítica.

En este trabajo se presenta la evaluación y caracterización microclimática multivariante de un cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un invernadero tipo túnel ubicado en Texcoco, Estado de México. Utilizando una arquitectura IoT basada en nodos transmisores ESP32/LoRa SX1278 y sensores ambientales (DHT22, FC28 y controlador de CO_2), se recolectó una serie temporal multivariante continua durante 15 días (4,320 registros a intervalos de 5 minutos) de temperatura del aire, humedad relativa, humedad del suelo y niveles de CO_2. El objetivo principal de este artículo es aplicar un análisis estadístico avanzado multivariado (descriptivo, PCA, Análisis Factorial y Análisis de Correlación Canónica diurno/nocturno) para: 1) desentrañar la estructura bimodal y la fuerte interdependencia termodinámica y ecofisiológica entre el microclima aéreo (temperatura, humedad y CO_2) y la respuesta biológica del cultivo; 2) demostrar el nivel de desacoplamiento o independencia operativa entre las condiciones atmosféricas interiores y el manejo hídrico del suelo mediante riego por goteo; y 3) proporcionar la base empírica y los límites de control estadístico necesarios para el futuro despliegue de algoritmos de predicción temporal (como redes LSTM) y sistemas de control automatizado optimizado en invernaderos agrícolas de escala local.

Materiales y Métodos

Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en un invernadero tipo túnel ubicado en Texcoco, Estado de México, México (coordenadas: 19°29'35.3"N 98°46'36.8"W). La estructura del invernadero mide 12 m de largo, 5 m de ancho y 2.70 m de altura en la cumbrera, cubriendo una superficie total de cultivo de 60 m². Esta configuración representa uno de los diseños más eficientes y populares para la producción agrícola a pequeña y mediana escala en México; su estructura es de acero galvanizado recubierta con plástico polietileno de grado agrícola (espesor de 200 micras, con estabilización UV).

Se estableció un cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo un esquema de alta densidad (25 plantas/m²), para un total de 1500 plantas en el área disponible. Se coloco un sistema de riego por goteo, con emisores de 2 L/h¹ separados cada 0.3 m, garantizó un aporte hídrico constante y controlado a la zona radicular, hecho que permite una baja variabilidad de la humedad del suelo. El periodo de crecimiento de 45 días desde el trasplante hasta la cosecha, dentro del cual se realizó el monitoreo continuo de 15 días, abarcó la fase de desarrollo vegetativo más sensible a la temperatura y al déficit de presión de vapor (DPV).

El diseño experimental consistió en un monitoreo ambiental continuo durante 15 días, del 1 al 15 de abril de 2025. Las mediciones se registraron a intervalos de 5 minutos, generando un total de 4,320 puntos de datos por cada variable de sensor. El sistema de monitoreo se desplegó en una configuración de tres nodos, con sensores ubicados estratégicamente dentro del invernadero para capturar la variabilidad espacial de las condiciones ambientales.

A continuación, se describe la arquitectura del sistema IoT y configuración del hardware. El sistema de monitoreo comprendió tres nodos transmisores y un receptor central, siguiendo una topología de red IoT jerárquica. Cada nodo transmisor (nodo sensor) integró un grupo de componentes como el Microcontrolador: ESP32 (Espressif Systems): Procesador Xtensa LX6 de doble núcleo; 520 KB SRAM, 4 MB Flash; Voltaje de operación de 3.3 V; Wi-Fi y Bluetooth integrados (deshabilitados para ahorro de energía). Un módulo de comunicación LoRa SX1278 (Ai-Thinker RA-02) con Frecuencia de 433 MHz (banda ISM); Potencia de transmisión de 18 dBm; Sensibilidad del receptor de −141 dBm; alcance de comunicación de hasta 5 km (línea de visión); Modulación LoRa™ (espectro ensanchado por barrido de frecuencia).

Los sensores usados se describen a detalle comenzando con el DHT22 (AOSONG) para medición de Temperatura y Humedad Relativa con rango de temperaturas entre −40 a 80 °C (exactitud ±0.5 °C); rango de humedad de 0-100 % (exactitud ±2 %); frecuencia de muestreo

de 0.5 Hz y voltaje de alimentación de 3.3-5.5 V. Sensor de Humedad del Suelo FC-28 (módulo comparador HW-103) con una corriente de operación de 35 mA; salida analógica de 0-5 V (conversión ADC de 10 bits); rango de humedad de 0-100 % (relativo) y material del electrodo con lámina de estaño. Registrador de datos (*datalogger*) y monitor de calidad del aire para la detección de Dióxido de carbono (CO_2) Extech Datalogger SD800 (Figura 1). Este dispositivo está diseñado para medir simultáneamente dióxido de carbono (CO_2), temperatura y humedad relativa, aunque en este estudio solo se empleó para CO_2 es capaz de almacena la información directamente en una tarjeta de memoria SD en formato Microsoft Excel para facilitar su transferencia y análisis.



Figura 1. Monitor de calidad del aire: Extech Datalogger SD800. Tomada por el autor y ajustada. Fuente. Elaboración propia.

El Extech Datalogger SD800 emplea un sensor NDIR infrarrojo no dispersivo de doble longitud de onda, guarda los registros con marca de tiempo directamente en una tarjeta SD, permitiendo abrirlos en una PC sin software adicional. Opción de muestreo ajustable con frecuencia de registro variable en 5, 10, 30, 60, 120, 300, 600 segundos o en modo automático. Rango de medición 0 a 4,000 ppm, y fuente de alimentación mediante 6 baterías AAA de 1.5 V o adaptador de CA universal.

El receptor central (nodo puerta de enlace) este compuesto por un microcontrolador ESP32 (mismas especificaciones); módulo LoRa SX1278 (receptor); pantalla TFT LCD de 2.8″ (320×240 píxeles); módulo de tarjeta SD para registro de datos y alimentación de 5 V a través de USB-C. La topología de red LoRaWAN implementada posee 3 unidades de nodos finales los cuales actúan como nodos sensores que recolectan datos ambientales y los transmiten mediante el protocolo LoRaWAN. La Puerta de enlace (1 unidad) actúan como receptor central y se encargan de agregar los datos de todos los nodos. Esta el servidor de red embebido en la propia puerta de enlace (reduce costos sin sacrificar funcionalidad). Tenemos el servidor de aplicación encargado del procesamiento y visualización local de los datos.

Los parámetros de comunicación empleados poseen factor de dispersión (*Spreading Factor*, SF) 7 con equilibrio entre alcance y tasa de datos, el ancho de banda (*Bandwidth*, BW) es de 125 kHz, la tasa de codificación (*Coding Rate*, CR) 4/5, el intervalo de transmisión de 5 minutos y tamaño de la carga útil de 12 bytes por transmisión.

El sensor DHT22 se calibró de fábrica y se validó utilizando un psicrómetro de referencia (tipo Assmann). Para cada punto de validación los sensores se colocaron en una cámara ambiental controlada con puntos de ajuste de temperatura fueron 5, 15, 25, 35, 45 °C y un tiempo de estabilización de 30 min y para el ajuste de humedad se usaron los puntos 20, 40, 60, 80, 95 % HR. Finalmente se registraron mediciones durante 5 minutos en cada punto.

Calibración del sensor de humedad del suelo FC-28

El sensor de Humedad del Suelo se calibró mediante el método gravimétrico; se tomaron muestras del sustrato se secaron en estufa a 105 °C aproximadamente durante 24 horas el suelo seco se colocó en recipientes y se saturó con agua destilada. Posteriormente se estableció una curva de calibración de dos puntos. El primer punto condición seca para la muestra de suelo secado al aire durante 72 h (0 % de humedad). Y el segundo punto condición saturada donde el suelo se encontraba a capacidad de campo con 100 % de humedad. Los niveles intermedios de humedad se midieron gravimétricamente con n = 5 réplicas.

En el procedimiento experimental se realizó un despliegue con tres nodos sensores en posiciones específicas dentro del invernadero para cada tipo. El Nodo 1 (Zona norte) a 1.5 m de la pared norte, centrado a una altura de 0.5 m sobre el sustrato. El Nodo 2 (Zona central) a 6.0 m de la pared norte, centrado a una altura de 0.5 m sobre el sustrato. El Nodo 3 (Zona sur) a 1.5 m de la pared sur, centrado a una altura de 0.5 m sobre el sustrato. De forma general se siguieron los criterios de posicionamiento para los nodos con una distancia mínima de 0.5 m respecto a las paredes del invernadero y a una altura de 0.5 m sobre el sustrato, los sensores de Humedad del Suelo se insertaron a 10 cm de profundidad en el sustrato.

El protocolo experimental para la recolección de datos siguió una estructura por fases:

Fase 1: Puesta en marcha del sistema (31 de marzo de 2025). Instalación e inicialización de los sensores; mediciones de referencia durante 6 horas; y validación del sistema (pruebas de comunicación).

Fase 2: Monitoreo continuo (1 al 15 de abril de 2025). Adquisición de datos cada 5 minutos (288 lecturas/día/sensor), con variables registradas de Temperatura (T) en °C; Humedad Relativa (HR) en %; Humedad del Suelo (HS) en %; concentración de Dióxido de carbono (CO_2) en ppm. La marca de tiempo fue UTC-6 (horario del centro de México) y la transmisión de datos en tiempo real hacia la puerta de enlace.

Para garantizar la integridad del análisis, se realizó una detección de valores atípicos: ±3 desviaciones estándar respecto a la media; imputación de datos faltantes con interpolación lineal (máximo 3 puntos consecutivos) y alineación temporal para todos los datos sincronizados a UTC-6. Se verificó la consistencia temporal de las series y se aplicó un control de calidad mediante la detección de valores atípicos. Se empleó el método del rango intercuartílico (IQR), definiendo como valores atípicos aquellos que se encuentren fuera del intervalo $[Q_1, -1.5 \times IQR\ Q_3 + 1.5 \times IQR]$, complementado con el criterio de ±3 desviaciones estándar respecto a la media.

Con el fin de caracterizar la dinámica del invernadero, se clasificaron los registros en dos periodos claramente diferenciados. El periodo diurno se definió desde las 6:00 hasta las 18:00 horas, coincidiendo con las horas de luz solar y la máxima actividad fotosintética del cultivo de lechuga. El periodo nocturno se estableció para el resto del día (18:00 a 6:00 horas), caracterizado por la ausencia de radiación y la respiración vegetal predominante.

Se realizó un análisis exhaustivo de tendencia central y dispersión para cada una de las cuatro variables ambientales. Los estadísticos calculados incluyeron la media aritmética ($\bar{x}$), la mediana, la desviación estándar (s), los valores mínimos y máximos, y los cuartiles (Q_1, Q_2, Q_3). Estas métricas se calcularon tanto para el conjunto total de datos como de manera segregada para los periodos diurno y nocturno, permitiendo cuantificar las diferencias absolutas entre ambos regímenes.

Para explorar las interacciones entre las variables atmosféricas y edáficas, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Este coeficiente mide la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables, calculado mediante la siguiente fórmula:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (1)$$

Particularmente, se profundizó en la relación inversa entre la temperatura y la humedad relativa, ajustando un modelo de regresión lineal simple y calculando el coeficiente de determinación (R^2) para estimar el porcentaje de variabilidad explicado por el modelo.
Para comprender la forma de la distribución de los datos y evidenciar el comportamiento bimodal inducido por el ciclo día-noche, se utilizó la estimación de densidad por núcleo (*Kernel Density Estimation*, KDE). La función estimadora se define como:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n} K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (2)$$

donde:
K- función núcleo (kernel);
h - parámetro de suavizado o ancho de banda.

Resultados y discusión

El Cuadro 1 resume las estadísticas descriptivas generales de las 4,320 mediciones realizadas durante los 15 días de monitoreo continuo. En primer lugar, la temperatura del aire presenta una media de 18.6 °C, pero con una elevada desviación estándar (7.5 °C) y un rango extremadamente amplio (desde 6.8 °C hasta 32.0 °C). De manera inversa, la humedad relativa registra una media de 55.7 % con una desviación similarmente alta (20.8 %) y un rango que va desde el 22.3 % hasta el 89.3 %, corroborando la estrecha relación termodinámica inversa con la temperatura. La concentración de CO_2 presenta una media de 419.6 ppm y una desviación de 21.3 ppm, con un rango intercuartílico de 400 a 439 ppm que evidencia la modulación biológica por la fotosíntesis diurna y la respiración nocturna. En marcado contraste, la humedad del suelo se mantiene notablemente estable, con una media de 39.0 % y una desviación estándar mínima de apenas 1.87 %, oscilando entre el 33.0 % y el 45.2 %, lo que confirma la efectividad del riego por goteo para mantener la zona radicular independiente de las drásticas fluctuaciones atmosféricas.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas generales. Procesado en un entorno Spyder de Python

Estadístico	Temperatura (T), °C	Humedad Relativa (HR), %	Humedad de Suelo (HS), %	Dióxido de carbono (CO_2), ppm
Conteo	4320			
Media	18.627	55.747	38.999	419.568
DE	7.476	20.790	1.869	21.261
Mínimo	6.800	22.300	33.000	380.000
25%	11.200	35.200	37.700	400.000
50%	18.600	55.950	38.900	419.500
75%	25.700	76.400	40.300	439.300
Máximo	32.000	89.300	45.200	466.500

Fuente: Elaboración propia.

Con base en el Cuadro 2, durante el día, la temperatura promedio es de 25.29 °C, con una humedad relativa de 37.14 % y niveles de CO_2 de 403.77 ppm. En contraste, durante la noche,

la temperatura desciende a 11.96 °C, la humedad relativa se incrementa hasta 74.35 % y el CO_2 aumenta a 435.37 ppm. Por su parte, la humedad del suelo se mantiene prácticamente constante entre ambos periodos (39.47 % día vs. 38.52 % noche). Estas diferencias estadísticas, con desviaciones estándar reducidas, evidencian un ambiente altamente diferenciado entre día y noche.

Cuadro 2. Estadísticas por periodo (día vs noche). Procesado en un entorno Spyder de Python

Variable	Temperatura (T), °C		Humedad Relativa (HR), %		Humedad de Suelo (HS), %		Dióxido de carbono (CO_2), ppm	
Estadístico	**Media**	**DE**	**Media**	**DE**	**Media**	**DE**	**Media**	**DE**
Día	25.29	3.49	37.14	9.29	39.47	1.82	403.77	14.17
Noche	11.96	3.28	74.35	9.26	38.52	1.80	435.37	14.29

Fuente: Elaboración propia.

Los datos recolectados durante 15 días (intervalo de 5 minutos) en un cultivo de lechuga bajo invernadero constituyen una serie temporal multivariante con alta resolución temporal. El análisis de la serie temporal multivariante registrada expone la dinámica microclimática y la interacción ecofisiológica dentro del invernadero.

La Figura 2 muestra la serie temporal del primer día de medición con un marcado ciclo diario en el ambiente del cultivo de lechuga. La temperatura sigue un patrón sinoidal, alcanzando 30 °C al día (máxima radiación) y bajando a 8-9 °C por la noche. La humedad relativa actúa en sentido inverso, con picos nocturnos del 85% y mínimos vespertinos del 25%. El CO_2 presenta una modulación biológica: disminuye a 385 ppm durante el día por la fotosíntesis y supera los 450 ppm por la noche debido a la respiración y la menor ventilación. Finalmente, la humedad del suelo se mantiene estable entre el 38% y 43%, lo que confirma un aporte hídrico equilibrado mediante el riego por goteo.

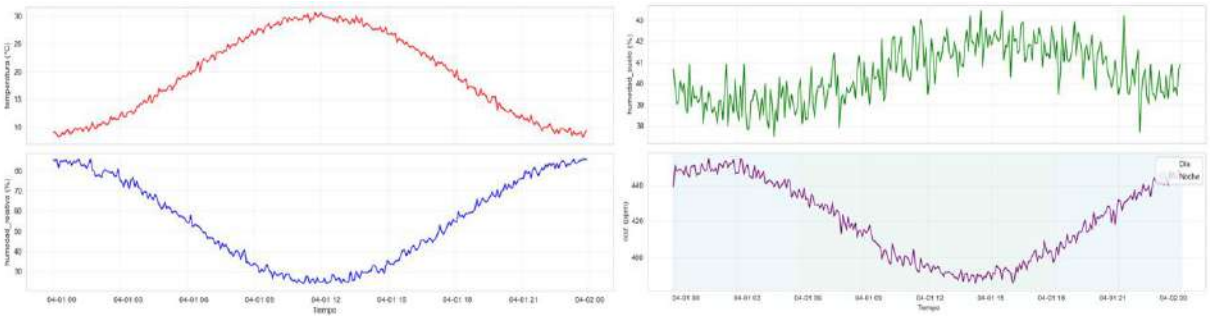


Figura 2. Serie temporal del primer día. Obtenido de un script en el entorno Spyder de Python. Fuente. Elaboración propia

Los diagramas de la Figura 3 muestra el monitoreo de los 15 días y revelan una alta estabilidad en las medianas diarias del microclima del invernadero tipo túnel: la temperatura se mantuvo entre 17.0 °C y 19.7 °C, y la humedad relativa, actuando de forma inversa y simétrica, entre 53.4% y 58.8%. No obstante, la dispersión intradiaria es muy amplia: la temperatura oscila entre mínimos nocturnos de 6.8 °C y máximos diurnos de 32.0 °C por radiación solar, mientras que la humedad fluctúa desde mínimos del 22.3% en las tardes de mayor insolación hasta picos nocturnos del 89.3%. Esta escasa variabilidad entre promedios diarios demuestra que el clima interno está gobernado por el ciclo nictemeral y el balance solar radiativo, y no por alteraciones meteorológicas externas de escala multidía.

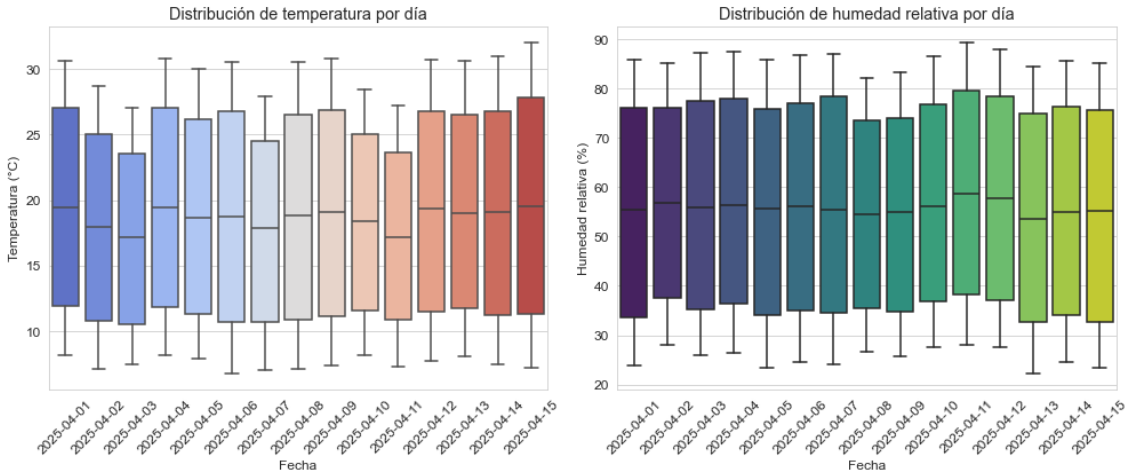


Figura 3. Distribución de temperatura y humedad en los 15 días de medición. Obtenido de un script en el entorno Spyder de Python. Fuente. Elaboración propia

El análisis de distribución de frecuencias para las variables ambientales monitoreadas en el invernadero revela un marcado comportamiento bimodal en los factores atmosféricos, determinado por la estricta transición entre los regímenes diurno y nocturno. En particular, los histogramas con estimación de densidad de kernel (KDE) para la temperatura (°C), la humedad relativa (%) y la concentración de CO_2 (ppm) exhiben dos picos de densidad bien definidos, uno asociado al régimen nocturno caracterizado por temperaturas medias de 12.0 °C, humedades relativas del 74.4% y acumulación de CO_2 de 435.4 ppm) y otro correspondiente al periodo diurno con promedios de 25.3 °C, humedades del 37.1% y niveles de CO_2 atenuados hasta 403.8 ppm debido al consumo fotosintético del cultivo (Figura 4). En contraste, la humedad del suelo (HS) presenta una distribución unimodal simétrica de tipo gaussiano centrada en una media de 39.0% con una desviación estándar de apenas 1.87%, lo que ratifica la efectividad del sistema de riego por goteo para mantener la zona radicular estable e independiente de las severas oscilaciones microclimáticas de la atmósfera del invernadero.

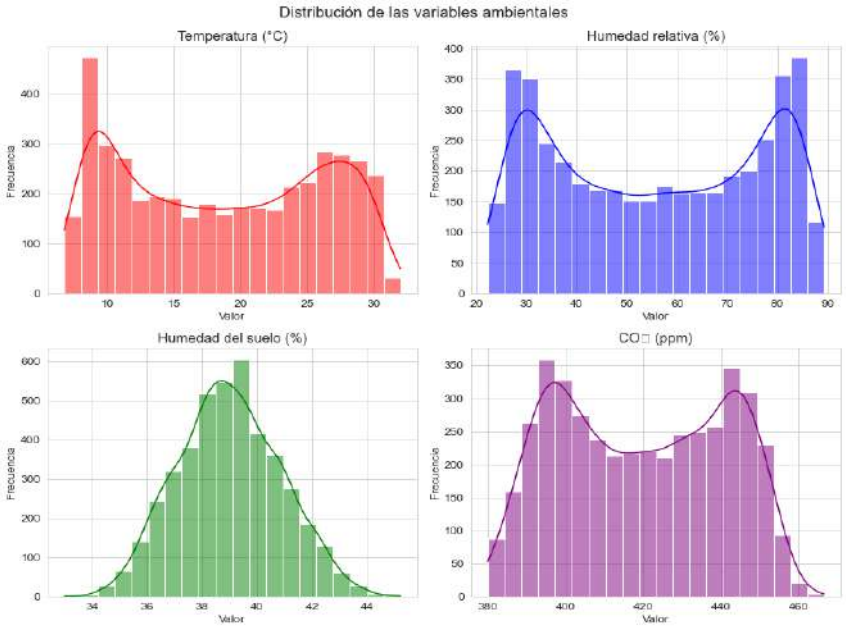


Figura 4. Histogramas de estimación de densidad de kernel (KDE). Obtenido de un script en el entorno Spyder de Python. Fuente. Elaboración propia

El análisis con diagramas de caja confirma diferencias entre día y noche con la temperatura que sube de una media nocturna de 11.96 °C (mediana 11.2) a 25.29 °C (mediana 25.7) en el día, con un incremento de +13.33 °C y variabilidades similares (DE entre 3.28 y 3.49). La humedad relativa desciende drásticamente de 74.35% (mediana 76.4) a 37.14% (mediana 35.2), con un diferencial de -37.21% y un RIQ de ~15.7% en ambos periodos. El CO_2 disminuye -31.59 ppm durante el día (403.77 vs. 435.37 ppm), presentando valores atípicos. En contraste, la humedad del suelo se mantiene muy estable, con una diferencia marginal de solo +0.95% (39.47% día vs. 38.52% noche) y RIQ reducidos (~2.5%), con solo algunos valores atípicos puntuales asociados a pulsos de riego.

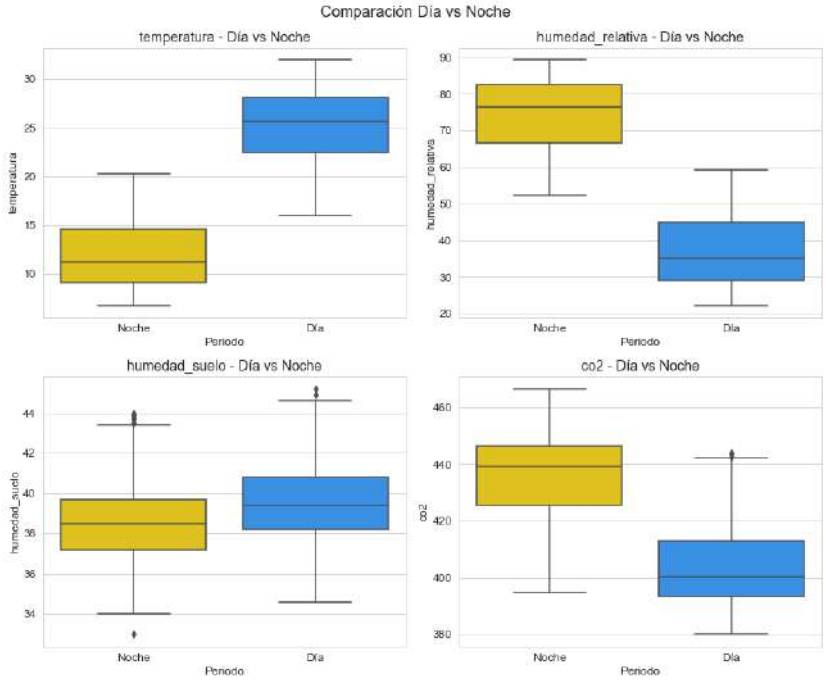


Figura 5. Diagramas de caja comparación entre día y noche. Obtenido de un script en el entorno Spyder de Python. Fuente. Elaboración propia

El gráfico de dispersión de la Figura 6 ilustra un Biclusterización Térmico-Temporal en el período nocturno (Puntos Azules) que se concentran en el cuadrante superior izquierdo, abarcando temperaturas de 6.8 °C a 20.3 °C y humedades relativas de 52.3% a 89.3%, mostrando una correlación interna de $r = -0.959$. Para el período diurno (Puntos Naranja) que se agrupan en la franja inferior derecha, comprende temperaturas de 16.0 °C a 32.0 °C y humedades de 22.3% a 59.1%, con un coeficiente interno de $r = -0.930$. Existe una pequeña zona de traslape interseccional entre los 17 °C y 20 °C, la cual corresponde a las fases de transición de amanecer y atardecer.

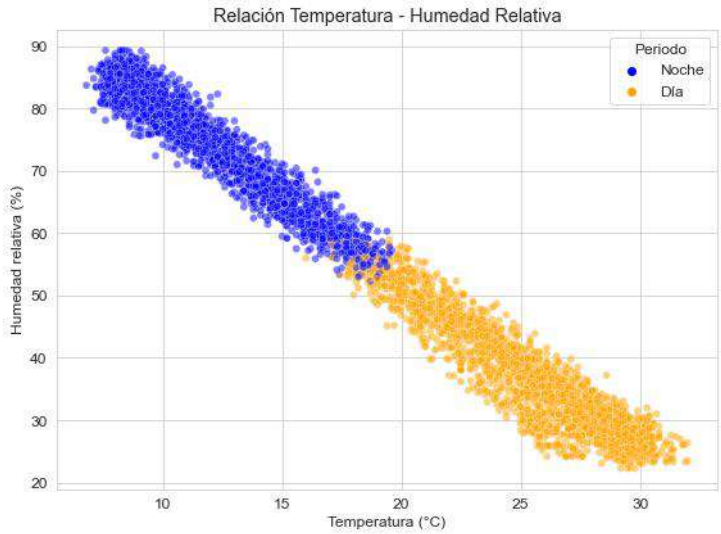


Figura 6. Relación Temperatura-Humedad Relativa. Obtenido de un script en el entorno Spyder de Python. Fuente. Elaboración propia.

La interacción entre la temperatura (°C) y la humedad relativa (%) registrada durante los 15 días de monitoreo en el invernadero. Existe una correlación lineal inversa severa extremadamente fuerte entre ambas variables. El coeficiente de correlación de Pearson global (r) es de -0.989 ($p < 0.001$), lo que confirma un comportamiento inversamente proporcional perfecto entre el calentamiento del aire y la disminución de la humedad relativa. El coeficiente de determinación (R^2) es de 0.977. Esto indica que el 97.7 % de la variabilidad observada en la humedad relativa está explicada directamente por las variaciones de la temperatura dentro del recinto. El modelo lineal global ajustado responde a la relación:

$$\mathrm{HR}(\%) = -2.75 \times \mathrm{Temp}(°\mathrm{C}) + 106.95 \quad (3)$$

Estadísticamente, por cada incremento de 1 °C en la temperatura ambiente, la humedad relativa decrece a una tasa promedio de 2.75 puntos porcentuales. Analizando los resultados en base a la termodinámica de la atmósfera del invernadero la drástica pendiente negativa obedece a la física del aire húmedo, al aumentar la temperatura interior por la radiación solar diurna, la capacidad de retención de vapor del aire (presión de vapor de saturación) se eleva, provocando que la humedad relativa caiga bruscamente aun cuando el contenido absoluto de agua en el aire no cambie sustancialmente.

Los impactos en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) son en primera instancia el riesgo por estrés hídrico diurno durante las horas de máxima insolación (> 25 °C y HR $< 35\%$), el alto Déficit de Presión de Vapor (DPV) fuerza a las plantas de lechuga a cerrar sus estomas para evitar la deshidratación, disminuyendo la fijación de CO_2 y desacelerando el crecimiento vegetal. Otro de los impactos asociados es el riesgo fitosanitario nocturno durante la noche, ya que valores de HR $> 80\%$ cercanos al punto de rocío favorecen la condensación de agua sobre el área foliar. Este microambiente húmedo prolongado es el principal detonante para la germinación de esporas de hongos patógenos.

Se observa un marcado patrón nictemeral en las variables microclimáticas. La temperatura del aire presentó un incremento promedio de +13.33 °C durante el período diurno (25.29 °C) en comparación con el nocturno (11.96 °C), mientras que la humedad relativa mostró un comportamiento inverso, descendiendo en promedio -37.21 puntos porcentuales al pasar de la noche (74.35%) al día (37.14%). Esta relación inversa extrema (r = -0.989, R^2 = 0.977) refleja

la fuerte influencia de la radiación solar sobre la capacidad de retención de vapor del aire y confirma la dinámica termodinámica característica de los invernaderos bajo condiciones de alta insolación. Por su parte, la humedad del suelo se mantuvo altamente estable, con una diferencia media de apenas +0.95% entre el día (39.47%) y la noche (38.52%), lo cual demuestra el efectivo desacoplamiento del sistema de riego por goteo respecto a las oscilaciones atmosféricas. Finalmente, la concentración de CO_2 mostró un descenso de -31.59 ppm durante el día (403.77 ppm) frente a la noche (435.37 ppm), atribuible al consumo fotosintético del cultivo durante las horas de luz.

Zhang et al., 2026 en su estudio desarrollaron un Gemelo Digital para caracterizar el microclima en invernadero, estimando temperatura en 39 ubicaciones y validaron experimentalmente el modelo. La validación fuera de línea arrojó valores de Error Absoluto Medio (MAE) de entre 0,74 °C y 1,04 °C (RMSE: 0,94–1,35 °C; NMAE: 3,55–5,28 %), mientras que la validación en línea obtuvo valores de MAE de entre 1,13 °C y 2,12 °C (RMSE: 1,45–2,35 °C; NMAE: 5,3–9,3 %) en todas las ubicaciones de sensores validadas y bajo condiciones meteorológicas contrastantes. Este estudio muestra como la obtención correcta de datos del microclima en invernaderos y su correcto procesamiento lleva a modelos predictivos con alto grado de precisión.

Durante el día se registran temperaturas más altas (media ~25.3°C) que en la noche (media ~12.0°C), con una diferencia de 13.3°C. La variabilidad diurna es notable. La humedad relativa es inversamente proporcional a la temperatura; durante el día la HR disminuye (media ~37.1%) y aumenta en la noche (media ~74.4%). La humedad del suelo se mantiene relativamente constante, pero puede haber ligeras variaciones debido al riego y la evapotranspiración con Media en el día de 39.5% y en la noche de 38.5%. Los niveles de dióxido de carbono (CO_2) son más altos durante la noche (media ~435.4 ppm) debido a la respiración de las plantas y la falta de fotosíntesis, y disminuyen durante el día (media ~403.8 ppm) por la absorción fotosintética.

Finalmente, podemos decir que la temperatura muestra una fuerte correlación negativa con la humedad relativa ($r = -0.99$), lo que es esperado. La humedad del suelo no muestra una correlación clara con las otras variables, indicando que el riego puede estar controlado independientemente. Las variables presentan distribuciones aproximadamente normales, aunque la humedad del suelo muestra cierta asimetría debido a los eventos de riego.

El estudio demuestra la urgencia de implementar un manejo agrícola optimizado mediante un control microclimático automatizado ventilación o nebulización en el día para atenuar temperaturas extremas y prevenir la resequedad, y ventilación o calefacción nocturna para romper los picos de humedad crítica.

Conclusiones

El microclima del invernadero muestra un patrón diurno claro, con temperaturas más altas y Humedad Relativa más baja durante el día.

Los niveles de CO_2 fluctúan inversamente a la temperatura, reflejando la actividad fotosintética.

La humedad del suelo permanece estable, lo que sugiere un manejo adecuado del riego.

Las relaciones entre variables son consistentes con la física del invernadero.

Se recomienda usar estos patrones para optimizar la ventilación, el riego y la suplementación de CO_2.

Estos hallazgos proporcionan la base empírica necesaria para implementar futuros algoritmos de predicción temporal con redes LSTM, al establecer los límites de control estadístico y las relaciones funcionales que gobiernan el microclima en esta estructura de producción local.

Literatura Citada

Revistas

Abdal, Y. M., Ali, A. H., & Salim, O. N. M. (2026). IoT-enabled monitoring, fuzzy control, and LSTM-based temperature forecasting for smart hydroponic greenhouses. *Smart Agricultural Technology*, 15, 102432. https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.102432

Arnaud, S. E., Calisti, M., & Polydoros, A. (2026). Data-driven greenhouse climate regulation in lettuce cultivation using BiLSTM and GRU predictive control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 247: 111719. https://doi.org/10.1016/j.compag.2026.111719

Flores-Moreno, R., Osio-Chávez, I. D. J., Gómez-Gómez, A. A., & Gaitan, C. E. L. (2026). Design and Deployment of an IoT Network for Real-Time Greenhouse Monitoring. *Agro Productividad*, 19(6): 47-64. https://doi.org/10.32854/9fjcvd62

Guo, Y., Wei, A., Shi, H., Wang, Z., Yue, S., Chang, X., Tang, K., Zou, J., & Li, N. (2026). Ensemble LSTM models for short-term early warning of nitrous oxide emissions: A case study of a full-scale wastewater treatment plant in Copenhagen. *Journal of Water Process Engineering*, 87: 110153. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2026.110153

Hosny, K. M., El-Hady, W. M., & Samy, F. M. (2025). Technologies, protocols, and applications of Internet of Things in greenhouse farming: A survey of recent advances. *Information Processing in Agriculture*, 12(1): 91-111. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2024.04.002

Jeon, Y.-J., Park, S. J., Lee, H., Cui, J.-S., & Jung, D.-H. (2025). Emulating expert environmental control strategies in strawberry greenhouses using attention-LSTM. *Information Processing in Agriculture*. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2025.12.002

Jung, D.-H., Lee, T. S., Kim, K., & Park, S. H. (2022). A deep learning model to predict evapotranspiration and relative humidity for moisture control in tomato greenhouses. *Agronomy*, 12(9): 2169. https://doi.org/10.3390/agronomy12092169

Kar, S., McKenna, J. R., Sunkara, V., Coniglione, R., Stanic, S., & Bernard, L. (2024). XWaveNet: Enabling uncertainty quantification in short-term ocean wave height forecasts and extreme event prediction. *Applied Ocean Research*, 148: 103994. https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.103994

Ma, D., Carpenter, N., Maki, H., Rehman, T. U., Tuinstra, M. R., & Jin, J. (2019). Greenhouse environment modeling and simulation for microclimate control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162: 134-142. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.013

Onu, P., Madonsela, N., & Pradhan, A. (2026). Development of LSTM-attention-based microelectronic systems for enhanced greenhouse temperature prediction. *Procedia Computer Science*, 277: 1788-1796. https://doi.org/10.1016/j.procs.2026.02.217

Rabbi, B., Chen, Z.-H., & Sethuvenkatraman, S. (2019). Protected cropping in warm climates: A review of humidity control and cooling methods. *Energies*, 12(14), 2737. https://doi.org/10.3390/en12142737

Ragaveena, S., Shirly Edward, A., & Surendran, U. (2021). Smart controlled environment agriculture methods: A holistic review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20(4): 887-913. https://doi.org/10.1007/s11157-021-09591-z

Rudrakar, S., & Rughani, P. (2024). IoT based agriculture (Ag-IoT): A detailed study on architecture, security and forensics. *Information Processing in Agriculture*, 11(4): 524-541. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2023.09.002

Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. *Cognitive Robotics*, 3: 54-70. https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001

Wang, Y., Ojo, M., & Zahid, A. (2026). Automated IoT-enabled greenhouse microclimate prediction using multivariate sequence-to-sequence LSTM-based encoder-decoder. *Internet of Things*, 102015. https://doi.org/10.1016/j.iot.2026.102015

Xie, Y., & Xu, L. (2026). A mechanistic structure-based hybrid CNN-LSTM model for greenhouse tomato yield prediction. *Smart Agricultural Technology*, 13: 101817. https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.101817

Xiong, Y., & Su, Y. (2025). Hybrid modeling approaches for accurate greenhouse climate prediction: Combining mechanistic models and LSTM neural networks. *Ecological Modelling*, 503: 111059. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111059

Yan, C., Na, T., Zhen, Q., Sun, Y., & Liu, K. (2025). Prediction of air temperature and humidity in greenhouses via artificial neural network. *PLOS ONE*, 20(6): e0325650. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0325650

Yang, Y., Gao, P., Sun, Z., Wang, H., Lu, M., Liu, Y., & Hu, J. (2023). Multistep ahead prediction of temperature and humidity in solar greenhouse based on FAM-LSTM model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213: 108261. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108261

Yu, G., Zhao, H., Zhang, S., Wang, Y., & Chow, D. (2021). Modeling and optimization of environment in agricultural greenhouses for improving cleaner and sustainable crop production. *Journal of Cleaner Production*, 285: 124843. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124843

Zhang C., Muñoz M., Díaz F. R., Li M. (2026). Integrating CFD-based Digital Twins into an IoT Platform for Enhanced Greenhouse Temperature Spatial Distribution Monitoring, Internet of Things, 102064. https://doi.org/10.1016/j.iot.2026.102064

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Construcción y caracterización microclimática de una minifábrica de plantas para la generación de datos de frontera en modelos CFD

Héctor Hugo Fuentes Franco[1], Agustín Ruíz García[1], Jorge Flores Velázquez[2], José Armando Ramírez Arias[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Las fábricas de plantas con iluminación artificial (PFAL) requieren condiciones microclimáticas homogéneas que favorezcan un crecimiento uniforme del cultivo. Dado que la distribución de aire y temperatura depende de la geometría y el diseño de cada módulo, se requiere caracterizar experimentalmente cada una. El objetivo de esta investigación fue evaluar el microclima de una mini PFAL con cultivo de lechuga variedad mantequilla (Lactuca sativa) y generar datos de frontera para futuras simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). El estudio se desarrolló en dos fases. En la primera, se evaluaron tres velocidades de ventilación (1.0, 1.5 y 2.0 m/s), registrando temperatura, humedad relativa y DPV con nueve sensores SHT35. La temperatura media se mantuvo cercana a 25 °C en los tres tratamientos; la uniformidad de temperatura, humedad y DPV mejoró con velocidades mayores, siendo 1.5 m/s la de mejor equilibrio general (DPV = 0.940 kPa, CV = 8.55%), dentro del rango adecuado para lechuga. Se caracterizó también la radiación PAR, que aumentó con la altura de medición (104–210 µmol $m^{-2}s^{-1}$), siendo más uniforme cerca del dosel (CV ≈ 13–14%) que de las luminarias. En la segunda fase, bajo 1.5 m/s, se monitoreó la dinámica térmica de las lámparas LED (30.8–36.5 °C) y de la superficie foliar (19.8–24.3 °C) durante el fotoperiodo. Se concluye que la caracterización por fases permitió definir el régimen de ventilación idóneo y aportó los parámetros necesarios para la modelación en CFD.

Palabras clave: déficit de presión de vapor, humedad relativa, radiación PAR, velocidad de aire, temperatura foliar.

Abstract

Plant factories with artificial lighting (PFAL) require homogeneous microclimatic conditions to promote uniform crop growth. Since the air and temperature distribution depends on the geometry and design of each module, each one needs to be experimentally characterized. The aim of this work was to evaluate the microclimate of a mini PFAL cultivated with butterhead lettuce (Lactuca sativa) and to generate boundary data for future Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. The study was conducted in two phases. In the first phase, three ventilation speeds (1.0, 1.5, and 2.0 m/s) were evaluated, recording temperature, relative humidity, and vapor pressure deficit (VPD) with nine SHT35 sensors. Mean temperature remained close to 25 °C across the three treatments; the uniformity of temperature, humidity , and VPD improved with higher speeds, with 1.5 m/s showing the best overall balance (VPD = 0.940 kPa, CV = 8.55%), within the appropriate range for lettuce.

[1]Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México, México. CP 56230. Estado de México. Correo: al24520791@chapingo.mx, aruizg@chapingo.mx, jramirezar@chapingo.mx
[2]Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco, C.P. 56230, Estado de México. Correo: jorgelv@colpos.mx

PAR radiation was also characterized, increasing with measurement height (104–210 μmol $m^{-2}s^{-1}$) and showing greater uniformity near the canopy (CV ≈ 13–14%) than near the luminaires. In the second phase, under 1.5 m/s, the thermal dynamics of the LED lamps (30.8–36.5 °C) and leaf surface (19.8–24.3 °C) were monitored during the photoperiod. It is concluded that phase-based characterization allowed the identification of the optimal ventilation regime and provided the parameters needed for CFD modeling.

Keywords: air velocity, leaf temperature, PAR radiation, relative humidity, vapor pressure deficit.

Introducción

La agricultura en ambientes controlados representa una alternativa eficiente para la producción intensiva de cultivos hortícolas. Dentro de estos sistemas, las fábricas de plantas con iluminación artificial (PFAL) permiten regular variables como temperatura, humedad relativa, flujo de aire y radiación, favoreciendo así la producción continua (Kozai et al., 2022). Sin embargo, el rendimiento del cultivo depende en gran medida de la homogeneidad microclimática, ya que variaciones en la velocidad del aire, la radiación PAR y el intercambio térmico afectan la transpiración y la asimilación nutrimental (Zhang & Kacira, 2022). Una distribución deficiente del microclima puede traducirse en crecimiento desigual, diferencias en la transpiración, tipburn (quemadura de puntas) y variaciones en el rendimiento del cultivo (Frantz et al., 2004).

A diferencia de las PFAL de escala comercial, ampliamente estudiadas en la literatura, existe poca información sobre la caracterización microclimática de sistemas a menor escala (mini-PFAL), cuya proporción superficie-volumen y disposición interna generan condiciones aerodinámicas y térmicas distintas. Asimismo, son escasos los trabajos que caracterizan conjuntamente la ventilación forzada, la distribución de la radiación PAR y la disipación térmica de las luminarias en un mismo módulo, como base experimental integral para la validación de modelos CFD.

La ventilación forzada resulta determinante en la transferencia de calor y masa entre el dosel y el ambiente. Fang et al. (2020) demostraron que la distribución del aire en el dosel afecta directamente la uniformidad microclimática, mientras que Lee et al. (2023) reportaron mejoras en dicha uniformidad mediante modificaciones físicas del sistema de ventilación. De manera similar, Gao et al. (2025) encontraron que la tasa de renovación del aire modifica significativamente la uniformidad ambiental dentro del sistema. Adicionalmente, la distribución de la radiación PAR dentro del módulo no es homogénea: su intensidad varía tanto con la altura respecto al dosel como con la cercanía a las fuentes luminosas, lo que genera gradientes térmicos y diferencias en la evapotranspiración del cultivo (Flores-Velazquez et al., 2022). En conjunto, estos antecedentes muestran que la ventilación y la distribución lumínica son factores críticos para el control ambiental en una PFAL. Dado que el comportamiento microclimático depende de la geometría, la disposición de los tubos de cultivo, la posición de las fuentes de calor y el arreglo de las luminarias de cada módulo, los datos obtenidos en un diseño específico no son directamente extrapolables a otros, lo que hace indispensable la caracterización de cada sistema.

Por su parte, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como una herramienta clave para simular y optimizar los flujos de aire y la transferencia de calor dentro de este tipo de sistemas (Chen et al., 2024; Fatnassi et al., 2023). No obstante, la precisión de los modelos numéricos depende de definir adecuadamente las condiciones de frontera, tales como la temperatura del aire, la humedad relativa, la distribución de la radiación PAR y la

emisión térmica de las luminarias (Flores-Velazquez et al., 2022). En este contexto, contar con datos experimentales reales, obtenidos bajo las condiciones específicas de operación del sistema, resulta indispensable para validar y dar confiabilidad a futuras simulaciones CFD, así como para optimizar el diseño del sistema de ventilación e iluminación.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue caracterizar experimentalmente el microclima de un módulo Mini PFAL para lechuga tipo mantequilla mediante un enfoque en dos fases. En la primera fase, se evaluaron tres velocidades de flujo de aire (1.0, 1.5y 2.0 m/s) a través del monitoreo espacial y temporal de temperatura y humedad relativa, así como del mapeo espacial de la radiación PAR, con el fin de determinar la velocidad que proporcionara la mayor uniformidad microclimática dentro de la mini PFAL. En la segunda fase, utilizando la velocidad seleccionada, se determinó la evolución temporal de la temperatura de las lámparas y de la superficie foliar durante el fotoperiodo.

Materiales y métodos

Descripción del experimento

El experimento se llevó a cabo en el Departamento de Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (19° 29' 32.32" N, 98° 53' 32.92" W), Chapingo, Estado de México. Se construyó un módulo MPFAL de 2.1 m de alto, 0.6 m de ancho y 1.2 m de largo, con tres niveles de cultivo de 0.5 m de altura cada uno. La estructura se cubrió con un aislante térmico reflectivo aluminizado tipo foam (95–97% de reflectancia), con entrada de aire en la parte inferior y salida en la parte superior mediante ventiladores axiales (Figura 1).

Se utilizó un sistema de técnica de película de nutrientes (NFT) con cuatro tubos de cultivo por nivel. La solución nutritiva se formuló a partir del análisis químico del agua y de los requerimientos nutrimentales reportados para el cultivo de lechuga, empleando fertilizantes solubles grado hidropónico. El pH y la conductividad eléctrica (CE) de la solución se monitorearon y ajustaron periódicamente con un medidor (Hanna HI98130, Estados Unidos).

El flujo de aire se generó mediante un blower centrífugo (PREISA BW0.25/V, México) conectado a tres ductos con 18 salidas de aire por nivel, reguladas mediante válvulas mecánicas (Figura 2). La renovación de aire se realizó con un ventilador y un extractor axial (VIVOSUN VSV-IFP6C, Estados Unidos), controlados por un termostato digital (INKBIRD ITC-308, China). El blower operó en intervalos de 15 minutos durante el fotoperiodo. Se evaluaron tres tratamientos de velocidad de aire: 1.0, 1.5 y 2.0 m/s, verificados a la altura de los tubos de cultivo mediante anemómetro.

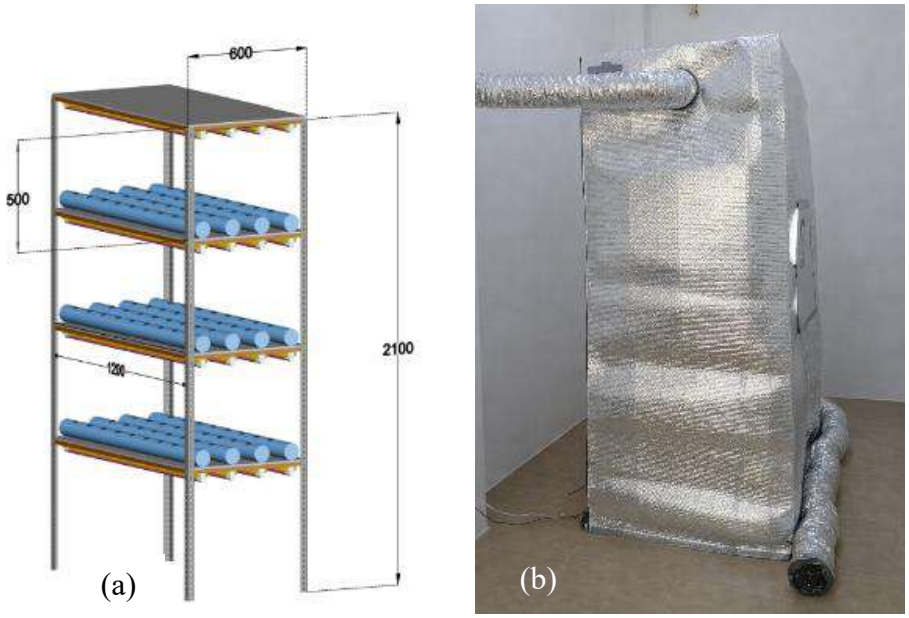


Figura 1: (a) Dimensiones del módulo MPFAL (mm). (b) cubierta de material aislante aluminizado, donde se observa la entrada de aire en la parte inferior y la salida en la parte superior mediante ventiladores axiales. Fuente: Elaboración propia

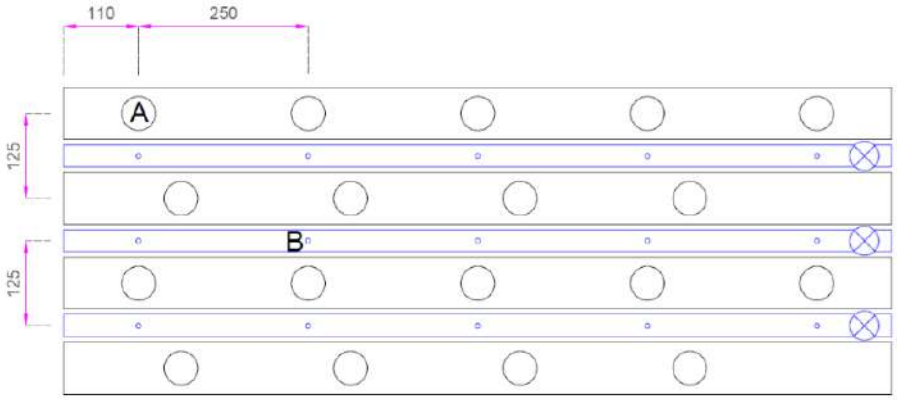


Figura 2: Distribución de las cavidades de cultivo (A) y de los ductos y salidas de aire (B) en un nivel, dimensiones en mm. Fuente: Elaboración propia.

Caracterización ambiental

El monitoreo de temperatura y humedad relativa se realizó mediante nueve sensores SHT35 (MUNEFE, Suiza) (Figura 3), distribuidos homogéneamente en el segundo nivel de la mini PFAL, conectados a un microcontrolador Arduino UNO mediante un multiplexor I2C. Los datos se registraron cada minuto, promediando seis lecturas tomadas cada 10 segundos.

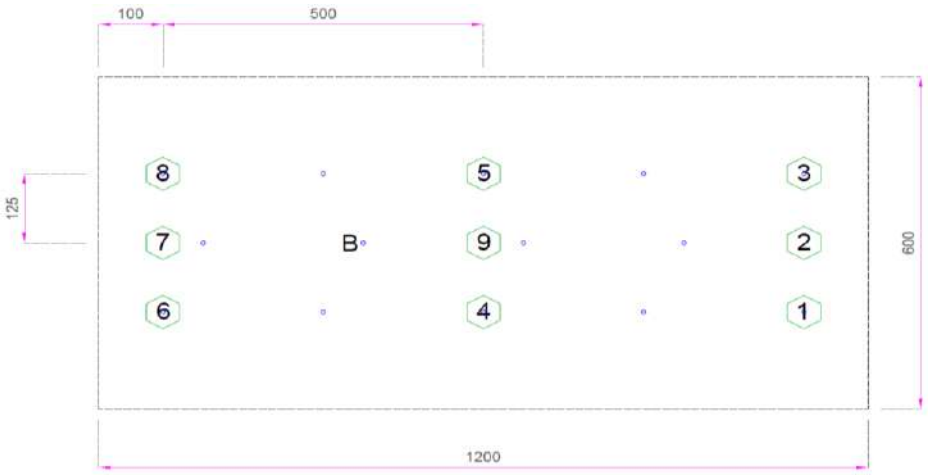


Figura 3: Distribución de los nueve sensores SHT35 (1 - 9), y (B) salidas de ventilación, dimensiones en mm. Fuente: Elaboración propia.

El déficit de presión de vapor (DPV) se calculó a partir de la temperatura (T) y humedad relativa (HR)(Allen et al., 1998) :

$$DPV = e_s(T)\left(1 - \frac{HR}{100}\right) \quad (1)$$

donde la presión de vapor de saturación (e_s) se estimó como:

$$e_s = 0.6108\, exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \quad (2)$$

La homogeneidad espacial de cada variable se evaluó mediante el coeficiente de variación (CV):

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (3)$$

donde es $\bar{x}$ es la media de la variable observada y s es la desviación estándar de la muestra.

La iluminación artificial se suministró con tres lámparas LED (ActiveGrow T8 White Sun, 20 W, 4 ft, Estados Unidos) instaladas en cada nivel de cultivo. La distribución espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) se caracterizó mediante mapas generados con un sensor cuántico MQ-610 (Apogee Instruments, Estados Unidos), en los tres niveles de cultivo y a cuatro alturas respecto a la base de cada nivel (5, 15, 25 y 35 cm), registrando 55 puntos por mapa (matriz de 11 × 5) (Figura 4). Con estos datos se calcularon estadísticos descriptivos (media, desviación estándar, CV) para evaluar la uniformidad espacial de la radiación en cada nivel.



Figura 4: Detalle del sensor cuántico Apogee MQ-610 durante el muestreo de radiación PAR. Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

Comportamiento temporal de temperatura y humedad relativa

En las tres velocidades del aire evaluadas, la temperatura espacial media se mantuvo cercana a 25 °C durante el fotoperiodo, con oscilaciones asociadas al ciclo de encendido-apagado del sistema de control de ventilación. La humedad relativa mostró un comportamiento más variable, con oscilaciones de mayor amplitud, particularmente en el tratamiento de 1.0 m/s, donde se registraron los picos más pronunciados a lo largo del día (Figura 5).

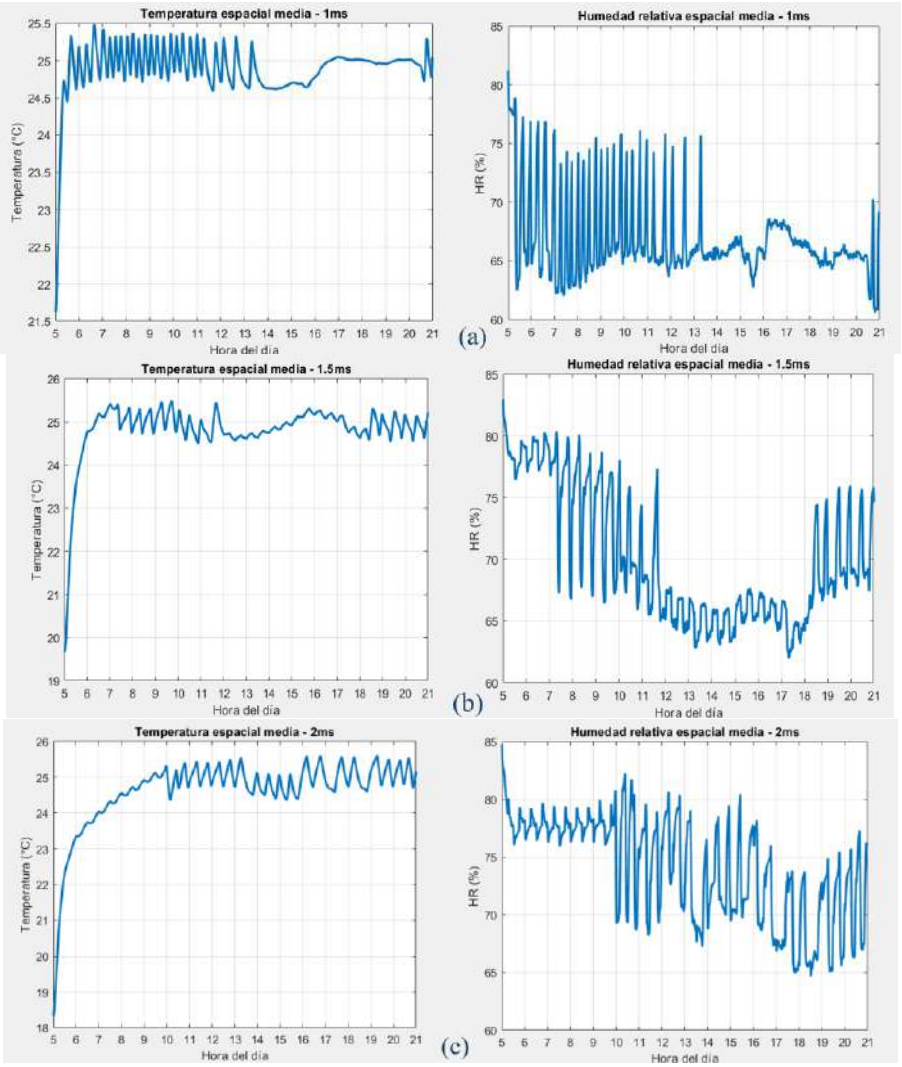


Figura 5: Comportamiento temporal promedio de temperatura y humedad relativa registrado por los nueve sensores distribuidos en el segundo nivel de la MPFAL, con flujo de aire de 1 m/s (a), 1.5 m/s (b) y 2 m/s (c). Fuente: Elaboración propia.

Comportamiento temporal del déficit de presión de vapor

En las tres velocidades del aire, el déficit de presión de vapor (DPV) presentó un comportamiento temporal similar. Al inicio del periodo de operación se registraron valores bajos, entre 0.3 y 0.8 kPa, que aumentaron durante las primeras horas del fotoperiodo hasta alcanzar una condición relativamente estable, con valores cercanos a 0.9–1.1 kPa (Figura 6). El DPV medio diario disminuyó conforme aumentó la velocidad del aire, con valores de 1.05, 0.94 y 0.81 kPa para 1.0, 1.5 y 2.0 m s^{-1}, respectivamente. Este comportamiento puede asociarse con los cambios en la temperatura y la humedad relativa producidos por una mayor circulación y mezcla del aire dentro del sistema. Los tratamientos de 1.5 y 2.0 m s^{-1} se encontraron dentro del intervalo óptimo de 0.5–1.0 kPa reportado para lechuga, mientras que a 1.0 m s^{-1} el valor medio fue ligeramente superior a dicho intervalo (Lauwers et al., 2025).

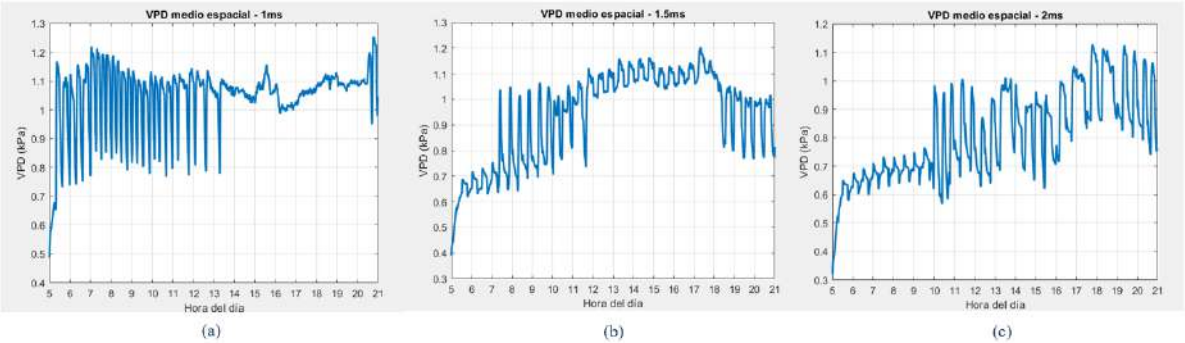


Figura 6: Comportamiento del DPV medio espacial calculado con datos de los nueve sensores distribuidos en el segundo nivel de la MPFAL, con flujo de aire de 1 m/s (a), 1.5 m/s (b) y 2 m/s (c). Fuente: Elaboración propia.

Uniformidad espacial de temperatura y humedad relativa

Incrementar la velocidad de ventilación redujo los gradientes térmicos y mejoró la mezcla de aire dentro del módulo. La humedad relativa resultó más sensible a los cambios espaciales que la temperatura, como lo indican los coeficientes de variación (CV) obtenidos. El CV espacial de temperatura disminuyó conforme aumentó la velocidad del aire (Cuadro 1). Para la humedad relativa, el CV fue menor en el tratamiento de 1.5 m/s respecto a 1.0 y 2.0 m/s (Cuadro 1).

Cuadro 1: Coeficiente de variación espacial de temperatura y humedad relativa diaria con las tres velocidades evaluadas.

Velocidad (m s^{-1})	**CV (%)**	
	T	**HR**
1.0	1.453	5.400
1.5	1.194	3.625
2.0	1.056	3.793

Fuente: Elaboración propia.

Al integrar los indicadores de uniformidad en un análisis conjunto, la velocidad de 2.0 m/s maximizó la uniformidad térmica (CV = 1.056%); sin embargo, la velocidad de 1.5 m/s presentó la menor variabilidad espacial del DPV (CV = 8.55%), variable directamente relacionada con la transpiración y el intercambio gaseoso de las plantas (Cuadro 2). Por lo tanto, 1.5 m/s representa el mejor tratamiento entre uniformidad ambiental y condiciones fisiológicas para el cultivo de lechuga mantequilla.

Cuadro 2: Comportamiento espacial diario de los indicadores de uniformidad microclimática para las variables temperatura (T), humedad relativa (HR) y déficit de presión de vapor (VPD).

Indicador	Velocidad del aire			
	1 m s^{-1}	**1.5 m s^{-1}**	**2 m s^{-1}**	**Mejor**
T espacial media (°C)	24.89	24.83	24.63	---
HR espacial media (%)	66.78	70.08	74.02	---
CV espacial T (%)	1.453	1.194	1.056	2 m s^{-1}
CV espacial HR (%)	5.400	3.625	3.793	1.5 m s^{-1}
VPD medio (kPa)	1.046	0.940	0.808	1.5 y 2 m s^{-1}*
CV espacial VPD (%)	11.00	8.55	10.57	1.5 m s^{-1}

* 0.5–1.0 kPa (Lauwers et al., 2025). Fuente: Elaboración propia.

Distribución espacial de la radiación PAR

La intensidad de radiación PAR aumentó progresivamente con la altura de medición en los tres niveles de cultivo (Figura 7). Los valores medios variaron de 127.1 a 208.2 µmol m^{-2} s^{-1} en el nivel 1 (N1), de 103.8 a 202.6 µmol m^{-2} s^{-1} en el nivel 2 (N2), y de 112.6 a 193.0 µmol m^{-2} s^{-1} en el nivel 3 (N3), entre 5 y 35 cm de altura, respectivamente. N1 presentó las mayores intensidades promedio en las cuatro alturas evaluadas, mientras que N2 y N3 mostraron valores similares entre sí, particularmente a 15 y 25 cm. La uniformidad espacial fue mayor cerca del dosel (CV entre 13.1 y 14.3% a 5 cm), mientras que a 25–35 cm los CV alcanzaron entre 15 y 19% (Cuadro 3). Lo que indica una mayor heterogeneidad conforme el plano de medición se aproximó a las luminarias. Esta configuración generó gradientes de radiación tanto entre niveles como con la altura, condición que deberá incorporarse en futuros modelos CFD, dada su influencia sobre la generación de calor y la evapotranspiración del cultivo.

Cuadro 3: Estadísticas descriptivas de radiación PAR observada en cada nivel

Nivel	Media global	DE	CV (%)	Mínima	Máxima
N1	164.34	40.86	24.86	86	254
N2	150.37	45.46	30.23	71	245
N3	150.59	40.86	27.13	80	238

Fuente: Elaboración propia.

Dinámica térmica de lámparas y superficie foliar

Durante la segunda fase experimental, operando bajo la velocidad seleccionada (1.5 m/s), la temperatura de las lámparas LED se incrementó rápidamente tras el encendido, pasando de 17.7 °C (05:55 h, previo al fotoperiodo) a valores entre 33 y 36 °C durante la mayor parte del fotoperiodo, con un valor mínimo puntual de 30.8 °C hacia el final del día (19:55 h) (Figura 8). La temperatura de la superficie foliar se mantuvo considerablemente más estable, con una media de 22.9 °C (DE = 0.76, CV = 3.32%) y un rango de 19.8 a 24.3 °C, Cuadro 5. La diferencia térmica entre la lámpara y la hoja se mantuvo entre 9.1 y 13.2 °C a lo largo del fotoperiodo, lo que evidencia la capacidad del sistema de ventilación para disipar el calor generado por las luminarias antes de que este incida directamente sobre el dosel.

(a) (b)

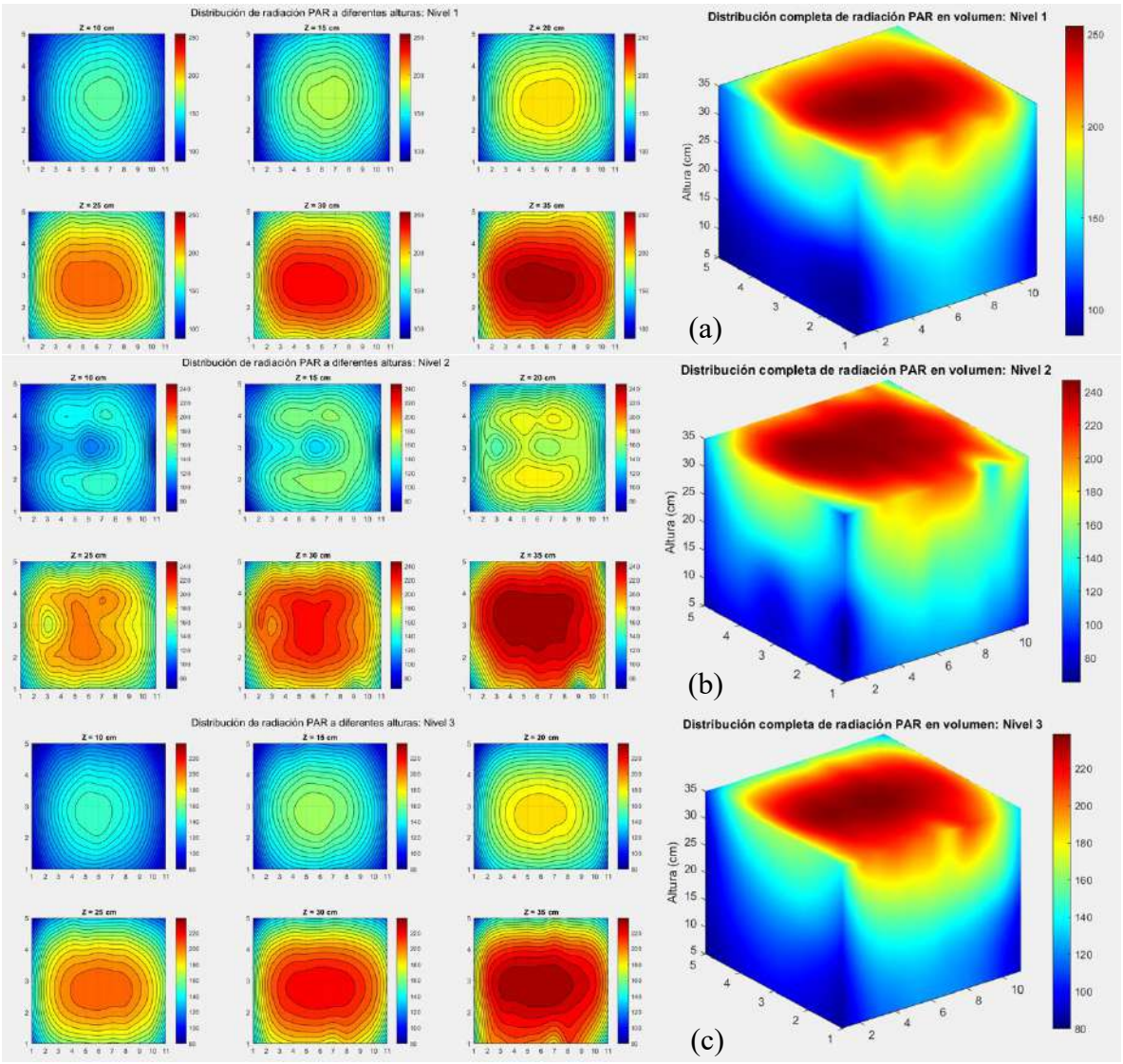


Figura 7: Mapas de distribución espacial de radiación PAR en los tres niveles de cultivo (N) de la MPFAL a diferentes alturas y en volumen total, N1(a), N2(b) y N3(c). Fuente: Elaboración propia.

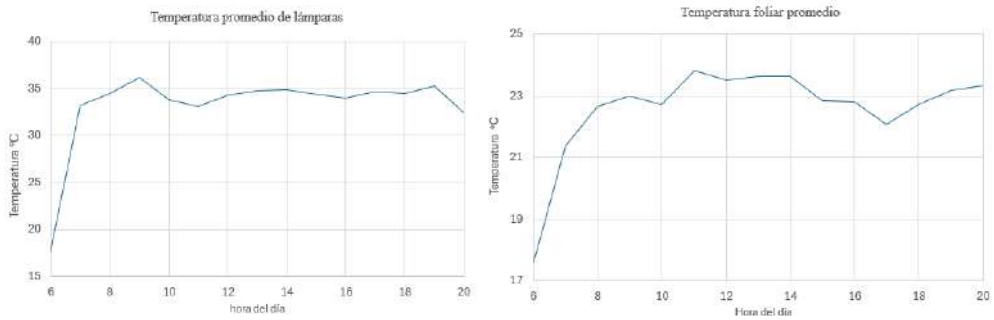


Figura 8: Dinámica temporal de la temperatura de lámparas LED (a) y superficie foliar durante el fotoperiodo (b). Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5: Estadísticas descriptivas de la temperatura de las lámparas y superficie foliar

Temperatura	Media	DE	CV	Mínima	Máxima
Lámpara	34.29	1.20	3.49 %	30.8	36.5
Foliar	22.94	0.76	3.32 %	19.8	24.3

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

La caracterización experimental de tres velocidades de ventilación (1.0, 1.5 y 2.0 m/s) permitió describir el comportamiento espacial y temporal de la temperatura, humedad relativa, DPV y radiación PAR dentro de la mini PFAL. La velocidad de 2.0 m/s produjo la mayor uniformidad térmica, mientras que 1.5 m/s presentó la menor variabilidad de humedad relativa y DPV, representando el mejor equilibrio entre uniformidad ambiental y condiciones fisiológicas para la lechuga mantequilla. La radiación PAR mostró gradientes entre niveles y con la altura, siendo más homogénea cerca del dosel que cerca de las luminarias. Asimismo, la temperatura de las lámparas LED se mantuvo consistentemente más alta y variable que la temperatura foliar, con una diferencia térmica sostenida de 9 a 13 °C, lo que evidencia la capacidad del sistema de ventilación para disipar el calor sin comprometer la temperatura del cultivo. En conjunto, estos resultados aportan los parámetros necesarios para la futura validación de modelos CFD orientados al diseño y optimización de sistemas mini-PFAL.

Literatura citada

Libros

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO, Rome.

Kozai, T., Niu, G., & Masabni, J. (2022). *Plant Factory Basics, Applications and Advances*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2020-0-01628-2

Revistas

Chen, X., Hou, T., Liu, S., Guo, Y., Hu, J., Xu, G., Ma, G., & Liu, W. (2024). Design of a Micro-Plant Factory Using a Validated CFD Model. *Agriculture, 14*(12). https://doi.org/10.3390/agriculture14122227

Fang, H., Li, K., Wu, G., Cheng, R., Zhang, Y., & Yang, Q. (2020). A CFD analysis on improving lettuce canopy airflow distribution in a plant factory considering the crop resistance and LEDs heat dissipation. *Biosystems Engineering, 200*. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.08.017

Fatnassi, H., Bournet, P. E., Boulard, T., Roy, J. C., Molina-Aiz, F. D., & Zaaboul, R. (2023). Use of computational fluid dynamic tools to model the coupling of plant canopy activity and climate in greenhouses and closed plant growth systems: A review. *Biosystems Engineering, 230*, 388–408. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.04.016

Flores-Velazquez, J., Akrami, M., & Villagrán, E. (2022). The Role of Radiation in the Modelling of Crop Evapotranspiration from Open Field to Indoor Crops. *Agronomy, 12*(11). https://doi.org/10.3390/agronomy12112593

Frantz, J. M., Ritchie, G., Cometti, N. N., Robinson, J., & Bugbee, B. (2004). Exploring the Limits of Crop Productivity: Beyond the Limits of Tipburn in Lettuce. *Journal of the American Society for Horticultural Science, 129*(3), 331–338. https://doi.org/10.21273/JASHS.129.3.0331

Gao, H., Tan, Z.-C., Yang, M., Ma, C.-P., Tang, Y.-F., & Zhao, F.-Y. (2025). Microclimate Air Motion and Uniformity of Indoor Plant Factory System: Effects of Crop Planting Density and Air Change Rate. *Applied Sciences, 15*(8), 4329. https://doi.org/10.3390/app15084329

Lauwers, S., Coussement, J. R., & Steppe, K. (2025). Interlinked Temperature and Light Effects on Lettuce Photosynthesis and Transpiration: Insights from a Dynamic Whole-Plant Gas Exchange System. Agronomy, 15(9), 2180. https://doi.org/10.3390/agronomy15092180

Lee, S.-W., Seo, I.-H., An, S.-W., & Na, H.-Y. (2023). Improvement of Environmental Uniformity in a Seedling Plant Factory with Porous Panels Using Computational Fluid Dynamics. *Horticulturae, 9*(9), 1027. https://doi.org/10.3390/horticulturae9091027

Zhang, Y., & Kacira, M. (2022). Analysis of climate uniformity in indoor plant factory system with computational fluid dynamics (CFD). *Biosystems Engineering, 220*, 73–86. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.05.009

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Cuantificación de la Evapotranspiración Actual de *Vitis vinifera* L. en un Viñedo del Suroeste de Delicias, Chihuahua

Saúl Valencia Gaspar[1]*, Linda Citlalli Noperi Mosqueda[1], Orlando Ramírez Valle[2], Juan Manuel Soto Parra [1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

La disponibilidad limitada de agua en las regiones áridas y semiáridas de Chihuahua hace necesario mejorar la estimación de los requerimientos hídricos de cultivos de alto valor como *Vitis vinifera* L. El objetivo fue cuantificar la evapotranspiración actual (ETa) y caracterizar su variabilidad espaciotemporal de un viñedo comercial en Delicias, Chihuahua, durante el año 2024. La ETa se estimó mediante productos de EEFlux, basada en el algoritmo METRIC con imágenes térmicas de Landsat. Debido a la disponibilidad temporal de imágenes, se estimó el coeficiente de cultivo (Kc) para las fechas disponibles y se interpoló para generar una serie diaria de Kc, a partir de la cual se obtuvo la ETa diaria mediante ETa = ETo × Kc. La serie se analizó mediante promedios, suavización, acumulación, anomalías y métricas espaciales de promedio, desviación estándar y coeficiente de variación. Finalmente, se aplicó el procedimiento K-means sobre las series temporales de ETa para delimitar zonas homogéneas de manejo. Los resultados mostraron una marcada estacionalidad, con valores máximos de ETa suavizada cercanos a 6 mm d^{-1} y máximos diarios de 7.3 mm d^{-1} durante julio-agosto, mientras que la ETa acumulada alcanzó 660–670 mm. La variabilidad espacial presentó valores medios de 1.9–2.7 mm d^{-1}, desviaciones estándar de 1.6–2.6 mm d^{-1} y coeficientes de variación de 0.75–1.10. Se identificaron anomalías negativas principalmente durante el periodo de mayor demanda evaporativa y tres zonas de manejo diferenciadas mediante K-means. Los resultados evidencian el potencial de análisis espaciotemporal de la ETa para apoyar estrategias de riego de precisión.

Palabras clave: evapotranspiración actual, *Vitis vinifera* L., EEFlux, variabilidad espacial, K-means.

Abstract

Limited water availability in the arid and semi-arid regions of Chihuahua highlights the need to improve the estimation of water requirements for high-value crops such as Vitis vinifera L. The objective was to quantify actual evapotranspiration (ETa) and characterize its spatiotemporal variability in a commercial vineyard in Delicias, Chihuahua, during 2024. ETa was estimated using EEFlux products based on the METRIC algorithm and Landsat thermal imagery. Due to the temporal availability of imagery, the crop coefficient (Kc) was estimated for the available dates and interpolated to generate a daily Kc time series, from which daily ETa was obtained using ETa = ETo × Kc.

[1]Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Av. Pascual Orozco s/n, Campus 1, Santo Niño, Chihuahua, Chihuahua, México 31160 saulvg170@gmail.com, lnoperi@uach.mx
[2]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental La Campana-Sierra de Chihuahua, Aldama, Chihuahua, México 32910 oramirezva@miners.utep.edu

The time series was analyzed using means, smoothing, cumulative ETa, anomalies, and spatial metrics including mean, standard deviation, and coefficient of variation. Finally, K-means clustering was applied to the ETa time series to delineate homogeneous management zones. The results showed marked seasonality, with maximum smoothed ETa values close to 6 mm d^{-1} and daily maxima of 7.3 mm d^{-1} during July–August, while cumulative ETa reached 660–670 mm. Spatial variability showed mean ETa values ranging from 1.9–2.7 mm d^{-1}, standard deviations of 1.6–2.6 mm d^{-1}, and coefficients of variation of 0.75–1.10. Negative anomalies were identified mainly during the period of highest evaporative demand, and three differentiated management zones were delineated using K-means. These results demonstrate the potential of spatiotemporal ETa analysis to support precision irrigation strategies.

Keywords: actual evapotranspiration, *Vitis vinifera* L., EEFlux, spatial variability, K-means, precision irrigation.

Introducción

La viticultura constituye una de las actividades agrícolas de mayor importancia económica a nivel mundial y representa un sistema productivo emergente y estratégico en regiones áridas y semiáridas, donde la disponibilidad de agua es reducida, y es necesario incrementar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. En estas regiones, la evapotranspiración actual (ETa) es considerada el principal componente del balance hídrico del cultivo y un indicador fundamental para estimar la demanda de agua y programar el riego (Allen et al., 1998).

Bajo escenarios de cambio climático, incremento de la temperatura y mayor frecuencia de sequías, la cuantificación precisa de la ETa se ha convertido en una herramienta indispensable para la agricultura de precisión y la gestión sostenible del agua (IPCC, 2023; FAO, 2023).

En México, y particularmente en el estado de Chihuahua, la disponibilidad de agua para riego ha disminuido de manera importante durante las últimas décadas a consecuencia de la sobreexplotación de los acuíferos, la reducción en el almacenamiento de presas y el incremento en la variabilidad climática (CONAGUA, 2024). Estas condiciones representan un desafío para cultivos perennes de alto valor económico como *Vitis vinifera* L., cuya producción depende del suministro oportuno de agua durante las diferentes etapas fenológicas. En este contexto, mejorar la estimación espaciotemporal de la evapotranspiración constituye una estrategia clave para optimizar el manejo del riego y aumentar la productividad del agua.

Durante los últimos años, los avances con sensores remotos han permitido estimar la evapotranspiración mediante algoritmos de balance de energía superficial, entre los que destacan SEBAL, METRIC y, más recientemente, la plataforma EEFlux (Earth Engine Evapotranspiration Flux), la cual automatiza la implementación del algoritmo METRIC utilizando imágenes Landsat y el entorno de Google Earth Engine (Laipelt et al., 2021).

Estos productos proporcionan mapas espaciales de ETa con resolución de 30 m y han demostrado un desempeño satisfactorio en diversos sistemas agrícolas alrededor del mundo (Oliveira Costa et al., 2020; Reyes-González et al., 2019). No obstante, la precisión de estas estimaciones puede verse afectada por la heterogeneidad del dosel, las condiciones locales de manejo, el riego localizado y la resolución espacial del sensor, particularmente en cultivos perennes con alta variabilidad intra-parcelaria como los viñedos.

Aunque existen numerosos estudios sobre estimación de la evapotranspiración mediante sensores remotos, persisten importantes vacíos de conocimiento respecto a su aplicación y evaluación en viñedos establecidos bajo condiciones semiáridas del norte de México. La mayor parte de las investigaciones disponibles se han desarrollado en regiones mediterráneas, California, Australia e Israel, donde las condiciones climáticas, el manejo agronómico y las

características del cultivo difieren considerablemente de las condiciones observadas en Chihuahua (Munitz et al., 2016). Asimismo, son escasos los estudios que emplean productos EEFlux para caracterizar la variabilidad espaciotemporal de la evapotranspiración a escala parcelaria y generar información útil para la delimitación de zonas de manejo orientadas al riego de precisión en viñedos comerciales. La cuantificación espacial de la ETa mediante imágenes satelitales representa una alternativa de bajo costo para apoyar la toma de decisiones en el manejo del riego, ya que permite identificar sectores con diferente demanda hídrica, evaluar la variabilidad espacial del consumo de agua y detectar oportunamente condiciones potenciales de estrés hídrico. Esta información resulta relevante en regiones donde la disponibilidad de agua es limitada y la optimización del riego constituye una prioridad para incrementar la eficiencia del uso del agua frente al cambio climático.

Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue cuantificar la evapotranspiración actual en un viñedo ubicado en Delicias, Chihuahua, mediante productos satelitales generados por la plataforma EEFlux, con el propósito de caracterizar su variabilidad espaciotemporal durante el ciclo agrícola 2024 y generar información que contribuya al manejo eficiente del riego y a la implementación de estrategias de agricultura de precisión.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en un viñedo comercial ubicado al sur del municipio de Delicias, Chihuahua, México, una de las principales regiones agrícolas de riego del estado. La región presenta un clima seco semicálido con lluvias en verano (BWhw), caracterizado por una precipitación media anual de aproximadamente 275–280 mm, cerca del 70 % de la precipitación anual se concentra entre julio y septiembre, mientras que el resto del año presenta precipitaciones escasas y elevada demanda evaporativa. Estas condiciones hacen necesario el riego para la producción agrícola y convierten a la evapotranspiración en una variable fundamental para programar el riego (García, 2004; INEGI, 2023). El periodo de estudio comprendió de enero a octubre de 2024, abarcando el ciclo fenológico del cultivo. Para analizar la dinámica de la evapotranspiración actual (ETa) del viñedo. El estudio tuvo como propósito caracterizar el comportamiento espaciotemporal del consumo hídrico, detectar eventos potenciales de estrés hídrico y delimitar zonas homogéneas de manejo mediante información obtenida por sensores remotos.

La evapotranspiración actual (ETa) se obtuvo a partir de imágenes de la plataforma EEFlux (Earth Engine Evapotranspiration Flux), basada en el algoritmo METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration), el cual estima la evapotranspiración mediante el balance de energía superficial utilizando imágenes térmicas de Landsat. Debido a que la plataforma EEFlux únicamente genera estimaciones para las fechas de adquisición de Landsat, se estimó el coeficiente de cultivo (Kc) para cada imagen disponible mediante la ecuación 1:

$$K_c = \frac{ETa}{ET_0} \quad (1)$$

donde ETa corresponde a la evapotranspiración actual obtenida mediante EEFlux y ETo a la evapotranspiración de referencia, calculada con datos meteorológicos de la estación in situ. Posteriormente, los valores instantáneos de Kc se interpolaron temporalmente entre fechas consecutivas para generar una serie diaria continua. Finalmente, la evapotranspiración actual diaria se calculó mediante la ecuación 2:

$$ETa_d = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

Las imágenes diarias de ETa fueron recortadas utilizando el polígono del viñedo y organizadas en una matriz tridimensional (x, y, t), donde las dimensiones espaciales corresponden a las filas y columnas de cada imagen y la tercera dimensión representa el tiempo. A partir de esta matriz se obtuvo la serie temporal de ETa promedio del viñedo, la evapotranspiración acumulada durante el ciclo agrícola, así como mapas del promedio, desviación estándar y coeficiente de variación (CV), con el propósito de evaluar la magnitud del consumo hídrico, la variabilidad temporal y la estabilidad espacial dentro del cultivo.
Posteriormente, se calcularon las anomalías de ETa para identificar periodos con comportamiento diferente al esperado y detectar eventos potenciales de estrés hídrico mediante el análisis de desviaciones respecto a la tendencia temporal de la serie. Finalmente, para identificar zonas homogéneas de comportamiento hídrico se aplicó la técnica de agrupamiento K-means, utilizando como variables de entrada la serie temporal completa de ETa de cada píxel. Este procedimiento permitió agrupar sectores del viñedo con dinámicas similares de consumo de agua y delimitar zonas de manejo orientadas al riego de precisión. Todos los análisis estadísticos y el procesamiento espacial se realizaron en MATLAB R2024a (MathWorks Inc., Natick, MA, EE. UU.).

Resultados y discusión

Con base en los procedimientos descritos anteriormente, se estimó y analizó la evapotranspiración actual (ETa) del viñedo durante el ciclo agrícola 2024. El análisis consideró su variabilidad temporal, los valores diarios, la tendencia suavizada y la acumulación progresiva del consumo hídrico. A partir de estos resultados, se identificaron los principales periodos de cambio en la demanda hídrica del cultivo. La Figura 1 muestra la dinámica temporal de la ETa diaria, la señal suavizada y la ETa acumulada. Durante enero y febrero, la ETa presentó valores generalmente inferiores a 1 mm d^{-1}, asociados con una menor actividad del cultivo y condiciones de baja demanda evaporativa. A principios de marzo se observó un incremento marcado, con valores diarios máximos de aproximadamente 5.4–5.5 mm d^{-1}, coincidente con el periodo de inicio del desarrollo vegetativo y el manejo de riego de prebrotación. Posteriormente, entre abril y mayo, la ETa disminuyó y permaneció relativamente estable, generalmente por debajo de 1 mm d^{-1}. A partir de junio se registró un incremento constante de la demanda hídrica, alcanzando durante julio y agosto los mayores valores de la temporada. En este periodo, la ETa suavizada se mantuvo alrededor de 6 mm d^{-1}, mientras que los valores diarios máximos alcanzaron aproximadamente 7.3 mm d^{-1}. La ETa acumulada presentó un incremento progresivo, hasta alcanzar aproximadamente 660–670 mm al finalizar el periodo de estudio, con la mayor tasa de acumulación concentrada entre junio y septiembre. En conjunto, estos resultados evidencian una marcada estacionalidad del consumo hídrico, con una demanda mínima durante el periodo invernal y un máximo durante el verano, coincidente con el periodo de mayor desarrollo del cultivo y demanda evaporativa atmosférica.

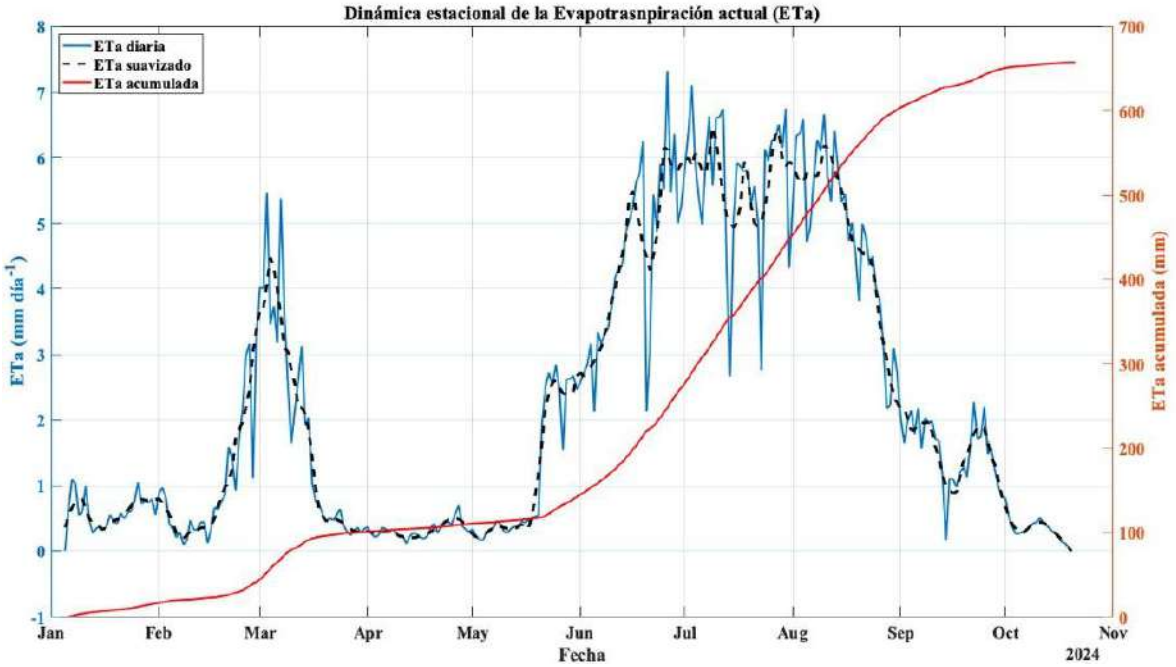


Figura 1. Dinámica temporal de la evapotranspiración actual (ETa) del viñedo durante el año 2024. Fuente: elaboración propia.

Los valores obtenidos en el presente estudio muestran una magnitud de evapotranspiración comparable con la reportada para diferentes sistemas de producción de *Vitis vinifera*. En el presente viñedo, la ETa suavizada alcanzó aproximadamente 6 mm d^{-1}, mientras que los valores diarios máximos fueron cercanos a 7.3 mm d^{-1}, con una acumulación aproximada de 660–670 mm durante el periodo analizado. Estos valores son consistentes con los reportados por Munitz et al. (2016) para *Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon en Israel, quienes registraron valores máximos de ETc de 6.64–7.5 mm d^{-1} y consumos estacionales de 746–780 mm. Por otra parte, Williams et al. (2003) reportaron para vides maduras Thompson Seedless en California los valores máximos diarios de ETc de 6.0–6.7 mm d^{-1} y consumos estacionales de 718–865 mm, observando que las diferencias interanuales en el consumo de agua estuvieron relacionadas, con el desarrollo del área foliar. Por otra parte, Netzer et al. (2009), en vides Superior Seedless cultivadas bajo un sistema de conducción de dosel amplio en una región semiárida de Israel, encontraron valores máximos de ETc de 7.26–8.59 mm d^{-1} y consumos estacionales considerablemente mayores (1087–1348 mm), atribuidos principalmente al mayor desarrollo del dosel y a la arquitectura del sistema de conducción.

Estos resultados resaltan la importancia de considerar no solo la variación temporal de la evapotranspiración, sino también su distribución espacial, ya que las diferencias en el desarrollo del dosel y en la disponibilidad de agua pueden generar diferentes patrones de consumo dentro de la parcela. En este sentido, el análisis espacial de la ETa permitió identificar la heterogeneidad del viñedo. La Figura 2 de izquierda a derecha muestra la distribución espacial del promedio de la ETa, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV), estos parámetros permiten evaluar, el comportamiento medio, la variabilidad temporal y la variabilidad relativa de la evapotranspiración en el viñedo.

El promedio de la ETa presentó valores aproximados de entre 1.9 y 2.7 mm d^{-1}. Las zonas centrales del viñedo, representadas en tonos rojos, registraron los valores En contraste, las zonas periféricas, representadas en tonos azules, mostraron valores menores. La desviación estándar osciló entre 1.6 y 2.6 mm d^{-1}, lo que indica una mayor variabilidad temporal de la ETa en las

áreas centrales y una respuesta más dinámica a las condiciones meteorológicas y al manejo del agua. Por su parte, el coeficiente de variación presentó valores aproximados de entre 0.75 y 1.10. Los valores más altos, representados en tonos rojos intensos, se localizaron en la parte superior izquierda del viñedo. En cambio, los valores bajos, representados en tonos azules, indicaron sectores relativamente más homogéneos en su comportamiento de evapotranspiración. En conjunto, los resultados evidencian una marcada heterogeneidad espaciotemporal y muestran el potencial de estas métricas para delimitar zonas de manejo orientadas a la aplicación diferenciada del riego.

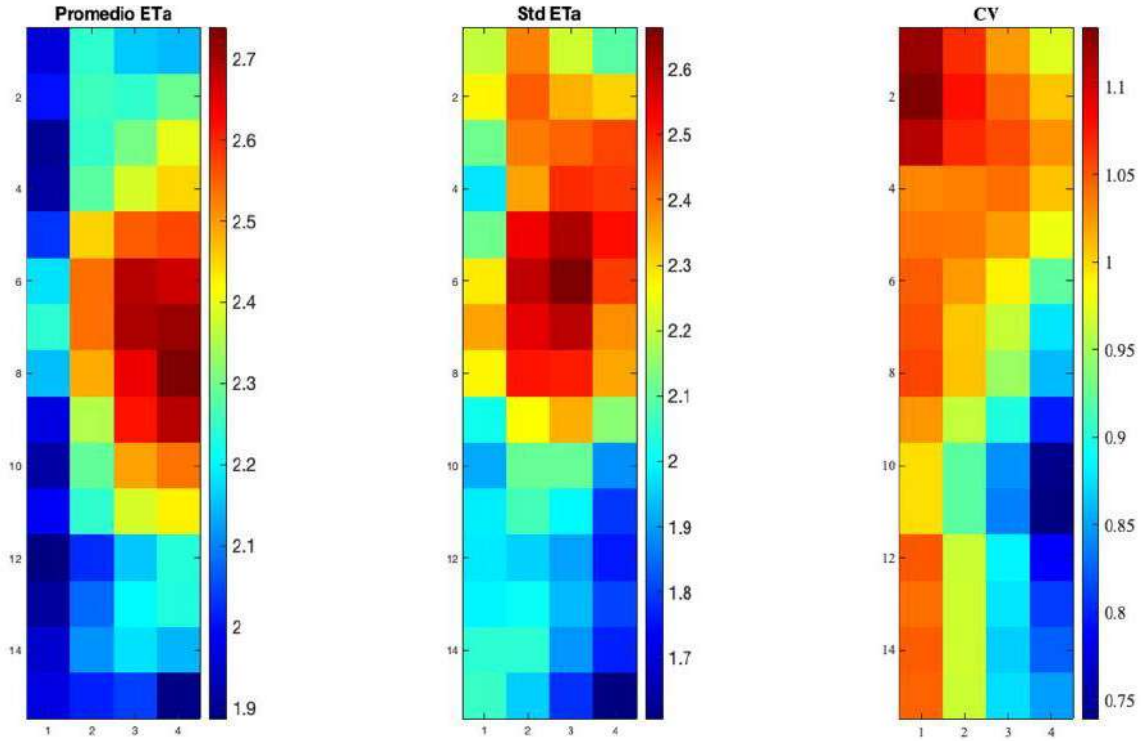


Figura 2. Distribución espacial del promedio de evapotranspiración actual (ETa), desviación estándar (Std ETa) y coeficiente de variación (CV). Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran una marcada heterogeneidad espacial de la ETa dentro del viñedo, lo que indica que el consumo hídrico no fue uniforme aún bajo condiciones de manejo relativamente homogéneas. El promedio espacial de ETa varió entre 1.9 y 2.7 mm d^{-1}, con los valores más altos en la zona central, posiblemente asociados con mayor desarrollo del dosel o disponibilidad de agua. Sin embargo, al integrar respuestas de la vegetación, la atmósfera y el suelo, estos patrones deben interpretarse como indicadores de diferencias en el consumo hídrico, no solo como evidencia de mayor disponibilidad de agua. En este sentido, Knipper et al. (2020) demostraron en viñedos de California que la distribución espacial de ETa permite identificar diferencias en la dinámica hídrica y que variables como el LAI influyen en la estimación espacial de ET. Asimismo, la desviación estándar de 1.6–2.6 mm d^{-1} indicó que las áreas con mayor ETa media también presentaron mayor variabilidad temporal, posiblemente por cambios estacionales en la demanda atmosférica, el desarrollo del dosel y la disponibilidad hídrica. Desde el punto de vista agronómico, esta variabilidad puede servir como base para definir zonas de manejo diferencial. Ohana-Levi et al. (2020) demostraron que las series temporales de ET obtenidas por sensores remotos permiten delimitar áreas homogéneas en

viñedos de *Vitis vinifera*, mientras que Ohana-Levi et al. (2021) señalaron que integrar ET, LAI y NDVI mejora la caracterización de la heterogeneidad intra-parcela y fortalece el manejo sitio-específico.

Para complementar este análisis espacial, se evaluó también la evolución temporal de las anomalías de la ETa con el propósito de identificar periodos en los que el comportamiento del cultivo se separó de las condiciones esperadas. La figura 3 muestra la dinámica temporal de las anomalías de ETa y la detección de eventos potenciales de estrés hídrico durante 2024. Las anomalías negativas, marcadas en rojo, indican periodos donde la ETa fue menor al comportamiento esperado, sugiriendo limitaciones hídricas o reducción en la actividad fisiológica del cultivo. Los valores oscilaron entre aproximadamente +2 y −3 mm d^{-1}, registrándose los eventos más severos entre junio y agosto, coincidiendo con la máxima demanda evaporativa y desarrollo del dosel vegetal. Este análisis permite a productores y técnicos identificar periodos críticos de estrés, optimizar el manejo del riego y mejorar la eficiencia en el uso del agua mediante estrategias de agricultura de precisión.

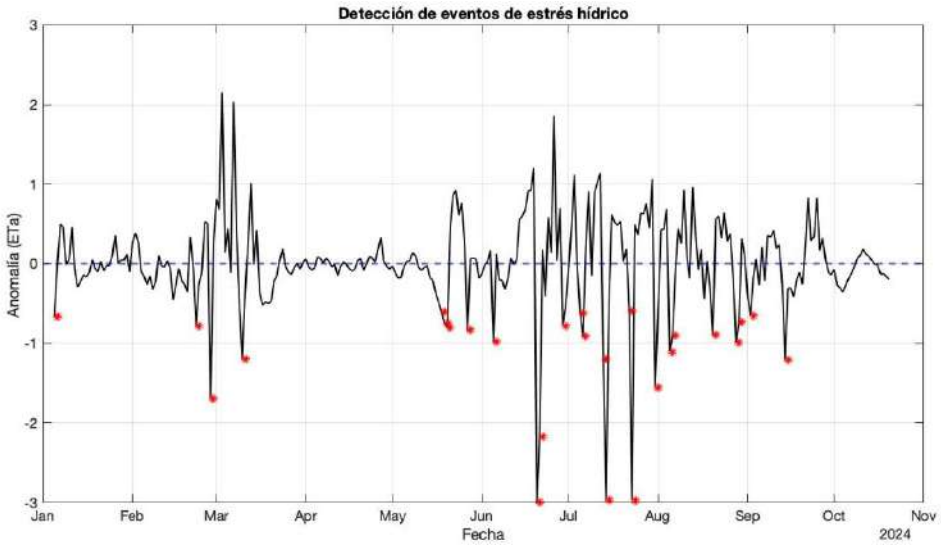


Figura 3. Serie temporal de anomalías de evapotranspiración actual (ETa) y detección de eventos de estrés hídrico durante 2024. Fuente: elaboración propia.

Las anomalías temporales de ETa proporcionan información complementaria a la distribución espacial del promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Mientras que estas últimas métricas permiten identificar sectores con comportamiento diferenciado dentro del viñedo, las anomalías muestran cuándo la ETa se aparta de la dinámica esperada y, por tanto, ayudan a localizar periodos potencialmente críticos para el cultivo. Este enfoque es particularmente relevante en viñedos, donde la demanda evaporativa puede cambiar rápidamente durante la temporada. Las anomalías negativas observadas entre junio y agosto podrían reflejar una reducción relativa de la transferencia de agua hacia la atmósfera durante un periodo de alta demanda evaporativa. Esta reducción puede producirse cuando el suministro de agua en el suelo no satisface la demanda atmosférica y las plantas disminuyen la apertura estomática para limitar la pérdida de agua. No obstante, una anomalía negativa también puede deberse a una menor cobertura vegetal, variaciones en el vigor, diferencias en la superficie del suelo. Knipper et al. (2019) mostraron que las estimaciones de ET obtenidas a partir de información térmica satelital podían detectar heterogeneidad espacial asociada con eventos de estrés hídrico en un viñedo de California. Además, la respuesta térmica permitió identificar señales de estrés transitorio con mayor rapidez que algunos índices de vegetación. De manera

similar, Ohana-Levi et al. (2020) utilizaron series temporales de ET para definir zonas de manejo y apoyar decisiones sobre la cantidad, el momento y la localización del riego. Estos autores señalaron que la información temporal de la ET puede contribuir a caracterizar el uso del agua dentro del viñedo y a establecer unidades de manejo con comportamiento relativamente homogéneo. En el presente estudio, la identificación de anomalías negativas entre junio y agosto sugiere que este periodo debe recibir especial atención en la programación del riego y en el monitoreo del estado hídrico de las plantas.

Sin embargo, las anomalías de ETa deben interpretarse como indicadores de alerta y no como diagnósticos independientes de estrés. Los índices derivados de anomalías de evapotranspiración pueden señalar cambios anómalos en el uso del agua y proporcionar señales tempranas de agotamiento de la humedad del suelo, pero requieren información complementaria para discriminar entre estrés hídrico, menor vigor vegetativo, variaciones del dosel y errores de estimación. Por ello, la integración de ETa con humedad del suelo, registros de riego, precipitación, temperatura de la superficie, índices de vegetación y mediciones fisiológicas fortalecería la interpretación de los resultados

Además de identificar anomalías puntuales, el análisis temporal permitió reconocer patrones recurrentes en la dinámica de la ETa entre los distintos sectores del viñedo. Estos patrones se utilizaron para agrupar espacialmente las áreas con respuestas temporales semejantes y establecer una primera delimitación de zonas de manejo. La Figura 4 muestra la sectorización del viñedo basada en la dinámica temporal de la ETa durante el ciclo agrícola, obtenida mediante un análisis de agrupamiento con el algoritmo K-means. Se identificaron tres zonas de manejo con comportamiento hídrico diferenciado. Las zonas amarillas presentaron mayores tasas de ETa y, por tanto, una mayor transferencia estimada de agua hacia la atmósfera; este comportamiento podría estar asociado con un mayor vigor vegetativo una mayor disponibilidad de agua. En contraste, las zonas moradas mostraron menores tasas de ETa y mayor estabilidad temporal, lo que podría relacionarse con menor desarrollo del dosel, limitaciones en la disponibilidad de agua o diferencias en las propiedades del suelo. Esta heterogeneidad espacial indica que el viñedo no responde de manera uniforme y sugiere que la ETa puede contribuir a delimitar zonas de manejo para orientar el monitoreo y la aplicación diferenciada del riego. Sin embargo, estas zonas deben validarse con información independiente antes de utilizarse para establecer prescripciones de riego.

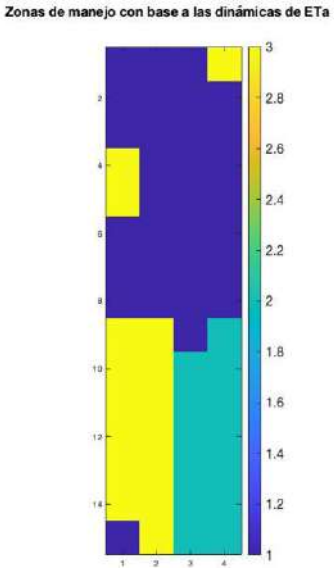


Figura 4. Zonas de manejo obtenidas mediante clustering K-means aplicado a las dinámicas temporales de evapotranspiración actual (ETa). Fuente elaboración propia.

La identificación de tres zonas con patrones temporales diferenciados confirma que la variabilidad del viñedo no responde solo a diferencias puntuales, sino a comportamientos relativamente estables durante el ciclo agrícola. Esta estabilidad es útil para el manejo del riego, ya que permite distinguir variaciones ocasionales de la ETa frente a patrones persistentes asociados con el suelo, el sistema de riego, la topografía, la cobertura del dosel o el vigor de las plantas. El uso de K-means clasificó las unidades espaciales según la similitud de sus series temporales de ETa, por lo que las zonas no se definieron solo por valores altos o bajos en una fecha específica, sino por su respuesta hídrica durante todo el ciclo. Este enfoque resulta más útil que una clasificación basada únicamente en promedios, al incorporar la evolución de la demanda hídrica y la respuesta del cultivo al ambiente y al manejo del riego.

Estos resultados coinciden con Ohana-Levi et al. (2020), quienes utilizaron series temporales de ET obtenidas por sensores remotos para delimitar zonas homogéneas de manejo en viñedos y relacionarlas con variables ambientales y del sitio, como elevación, pendiente, orientación, litología, humedad topográfica y tipo de suelo, respaldando el uso de la ETa como variable integradora del uso del agua. Asimismo, demostraron que el agrupamiento de series temporales derivadas de sensores remotos permite generar zonas de manejo útiles para decisiones durante la temporada. En este estudio, las tres zonas obtenidas mediante K-means representan una primera aproximación a unidades con comportamiento hídrico diferenciado, cuya utilidad operativa dependerá de su estabilidad entre fechas y ciclos agrícolas. Las mayores tasas de ETa en las zonas amarillas sugieren una mayor actividad evaporativa del sistema suelo-planta-atmósfera, posiblemente asociada con mayor cobertura foliar, vigor o disponibilidad de agua. Sin embargo, una ETa elevada no siempre indica una condición favorable, ya que también puede reflejar mayor demanda atmosférica o consumo hídrico alto; por ello, su interpretación debe apoyarse en datos de humedad del suelo, vigor, temperatura del dosel y estado hídrico de las plantas.

Los estudios en viñedos de California respaldan el uso de estimaciones térmicas de evapotranspiración (ET) para monitorear el consumo de agua y el estrés con alta resolución espacial y temporal. Knipper et al. (2019) mostraron su utilidad en viñedos con riego por goteo variable, mientras que Knipper et al. (2020) evidenciaron que la respuesta de la ET depende de las condiciones climáticas, la variedad y el sistema de conducción del cultivo. Estos antecedentes muestran que la ET puede utilizarse no solo para analizar la variación temporal del uso del agua, sino también para identificar diferencias entre sectores del viñedo. Con base en este enfoque, a continuación, se presenta la distribución espacial de la ETa acumulada en el viñedo estudiado durante el ciclo agrícola.

La Figura 5 muestra la distribución espacial de la evapotranspiración actual acumulada (ETa) del viñedo durante todo el ciclo agrícola. La escala de colores indica valores que van aproximadamente de 547.07 a 794.13 mm año^{-1}. Los valores más altos, representados en tonos azul oscuro, se concentran principalmente en la zona central del viñedo, mientras que los valores más bajos, representados en tonos claros, se localizan sobre todo en los bordes y en algunos sectores periféricos. En términos absolutos, la diferencia entre el valor máximo y el mínimo es de aproximadamente 247 mm, lo que evidencia una variabilidad espacial considerable en la transferencia acumulada de agua hacia la atmósfera.

Esta distribución no debe interpretarse automáticamente como una diferencia directa en el consumo de agua por las plantas. La ETa integra la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación, por lo que los contrastes observados pueden estar relacionados con diferencias en la cobertura y el vigor del dosel, la disponibilidad de agua, las propiedades del suelo, la distribución del riego, la topografía o la proporción de suelo desnudo. En particular, los valores elevados de la zona central podrían reflejar una mayor cobertura vegetal y actividad transpiratoria, aunque también podrían estar asociados con una mayor disponibilidad de agua o

con condiciones microclimáticas diferenciadas. Por su parte, los valores bajos de los bordes podrían relacionarse con menor desarrollo del dosel, menor vigor, restricciones en el suministro de agua o una mayor proporción de superficie sin vegetación.

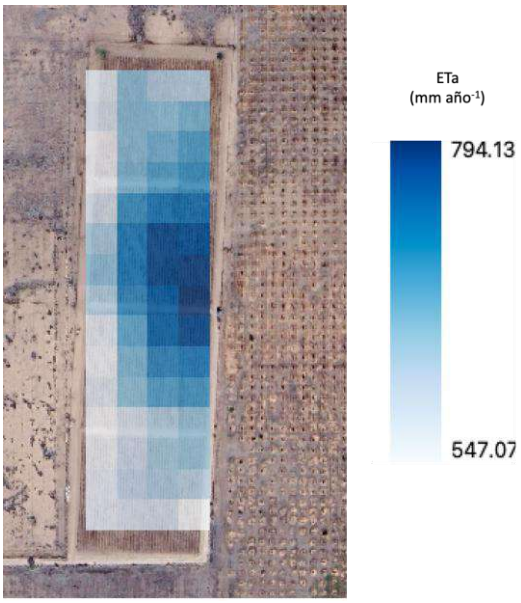


Figura 5. Distribución espacial de la evapotranspiración acumulada de la temporada 2024. Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista del manejo, los sectores con valores altos de ETa acumulada podrían requerir un seguimiento más frecuente para determinar si corresponden a zonas con mayor vigor y adecuada disponibilidad de agua o a sectores con una demanda hídrica elevada. A su vez, los sectores con valores bajos deben revisarse para identificar posibles limitaciones en el riego, menor desarrollo vegetativo, problemas de suelo o diferencias en la cobertura vegetal. Finalmente, la distribución espacial de la ETa acumulada demuestra el potencial de la teledetección para detectar variabilidad hídrica dentro del viñedo y apoyar la delimitación preliminar de zonas de manejo.

Conclusiones

La estimación de la ETa mediante productos EEFlux permitió caracterizar la dinámica espaciotemporal del consumo hídrico del viñedo durante 2024. Se identificó una marcada estacionalidad, con máximos de ETa durante julio-agosto y una acumulación aproximada de 660–670 mm. El análisis espacial evidenció heterogeneidad en la magnitud y variabilidad del consumo hídrico, mientras que las anomalías permitieron identificar periodos potencialmente críticos durante la temporada de mayor demanda. El agrupamiento K-means permitió delimitar tres zonas de manejo con diferentes patrones temporales de ETa, demostrando el potencial de esta metodología para apoyar el manejo en áreas específicas del riego. Estas zonas representan una primera aproximación y deberán validarse mediante información independiente, como humedad del suelo, vigor del cultivo, NDVI/NDRE, LAI y registros de riego, antes de establecer prescripciones diferenciadas. En conjunto, los resultados muestran que la integración de sensores remotos y análisis espaciotemporal de ETa puede contribuir a mejorar la eficiencia del uso del agua en viñedos de regiones áridas con limitaciones de agua y eventos de sequía recurrentes.

Literatura citada

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Italy. FAO *Irrigation and Drainage Paper* 56. FAO.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, *98*(6), 899–920. https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2010.12.015

Allen, R. G., & Pereira, L. S. (2009). Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*, *28*(1), 17–34. https://doi.org/10.1007/S00271-009- 0182-Z/FIGURES/8.

IPCC, 2023; FAO, 2023. *Informe Grupo del grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (IPCC, FAO). Roma. Disponible en: https://www.fao.org/newsroom/detail/latest-ipcc-report-highlights-the-critical-need-to-transform-agrifood-systems-as-a-way-to-mitigate-and-adapt-to-climate-change/es. 20 de marzo del 2023.

García de Miranda, Enriqueta (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. México. UNAM, Instituto de Geografía. Pp. 1-98.

INEGI (2023). *Anuario estadístico y geográfico de Chihuahua* 2023. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. pp 10-573

Oliveira Costa, J., José, J. V., Wolff, W., de Oliveira, N. P. R., Oliveira, R. C., Ribeiro, N. L., Coelho, R. D., da Silva, T. J. A., Bonfim-Silva, E. M., & Schlichting, A. F. (2020). Spatial166 variability quantification of maize water consumption based on Google EEflux tool. *Agricultural Water Management*, *232*, 106037. https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106037

Reyes-González, A., Kjaersgaard, J., Trooien, T., Reta-Sánchez, D. G., Sánchez-Duarte, J. I., Preciado-Rangel, P., & Fortis-Hernández, M. (2019). Comparison of Leaf Area Index,172 Surface Temperature, and Actual Evapotranspiration Estimated Using the METRIC Model and In Situ Measurements. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *19*(8). https://doi.org/10.3390/S19081857

CONAGUA (2024). *Plan Nacional Hídrico 2024-2030*. México: Comision Nacional del Agua pp.. 2-47

Laipelt, L., Henrique Bloedow Kayser, R., Santos Fleischmann, A., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021). Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *178*, 81–96. https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2021.05.018

Munitz, S., Schwartz, A., & Netzer, Y. (2016). Evaluation of seasonal water use and crop coefficients for 'Cabernet Sauvignon' grapevines as the base for skilled regulated deficit irrigation. *Acta Horticulturae*, 1115, 33–39. DOI: 10.17660/ActaHortic.2016.1115.6.

Williams, L. E., Phene, C. J., Grimes, D. W., & Trout, T. J. (2003). Water use of mature Thompson Seedless grapevines in California. *Irrigation Science*, 22, 11–18. DOI: 10.1007/s00271-003-0067-5.

Williams, L. E., & Ayars, J. E. (2005). Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132, 201–211. DOI: 10.1016/j.agrformet.2005.07.010.

Netzer, Y., Yao, C., Shenker, M., Bravdo, B., Schwartz, A., & Cohen, S. (2009). Water use and the development of seasonal crop coefficients for Superior Seedless grapevines trained to an open-gable trellis system. *Irrigation Science,* 27, 109–120. DOI: 10.1007/s00271-008-0124-1.

Knipper, K. R., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Nieto, H., Alfieri, J. G., Prueger, J. H., Hain, C. R., Gao, F., McKee, L. G., Alsina, M. M., & Sanchez, L. A. (2020). Using high-spatiotemporal thermal satellite ET retrievals to monitor water use over California vineyards of different climate, vine variety and trellis design. *Agricultural Water Management*, 241, 106361.

Ohana-Levi, N., Knipper, K., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Netzer, Y., Gao, F., Alsina, M. M., Sanchez, L. A., & Karnieli, A. (2020). Using satellite thermal-based evapotranspiration time series for defining management zones and spatial association to local attributes in a vineyard. *Remote Sensing*, 12(15), 2436.

Knipper, K. R., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Nieto, H., Alfieri, J. G., Prueger, J. H., Hain, C. R., Gao, F., McKee, L. G., Alsina, M. M., & Sanchez, L. A. (2019). Using high-spatiotemporal thermal satellite ET retrievals for operational water use and stress monitoring in a California vineyard. *Remote Sensing*, 11(18), 2124.mdpi

Knipper, K. R., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Nieto, H., Alfieri, J. G., Prueger, J. H., Hain, C. R., Gao, F., McKee, L. G., Alsina, M. M., & Sanchez, L. A. (2020). Using high-spatiotemporal thermal satellite ET retrievals to monitor water use over California vineyards of different climate, vine variety and trellis design. *Agricultural Water Management*, 241, 106361.sciencedirect

Ohana-Levi, N., Knipper, K., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Netzer, Y., Gao, F., Alsina, M. M., Sanchez, L. A., & Karnieli, A. (2020). Using satellite thermal-based evapotranspiration time series for defining management zones and spatial association to local attributes in a vineyard. *Remote Sensing*, 12(15), 2436. https://doi.org/10.3390/rs12152436ars.usda+1

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Desarrollo de un Recubrimiento Comestible a Base de Pectina para Prolongar la Vida Útil de Fresas

Ilse Berenice Carrillo Salas[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Las fresas son frutos altamente perecederos debido a su elevada actividad de agua y susceptibilidad al deterioro físico y microbiológico, lo que ocasiona pérdidas durante su almacenamiento y comercialización. El objetivo de este trabajo es desarrollar y evaluar un recubrimiento comestible a base de pectina para prolongar la vida útil de las fresas comercializadas en locales de CDMX. El recubrimiento se aplicará mediante dos inmersiones y las muestras se almacenarán bajo refrigeración durante 15 días, con evaluaciones en los días 0,3,6,9,12 y 15. Se determinarán parámetros fisicoquímicos como pérdida de peso, pH, sólidos solubles, firmeza y color, además del crecimiento de mohos y levaduras y la presencia de deterioro visible. La efectividad del tratamiento se evaluará mediante la comparación con un control sin recubrimiento, considerando la conservación de las características de calidad y el incremento de la vida útil. Se espera que la película protectora formada por la pectina ayude a disminuir la pérdida de humedad y a retrasar el deterioro de las fresas durante el almacenamiento. El desarrollo de esta alternativa puede contribuir a la reducción de pérdidas postcosecha y al aprovechamiento de tecnologías de conservación aplicables a la comercialización y distribución de frutas frescas.

Palabras clave: Pectina, recubrimiento comestible, vida útil, pérdidas postcosecha

Abstract

Strawberries are highly perishable due to their high water activity and susceptibility to physical and microbial deterioration, wich can result in significant losses during storage and distribution. This study aims to develop and evaluate a pectin-based edible coating to extend the shelf life of strawberries sold at local markets in Mexico City. The coating will be applied using a two-step dipping process, and the treated fruit will be stored under refrigerated conditions for 15 days. Quality assessments will be performed on days 0,3,6,9,12 and 15.

Physicochemical parameters, including weight loss, pH, soluble solids, firmness and color, will be evaluated, along with mold and yeast growth and visible signs of deterioration. The effectiveness of the coating will be determined by comparing the treated fruit with an uncoated control, focusing on the preservation of quality attributes and the extension of shelf life.

The pectin-based coating is expected to form a protective barrier that reduces moisture loss and delays the deterioration of strawberries during storage. This approach may contribute to reducing postharvest losses and promoting the use use of practical preservation technologies for the marketing and distribution of fresh fruit.

Keywords: Pectin-based, edible coating, shelf life, postharvest losses.

[1]Universidad Autónoma Chapingo Km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. 52627. ilseberenicecarrillosalas@gmail.com

Introducción

La fresa (*Fragaria × ananassa*) es un fruto de importancia comercial y nutricional debido a su contenido de compuestos bioactivos, vitaminas y minerales. Sin embargo, presenta una elevada perecibilidad como consecuencia de su alto contenido de agua, actividad metabólica y susceptibilidad al deterioro físico y microbiológico. Estas características pueden ocasionar pérdidas importantes durante las etapas de almacenamiento, distribución y comercialización, particularmente cuando no se mantienen condiciones adecuadas de conservación.

Ante esta problemática, los recubrimientos comestibles representan una alternativa tecnológica para mejorar la conservación de productos hortofrutícolas. Estos materiales pueden formar una película semipermeable sobre la superficie del alimento, reduciendo la transferencia de humedad y gases y, con ello, retrasando algunos cambios asociados con la maduración y el deterioro. Entre los materiales con potencial para su aplicación destaca la pectina, un polisacárido de origen vegetal con capacidad para formar películas y recubrimientos, además de presentar características que permiten su incorporación en sistemas destinados a la conservación de alimentos.

En este contexto, el presente trabajo propone el desarrollo y evaluación de un recubrimiento comestible a base de pectina aplicado mediante inmersión sobre fresas destinadas a su comercialización en mercados públicos de la Ciudad de México. Se plantea evaluar el comportamiento de las muestras durante 15 días de almacenamiento refrigerado, realizando mediciones en los días 0, 3, 6, 9, 12 y 15. Los parámetros considerados incluyen pérdida de peso, pH, sólidos solubles, firmeza y color, además de la evaluación microbiológica y del deterioro visible.

La comparación entre las fresas recubiertas y un tratamiento control permitirá determinar la efectividad del recubrimiento para conservar las características de calidad del fruto y establecer su posible contribución al incremento de la vida útil. De esta manera, el proyecto busca aportar una alternativa de conservación basada en una tecnología relativamente sencilla que pueda contribuir a disminuir las pérdidas postcosecha y el desperdicio de fresas durante su comercialización.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó con frutos de fresa (*Fragaria × ananassa*) destinados a su comercialización en mercados públicos de la Ciudad de México. Se seleccionaron frutos firmes, de características visuales homogéneas, sin daños mecánicos ni signos visibles de contaminación o deterioro. Los frutos fueron lavados y secados superficialmente antes de la aplicación de los tratamientos.

El experimento contempló un periodo de almacenamiento de 15 días**,** con evaluaciones realizadas en los días 0, 3, 6, 9, 12 y 15. Las muestras se conservaron bajo condiciones de refrigeración de 1–4 °C **y** 90–95% de humedad relativa.

Materiales

Cantidades para 100 ml
-2 g de pectina de bajo metoxilo
-0.7 g glicerol (plastificante)
-Agua destilada 100 ml
-0.2 g de cloruro de calcio $CaCl_2$
-0.5 g de ácido ascórbico

-Termómetro
-Agitador magnético con calentamiento
-Agitador magnético
-Matraz aforado 100 ml
-Vaso de precipitado100 ml
-Vaso de precipitado 50 ml
-Balanza analítica
-Espátula
-Charolas grandes
-Rejilla metálica
-Canastilla o pinzas de acero inoxidable
-Papel absorbente grado alimenticio
-Envases clamshell
-phmetro (medir pH)
-Refractómetro (medir ºBx)
-Penetrómetro (medir firmeza)

Procedimiento (Solución homogénea y sin grumos)

1- Disolución de pectina

- Medir 80-90 ml de agua destilada y calentar a 60-70ºC.
- Colocar el agua caliente bajo **agitación magnética a baja velocidad**.
- Agregar **2.0 g de pectina** lentamente, en forma de espolvoreo, evitando incorporarla de golpe para prevenir la formación de grumos.
- Mantener la agitación constante hasta que la pectina se encuentre **completamente dispersa y disuelta**.
- Una vez obtenida una solución homogénea, dejar enfriar si es necesario.
- Transferir la solución a un **matraz aforado de 100 mL** y completar con agua destilada hasta la marca.
- Mezclar suavemente hasta obtener una solución homogénea.

La concentración se calculó mediante:

$$\%/v = \frac{(masadelsolutog)}{(volumendesoluciónmL)} x100 \qquad \%/v = \frac{(2.0)}{(100)} x100 = 2\%$$

2-Incorporación del plastificante y antioxidante

- Añadir el glicerol a la solución caliente y seguir agitando durante 5 minutos para que se integre uniformemente en la matriz de pectina.
- Agregar el ácido ascórbico una vez que la temperatura disminuya a 40ºC para evitar degradación térmica del ácido.

3- Preparación del entrecruzamiento

Método de dos etapas

- No agregar el $CaCl_2$ a la mezcla de pectina.
- Dejar enfriar la solución de pectina a temperatura ambiente.
- Preparar una solución separada de $CaCl_2$ al 1% en agua.

La concentración se calculó mediante

$$\%/v = \frac{(1.0)}{(100)} x100 = 1\%$$

4- Aplicación en las fresas por inmersión

Para fresas, el método de doble inmersión suele dar los mejores resultados estéticos y de barrera

a) Selección y lavado: Seleccionar fresas firmes, sin daños mecánicos ni signos de hongos. Lavarlas y secarlas superficialmente.
b) Primera inmersión (Matriz): Sumergir las fresas en la solución de pectina (a temperatura ambiente) durante 1 a 2 minutos asegurando que se cubran por completo.
c) Escurrido: Retirar las fresas de la solución de pectina utilizando una canastilla o pinzas de acero inoxidable, colocarlas sobre una rejilla y charola con papel absorbente grado alimenticio, permitir el escurrido durante 2 a 3 minutos para evitar que se formen gotas excesivas que produzcan una película irregular.
d) Segunda inmersión (Entrecruzamiento): Después del escurrido sumergir las fresas en una solución de Cloruro de calcio ($CaCl_2$) al 1% p/v y mantenerlas inmersas durante 30 a 60 s, esta etapa provoca el entrecruzamiento de las cadenas de pectina mediante los iones calcio, formando una película más resistente y estable sobre la superficie del fruto.
e) Escurrido final: Retirar las fresas de la solución de $CaCl_2$, colocarlas nuevamente sobre una rejilla limpia y dejar escurrir durante 2 minutos para eliminar el exceso de solución.
f) Secado del recubrimiento: Secar las fresas a temperatura ambiente (20-25ºC) durante 30-60 minutos o hasta que la película deje de sentirse húmeda al tacto, también puede emplearse una corriente de aire suave para acelerar el secado sin afectar la integridad del recubrimiento.
g) Empaque: Colocar las fresas recubiertas en envases clamshell (envases de PET perforadas con ventilación para evitar condensación) y manipular cuidadosamente para no dañar la película formada.
h) Almacenamiento: Conservar las muestras de 4-1ºC y 90-95% de humedad relativa. Evaluar los siguientes parámetros durante el almacenamiento (días 0,3,6,9,12 y 15)
    - Pérdida de peso (%)
    - Firmeza
    - Color
    - pH
    - Sólidos solubles (ºBx)
    - Incidencia de hongos
    - Vida útil

Diseño Experimental

Cuadro 1. Datos para evaluación del diseño experimental de pectina y control

Tratamiento	Concentración de Pectina (Factor a)

T0	0% control
T1	2%

Tiempo de almacenamiento (Factor b)	Variables de respuesta
Día 0	Pérdida de peso
3	pH
6	ºBrix
9	Firmeza
12	Color
15	Crecimiento microbiano

Fuente: Estadística de producción para evaluación

Repeticiones: 3 por tratamiento

La concentración de pectina al 2% (p/v) fue seleccionada previamente como la formulación óptima y, por ello, fue utilizada en el presente experimento para evaluar su efecto sobre la calidad y vida útil de las fresas.

Unidades experimentales
10 fresas
2 x 3 x 10 = 60
H0: El tratamiento y el tiempo de almacenamiento no producen diferencias significativas en las variables evaluables.
H1: El tratamiento y/o el tiempo de almacenamiento producen diferencias significativas en algunas en al menos una de las variables evaluadas.

Nivel de significancia: α=0.05

Variables evaluadas

Pérdida de peso

La pérdida de peso se determinó mediante el pesaje de los frutos al inicio y durante cada periodo de almacenamiento.

Se calculó como porcentaje de pérdida de peso mediante:

$$\% = \frac{(Pi - Pf)}{(Pi)} x100$$

donde: donde:

- Pi = peso inicial de la muestra (g).
- Pf = peso de la muestra al día de evaluación (g).

pH

El pH se determinó durante cada periodo de evaluación y se expresó en **unidades de pH**.

Sólidos solubles

Los sólidos solubles se determinaron mediante refractometría y se expresaron en **°Brix**.

Firmeza

La firmeza de los frutos se determinó mediante medición instrumental y se expresó en las unidades correspondientes al equipo empleado.

Color

El color se determinó instrumentalmente y se registró como un valor numérico durante cada periodo de almacenamiento.

Crecimiento microbiano

El crecimiento microbiano se evaluó mediante conteo de unidades formadoras de colonias (UFC). Los resultados se expresaron como UFC y se compararon entre tratamientos durante el periodo de almacenamiento.

Resultados y discusión

1- Pérdida de peso

Cuadro 2. Pérdida de peso de fresas durante el almacenamiento refrigerado.

Día	Control	Pectina al 2%
0	0.0	0.0
3	2.8	1.5
6	5.7	3.2
9	9.1	5.0
12	12.8	7.1
15	16.5	9.3

$$\% = \frac{(Pi-Pf)}{(Pi)} x100$$

$$\% = \frac{(100-97.2)}{(100)} x100 = 2.8\%$$

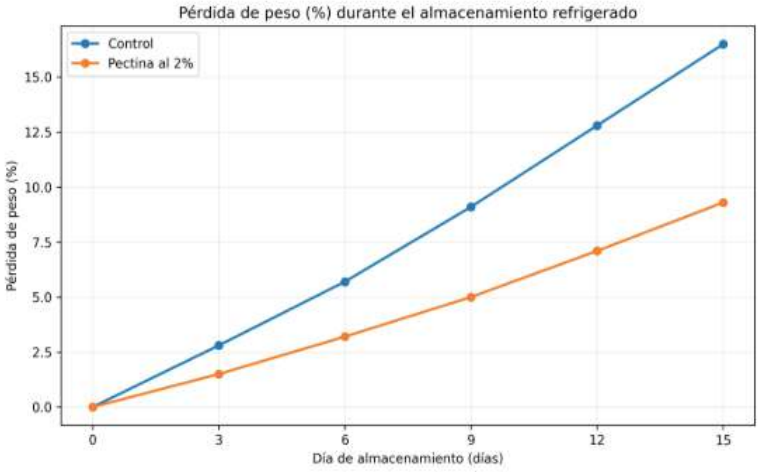
La pérdida de peso aumentó progresivamente durante el almacenamiento en ambos tratamientos. Sin embargo, el tratamiento con pectina al 2% presentó menores pérdidas durante todo el periodo de evaluación.

Al día 15, el control presentó una pérdida de peso de **16.5%**, mientras que las fresas recubiertas con pectina al 2% presentaron **9.3%**.

La reducción relativa de la pérdida de peso fue:

$$\% = \frac{(16.5 - 9.3)}{(16.5)} x100 = 43.67\%$$

Figura 1. Evolución de la pérdida de peso (%) de fresas control y recubiertas con pectina al 2% durante 15 días de almacenamiento refrigerado.



La pérdida de peso aumentó progresivamente en ambos tratamientos. Al día 15, el control presentó 16.5%, mientras que el tratamiento con pectina al 2% presentó 9.3%.

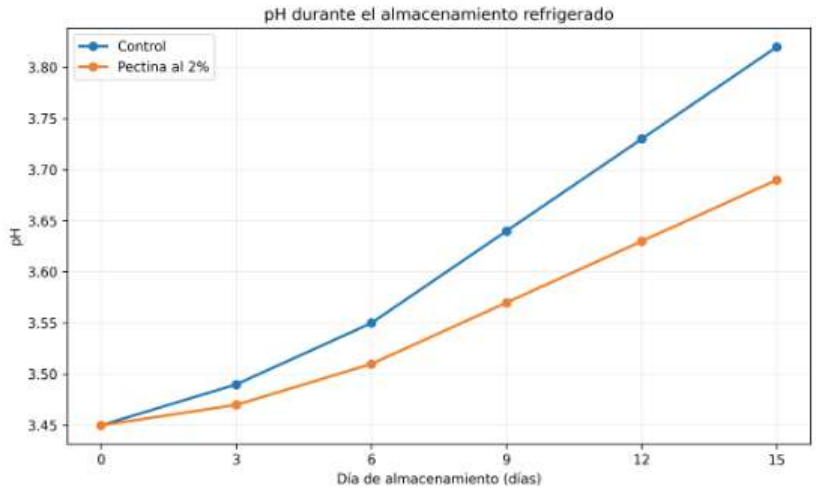
Por lo tanto, el tratamiento con pectina al 2% redujo la pérdida de peso en aproximadamente **43.6% respecto al control**.
Este comportamiento indica que el recubrimiento fue efectivo para disminuir la pérdida de masa durante el almacenamiento. La película formada sobre la superficie del fruto puede actuar como una barrera parcial frente a la transferencia de humedad, reduciendo la deshidratación.

2- pH

Cuadro 3. Variación del pH de fresas durante el almacenamiento refrigerado.

Día	Control	Pectina al 2%
0	3.45	3.45
3	3.49	3.47
6	3.55	3.51
9	3.64	3.57
12	3.73	3.63
15	3.82	3.69

Figura 2. Evolución del pH de fresas control y recubiertas con pectina al 2% durante 15 días de almacenamiento refrigerado.



El pH aumentó progresivamente durante el almacenamiento. El control pasó de 3.45 a 3.82, mientras que el tratamiento con pectina pasó de 3.45 a 3.69.

El incremento relativo fue:

Control:

$$\frac{(3.82 - 3.45)}{(3.45)} x100 = 10.72\%$$

Tratamiento

$$\frac{(3.69 - 3.45)}{(3.45)} x100 = 6.96\%$$

El menor incremento observado en las muestras recubiertas indica una menor variación del pH durante el almacenamiento.

3-Sólidos Solubles (ºBx)

Cuadro 4. Variación de los sólidos solubles de fresas durante el almacenamiento.

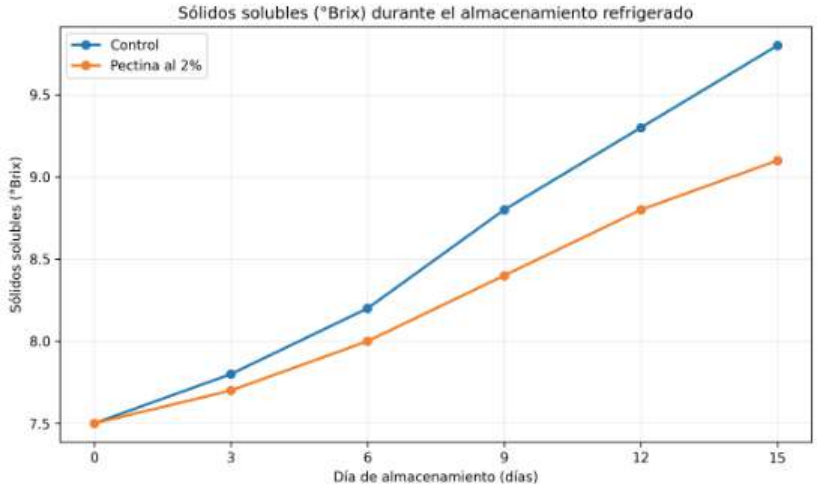
Día	Control	Pectina al 2%
0	7.5	7.5
3	7.8	7.7
6	8.2	8.0
9	8.8	8.4
12	9.3	8.8
15	9.8	9.1

El incremento relativo fue de:

- **30.67% para el control**.
- **21.33% para la pectina al 2%**.

La menor variación observada en el tratamiento recubierto indica una mayor estabilidad de los sólidos solubles durante el almacenamiento.

Figura 3. Evolución de los sólidos solubles (°Brix) de fresas control y recubiertas con pectina al 2% durante 15 días de almacenamiento refrigerado.



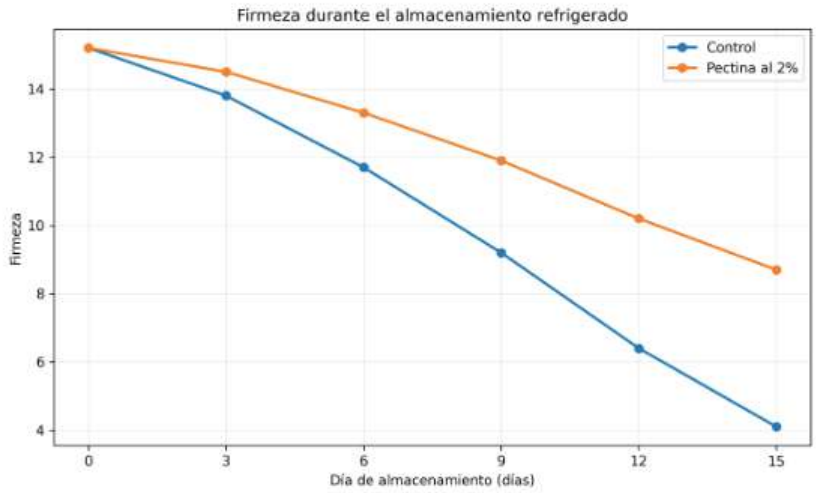
Los sólidos solubles aumentaron durante el almacenamiento. El control pasó de 7.5 a 9.8 °Brix y el tratamiento con pectina de 7.5 a 9.1 °Brix.

4- Firmeza

Cuadro 5. Variación de la firmeza de fresas durante el almacenamiento refrigerado.

Día	Control	Pectina al 2%
0	15.2	15.2
3	13.8	14.5
6	11.7	13.3
9	9.2	11.9
12	6.4	10.2
15	4.1	8.7

Figura 4. Evolución de la firmeza de fresas control y recubiertas con pectina al 2% durante 15 días de almacenamiento refrigerado.



La firmeza disminuyó progresivamente en ambos tratamientos. Al día 15, el control presentó 4.1 y el tratamiento con pectina 8.7, conservando este último un valor superior.

La pérdida relativa de firmeza fue:

Control:

$$\frac{(15.2-4.1)}{(15.2)}x100 = 73.03\%$$

Pectina:

$$\frac{(15.2-8.7)}{(15.2)}x100 = 42.76\%$$

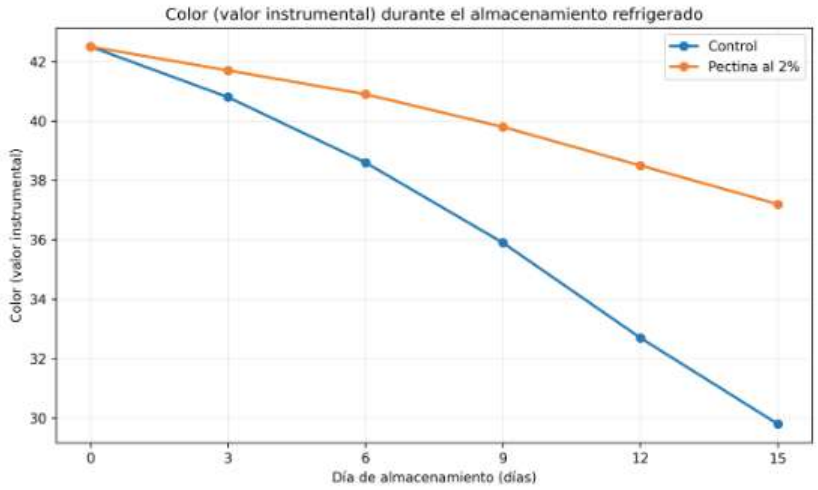
Por lo tanto, las fresas recubiertas presentaron una menor pérdida de firmeza durante el almacenamiento, lo que indica una mejor conservación de esta característica física.

5-Color

Cuadro 6. Variación del valor instrumental de color de las fresas durante el almacenamiento.

Día	Control	Pectina al 2%
0	42.5	42.5
3	40.8	41.7
6	38.6	40.9
9	35.9	39.8
12	32.7	38.5
15	29.8	37.2

Figura 5. Evolución del valor instrumental de color de fresas control y recubiertas con pectina al 2% durante 15 días de almacenamiento refrigerado.



El valor instrumental de color disminuyó durante el almacenamiento. El control pasó de 42.5 a 29.8, mientras que el tratamiento con pectina pasó de 42.5 a 37.2.

La disminución fue mayor en el control, mientras que las fresas recubiertas conservaron valores más cercanos al inicial.

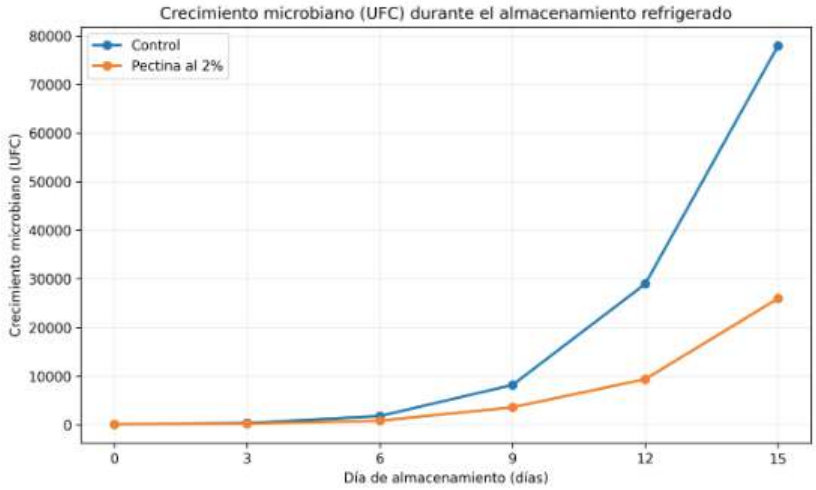
Debido a que el documento no especifica qué parámetro instrumental representa este valor, **no se debe atribuir el cambio específicamente a luminosidad, cromaticidad o tono** hasta confirmar el método utilizado.

6-Conteo de UFC

Cuadro 7. Crecimiento microbiano de fresas durante el almacenamiento refrigerado.

Día	Control	Pectina al 2%
0	1.0×10^2	1.0×10^2
3	3.5×10^2	2.2×10^2
6	1.8×10^3	8.5×10^2
9	8.2×10^3	3.6×10^3
12	2.9×10^4	9.4×10^3
15	7.8×10^4	2.6×10^4

Figura 6. Evolución del crecimiento microbiano de fresas control y recubiertas con pectina al 2% durante 15 días de almacenamiento refrigerado.



El crecimiento microbiano aumentó progresivamente en ambos tratamientos. Al día 15, el control presentó 7.8×10^4 UFC y el tratamiento con pectina 2.6×10^4 UFC.

La reducción relativa fue:

$$\frac{(7.8\times10^4-2.6\times104)}{(7.8\times10^4)}x100 = 66.67\%$$

El tratamiento con pectina presentó un menor conteo microbiano al final del periodo evaluado. Por lo tanto, al final del almacenamiento, el tratamiento con pectina presentó aproximadamente **66.7% menos UFC que el control**.

Este resultado es consistente con un efecto favorable del recubrimiento sobre el desarrollo microbiano superficial, aunque para afirmar un efecto antimicrobiano específico sería necesario contar con el análisis estadístico y la descripción completa del método microbiológico.

7- Incidencia de deterioro (% frutos con moho)

Cuadro 8. Incidencia de deterioro visible en fresas durante el almacenamiento refrigerado.

Día	Control	Pectina al 2%
0	0.0	0.0
3	2.6 %	1.4 %
6	5.5 %	3.1 %
9	9.3 %	5.2 %
12	11.7 %	7.2 %
15	15.4 %	9.4 %

Unidad: % de frutos con signos visibles de deterioro.

La incidencia de deterioro se expresó como el porcentaje de frutos que presentaron signos visibles de deterioro durante cada periodo de evaluación.

8-Vida útil

Cuadro 9. Vida útil de fresas control y recubiertas con pectina al 2% bajo almacenamiento refrigerado.

Día	Control	Pectina al 2%
0	250g	250g
3	243g	246.25g
6	235.75g	242g
9	227.25g	237.50g
12	218g	232.25g
15	208.75g	226.75g

La vida útil se determinó como el número de días transcurridos hasta que las muestras alcanzaron el criterio de rechazo establecido previamente para el estudio.

Pérdida
250 – 208.75g = 41.25g

250 – 226.75g = 23.25g

Reducción
16.5 – 9.3g = 7.2g

$\frac{(41.25g)}{(250g)}x100 = 16.5\%$ $\frac{(23.25g)}{(250g)}x100 = 9.3\%$ $\frac{(7.2g)}{(16.5g)}x100 = 43.6\%$

El recubrimiento de pectina redujo la pérdida de peso en aproximadamente 43.6% respecto a las muestras control.

Incremento de la vida útil

$\frac{(15-9)}{(9)}x100 = 66.7\%$

Sabiendo que la muestra control dura 9 días y el tratamiento 15 días se puede analizar que el tratamiento incrementa la vida útil en un 66.7%.

Una muestra se considerará fuera de vida útil cuando presente deterioro visible que comprometa su aceptación, particularmente presencia de moho, pudrición o pérdida severa de firmeza.

Conclusiones

El recubrimiento comestible a base de pectina al 2% mostró un comportamiento favorable para la conservación de fresas durante el almacenamiento refrigerado de 15 días.

Las fresas recubiertas presentaron menores pérdidas de peso y una mayor conservación de la firmeza respecto al tratamiento control, además de una menor variación de pH y sólidos solubles durante el periodo de evaluación.

El tratamiento con pectina también presentó menores conteos de unidades formadoras de colonias al final del almacenamiento, lo que indica un menor crecimiento microbiano observado respecto al control.

De acuerdo con los resultados descriptivos obtenidos, el recubrimiento de pectina al 2% presentó potencial para contribuir a la conservación de las características de calidad de las fresas y al incremento de su vida útil.

Literatura Citada

Ansarifar, E., Mohebbi, M., & Shahidi, F. (2021). Effect of edible coatings on the shelf-life of fresh strawberries: A comparative study using TOPSIS-Shannon entropy method. *Nutrition and Food Sciences Research*. https://doi.org/10.1016/j.nfs.2021.02.003

Evaluation of the effectivity of reuterin in pectin edible coatings to extend the shelf-life of strawberries during cold storage. (2021). *Food Packaging and Shelf Life, 30*, 100760. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100760

Górecka, K., et al. (2025). The effect of a pectin coating with gamma-decalactone on selected quality attributes of strawberries during refrigerated storage. *Coatings, 15*(8), 903. https://doi.org/10.3390/coatings15080903

Treviño-Garza, M. Z., García, S., Flores-González, M. del S., & Arévalo-Niño, K. (2015). Edible active coatings based on pectin, pullulan, and chitosan increase quality and shelf life of strawberries (*Fragaria ananassa*). *Journal of Food Science, 80*(8), M1823–M1830. https://doi.org/10.1111/1750-3841.12938

Zantar, Y., et al. (2026). The combined effect of bioactive coating with pectin and *Cymbopogon citratus* essential oil and modified atmosphere on strawberry quality. *Journal of Food Science*.

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Diagrama de Flujo Computacional para Inteligencia Artificial en Trigo

Arturo Chong Eslava[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

Para desarrollar una aplicación que de recomendaciones a productores de cuándo realizar las actividades en el proceso de producción de trigo, a partir de la fecha de siembra, se requiere desarrollar un diagrama de flujo que considere la acumulación de los grados calor diarios (GCD), con los que la planta controla su desarrollo, una vez iniciada la germinación. Este diagrama de flujo debe contemplar la acumulación GCD, o su suma diaria a partir de la siembra, ya que en ciertas cantidades de acumulación ocurren cambios o eventos fenológicos de la planta en su desarrollo que, dependiendo de la variedad y localidad, se presentan de manera consistente, dependientes de esa acumulación. Una vez hecha la siembra, iniciada la germinación, se puede establecer con cierta exactitud la ocurrencia de la emergencia, la aparición de los macollos, la diferenciación floral, la floración, madurez. El objetivo es proponer un diagrama de flujo para utilizar en los algoritmos de una aplicación computacional del trigo. Una aplicación de crecimiento y desarrollo de trigo debe utilizar la acumulación de los GCD, para dar recomendaciones para productores de este cultivo.

Palabras clave: diagrama de flujo, aplicación computacional, trigo, grados-calor diarios

Abstract

In order to develop an application that would produce agriculture recommendations on when to do some activities of the production process of wheat once sown has happened, and it can be used by farmers or technicians, is required to develop a flow chart that uses the accumulation of growing-degree-days (GDD) that controls plant development. This flow chart must use accumulation of GDD, its daily sum from sowing date, because at given accumulation GDD, phenological plant phenomena happen in wheat development, that depending on the location and variety, they occur consistently. Once wheat sown happens, development phases can be predicted when emergence, tillering, flower initiation, flowering and maturation are going to occur. The objective is to propose a flow chart that can be used by computer algorithms for wheat growth. A growth application must use accumulation growing degree days for technical recommendations given to wheat growers.

Key words: flow chart, computer application, wheat, growing degree days

Introducción

La agricultura moderna, la producción de trigo, ha adaptado los aspectos del conocimiento científico del crecimiento y desarrollo de las plantas del último siglo y medio, lo que ha redundado en los espectaculares incrementos del rendimiento, de 3.6 t/ha de grano de trigo a nivel mundial en 2024 (FaoStat, 2026.), aunque países desarrollados como Alemania, ha logrado rendimientos de 9.3 t/ha.

[1]Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. achonge@chapingo.mx

La tendencia actual es adaptar ese conocimiento en el uso de las herramientas digitales computadoras, celulares, tabletas, las bases de datos, los programas, las aplicaciones, etc., para instrumentalizar ese conocimiento en el crecimiento y desarrollo de cultivos, el trigo, para que los, productores, técnicos, etc. Puedan acceder a ese conocimiento a través de recomendaciones técnicas, en una aplicación o plataforma, de acuerdo a las condiciones de crecimientos en sus localidades productivas respectivas, como una herramienta que complemente sus experiencias productivas, que además invite a transformar sus procesos productivos hacia mayor eficiencia productiva, considerando la sostenibilidad de su parcela y la protección ambiental. Por lo que el objetivo del presente trabajo es proponer la utilización del desarrollo o etapas de desarrollo del trigo, expresada en la acumulación de grados calor diarios, para determinar el momento de realización de las actividades agrícolas en el proceso de producción agrícola, por medio de diagramas de flujo.

Las plantas crecen y desarrollan en íntimo contacto con el ambiente, donde este cambia por principalmente el movimiento de la Tierra alrededor del sol, año tras año. Cambia principalmente la temperatura del aire y la duración de la luz en cada localidad, en ciclos que se repiten, señales que la planta ha adaptado para regular su desarrollo, señalando cuando las condiciones ambientales, temperaturas, luz solar y precipitación, son apropiadas para crecer e incluso para decaer. Prajapat *et al*. (2022) mencionan que las plantas controlan su desarrollo por su respuesta a la acumulación de los grados calor diarios (GCD), dentro de cierto rango de temperaturas mínima y máxima. Los grados calor se calculan por la suma diaria de la temperatura media diaria menos la temperatura base (Tb),

Para trigo la Tb es de 0.0 ºC, mientras que hasta la diferenciación floral la temperatura máxima es de 21 ºC y después es de 32 ºC. Hasta la aparición de macollos se han acumulado 538 GCD, en la 5ta hoja desplegada o diferenciación floral se han acumulado 824 GCD, para floración la acumulación es de 1739 GCD y para madurez comercial se han acumulado 2153 GCD (NDAWN, 2026). Prajapat, e*t al*. (2022) determinaron entre 1558 y 1797 GCD para cinco variedades de trigo.

También, responden a la duración de la luz solar, plantas de día largo o plantas de día corto para la ocurrencia de la iniciación floral. El trigo es una planta de día largo, requiriendo días largos para alcanzar la iniciación floral (Dubcovsky, 2016).

El proceso de producción agrícola es la serie de actividades que en general transforman la materia prima principal, el propágulo o semilla de trigo, en nuestro caso, y los insumos, en granos que se venderán en los mercados, para su posterior transformación por las industrias y su consumo. La ocurrencia de estas actividades puede predecirse usando la acumulación de GCD, utilizando diagrama de flujo para calcular la acumulación

Materiales y Métodos

Se propone diseñar un diagrama de flujo, que puede utilizarse en las modernas aplicaciones computacionales, para predecir la ocurrencia de las etapas de desarrollo, por medio de la acumulación de los grados calor diarios, Ecuación 1.

$$GCD = \frac{Tmáx - Tmín}{2} - Tb \quad (1)$$

Donde,

Tmáx es la temperatura máxima del día, a partir de la siembra

Tmin, es la temperatura mínima del día, a partir de la siembra

Tb, es la temperatura base del trigo, igual a 0 ºC

La acumulación de los grados calor es la suma diaria, mayor a la temperatura base, desde la siembra hasta madurez.

Se utilizará los GCD acumulados para predecir los momentos de iniciación foliar, floración, madurez del trigo, etc., momentos en los cuales las actividades agrícolas de fertilización, riegos, cosecha, etc., probablemente ocurrirán. Lo que ayudará a los productores a planear su proceso de producción del trigo, de acuerdo al Cuadro 1.

Cuadro 1. Acumulación de grados calor diarios, las etapas de desarrollo y actividades agrícolas relacionadas del trigo.

Etapa de desarrollo	Grados calor diarios acumulados GCD	Actividad agrícola
Siembra	0	Riego de siembra
Aparición de macollos	538	Riego Aplicación de herbicida
Diferenciación floral	824	Riego Aplicación de fertilizantes
Floración	1,739	Riego
Grano lechoso	1,825	Riego
Grano seco	2,153	Cosecha

Resultados y Discusión

En la Figura 1, se presenta el diagrama de flujo propuesto para el cálculo de los GCD, requeridos para alcanzar los GCD para cada una de las etapas de desarrollo, para predecir la ocurrencia de cada una de ellas. Esto ayudará a los productores a planear sus actividades agrícolas de fertilización, riegos, aplicación de herbicidas, etc., lo que le permitirá eficientizar su tiempo. Este mismo diagrama de flujo se puede incorporar en los algoritmos de un programa computacional o una aplicación de tableta o celular, para facilidad de uso por los técnicos o productores.

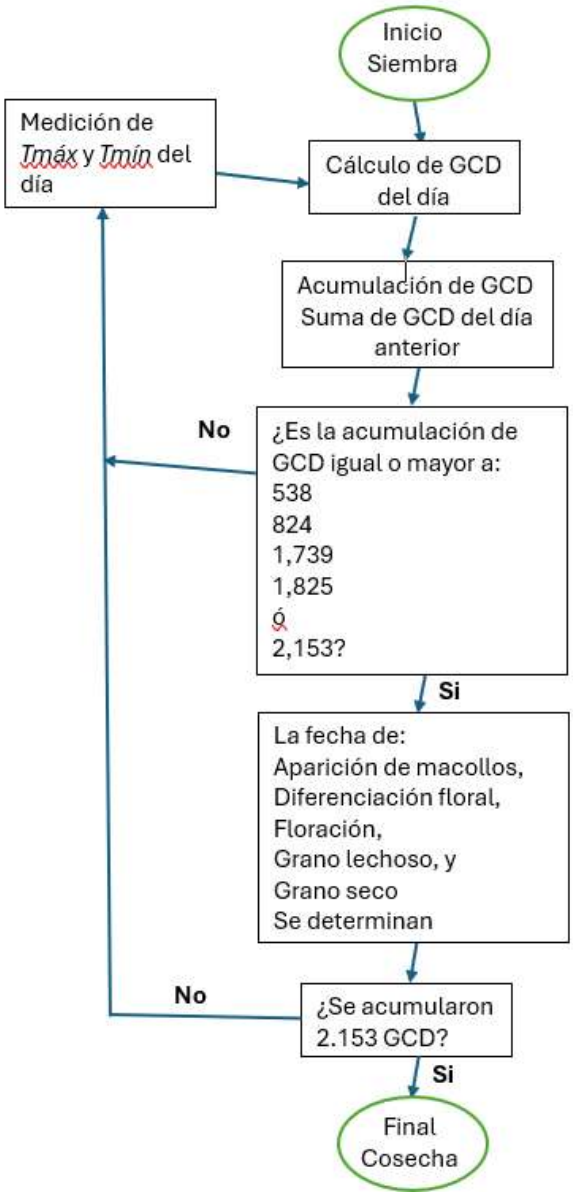


Figura 1. Diagrama de flujo del cálculo de los grados calor diarios (GCD) del trigo, para determinar la ocurrencia de fechas de las etapas de desarrollo, y las actividades del proceso de producción.

Conclusiones

La acumulación de grados calor diarios es la forma como las plantas, trigo, controlan su desarrollo. Este fenómeno puede usarse en aplicaciones computacionales para predecir cuando las etapas de desarrollo ocurrirán, para que los productores hagan las actividades de producción requeridas. Es necesario desarrollar un diagrama de flujo que los algoritmos puedan usar para calcular los grados calor diarios acumulados.

Wheat plants use accumulative growing degree days to control its development. This phenomenon can be used in computer applications to predict when development phases are going to occur, and farmers can do the process production activities needed. It is necessary to

develop a computer flow chart that algorithms can use for calculating accumulative growing degree days.

Literatura Citada

Dubcovsky J., A. Loukoianov, D. Fu, M. Valarik, A. Sanchez and L. Yan. 2016. Effect of photoperiod on the regulation of wheat vernalization genes *VRN1* and *VRN2*. Plant Mol. Biol. 2006, 60(4): 469-480.

North Dakota Agricultural Weather Network. 2026. Wheat growth stage prediction using growing degree days. North Dakota State University. Agriculture. https://ndawn.ndsu.nodak.edu/.

Prajapat A. L., R. Saxena, M. Sharma, R. L. Mandeewal, B. Lal and B. Didal. 2022. Growing degree days requirement and yied of wheat cultivars as influenced by irrigation scheduling and time of sowing. International Journal of Plant & Soil Science. 34(3): 28-35. ISSN: 2320-7035.

15° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas
15 y 16 de octubre de 2026
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México

Modelado matemático del crecimiento de lechuga en una minifábrica de plantas

Cecilia Jerónimo Cruz[1], Agustín Ruiz García[1], José Olaf Valencia Islas[1], José Armando Ramírez Arias[1]

Mesa 1. Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible

Resumen

El modelado dinámico del crecimiento vegetal y la absorción de nutrientes en sistemas hidropónicos es fundamental para optimizar el manejo microclimático y nutricional en la agricultura protegida. En este estudio se adaptó y calibró un modelo mecanicista de tres estados para la acumulación de biomasa seca total (w) en cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) en dos tratamientos de iluminación LED, luz blanca (T1) y luz blanca pro (T2). Se realizó un experimento con lechuga tipo mantequilla en una minifábrica de plantas con iluminación LED y sistema hidropónico tipo NFT. Periódicamente se realizaron muestreos destructivos para medir la biomasa fresca, biomasa seca, área foliar total y área proyectada del dosel. Mediante el procesamiento digital de imágenes se determinó el área proyectada del dosel (A) y el índice de área foliar (LAI). La calibración de modelo se realizó con el método de mínimos cuadrados no lineales, minimizando el error entre la biomasa medida y la simulada. Los parámetros calibrados fueron la tasa inicial máxima de absorción de nitrógeno ($J_{max,0}$) y el coeficiente de decaimiento (α) se realizó mediante el algoritmo de mínimos cuadrados no lineales. Los valores estimados de $J_{max,0}$ fueron similares en los dos tratamientos de luz y similares al valor nominal, mientras que los valores de α fueron muy diferentes entre tratamientos y de su valor nominal. De acuerdo con los índices estadísticos RMSE y EF, el modelo calibrado simulo de manera satisfactoria la dinámica de acumulación de biomasa para lechuga cultivada bajo los dos tratamientos de iluminación LED.

Palabras clave: *Lactuca sativa L.*, biomasa, calibración, hidroponía, iluminación LED.

Abstract

Dynamic modeling of plant growth and nutrient uptake in hydroponic systems is essential for optimizing microclimatic and nutritional management in protected agriculture. In this study, a three-state mechanistic model for total dry biomass (w) accumulation was adapted and calibrated for a lettuce (Lactuca sativa L.) crop under two LED lighting treatments: white light (T1) and white light pro (T2). An experiment was conducted with butterhead lettuce in a mini-plant factory equipped with LED lighting and an NFT-type hydroponic system. Destructive sampling was performed periodically to measure fresh biomass, dry biomass, total leaf area, and projected canopy area. Digital image processing was used to determine the projected canopy area (A) and the leaf area index (LAI). Model calibration was performed using the nonlinear least squares method, minimizing the error between measured and simulated biomass. The calibrated parameters were the maximum initial nitrogen uptake rate (J_(max,0)) and the decay coefficient (α), which were determined using the nonlinear least squares algorithm.

[1]Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO. al24520775@chapingo.mx; aruizg@chapingo.mx; jvalenciai@chapingo.mx; jramirezr@chapingo.mx

The estimated values of J_(max,0) were similar across the two light treatments and close to the nominal value, while the values of α differed significantly between treatments and from their nominal value. Based on the RMSE and EF statistical indices, the calibrated model satisfactorily simulated the dynamics of biomass accumulation for lettuce grown under the two LED lighting treatment.

Keywords: Lactuca sativa L., biomass, calibration, hydroponics, LED lighting.

Introducción

La Agricultura en Ambiente Controlado (CEA) y, en particular, las Fábricas de Plantas con Iluminación Artificial (PFAL) o granjas verticales, representan una de las innovaciones tecnológicas más avanzadas para la producción agrícola sostenible (Kozai et al., 2016). Estos sistemas cerrados y sin suelo permiten independizar la producción de las condiciones climáticas externas, minimizando la vulnerabilidad ambiental para producir alimentos locales frescos y libres de pesticidas. Además, este modelo optimiza sustancialmente el uso de recursos al aprovechar el espacio tridimensional y reducir el consumo de agua hasta en un 95 % en comparación con la agricultura convencional (Pérez & Morales, 2021). En estas instalaciones, la tecnología de iluminación mediante diodos emisores de luz (LED) se erige como la fuente principal de energía radiante para la actividad fotosintética, permitiendo modular la intensidad, el fotoperiodo y el espectro lumínico (Pérez & Morales, 2021). Sin embargo, las PFALs conllevan elevados costos de inversión inicial y de operación energética, derivados principalmente del consumo eléctrico continuo de las luminarias y del control microclimático (Graamans et al., 2018).

En este contexto, los modelos matemáticos de cultivos basados en procesos han demostrado ser herramientas fundamentales para explorar e interpretar las complejas interacciones entre el crecimiento vegetal, la dinámica del agua y la absorción de nutrientes bajo diversas condiciones ambientales y de manejo (Patiño, 2022). Su implementación en las fábricas de plantas permite predecir el rendimiento biológico, optimizar las estrategias de iluminación y clima, y reducir sensiblemente la necesidad de ensayos experimentales costosos y destructivos (Van Straten et al., 2010).

Los modelos de crecimiento agrícola han evolucionado a lo largo del tiempo, desde aproximaciones empíricas basadas en regresiones estadísticas hacia modelos dinámicos de carácter mecanicista (Marcelis et al., 1998). A diferencia de las funciones empíricas, los modelos mecanicistas se fundamentan en principios físicos, químicos y fisiológicos de conservación de materia y energía. Estos modelos emplean variables de estado para simular procesos fisiológicos clave como la fotosíntesis del dosel, la respiración de mantenimiento y crecimiento, la transpiración y la partición de fotoasimilados a través del tiempo (Jones et al., 2003). En los sistemas CEA, los modelos mecanicistas ofrecen una ventaja decisiva al poseer mayor capacidad de generalización, permitiendo la simulación del comportamiento vegetal ante escenarios microclimáticos que aún no se han experimentado (Marcelis et al., 1998; Van Straten et al., 2010).

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una de las hortalizas que más se ha estudiado en las PFALs debido a su corto ciclo fenológico, arquitectura compacta y elevado valor comercial (Kozai et al., 2016). Diversos autores han desarrollado modelos dinámicos para describir su desarrollo en ambientes protegidos (Zhang et al., 2008). Entre los modelos mecanicistas más robustos destaca el modelo dinámico de tres compartimentos propuesto originalmente por Sweeney et al. (1981) y adaptado por Van Henten (1994) y Zhang et al. (2008). En estos modelos, la biomasa seca se divide en dos reservorios: la biomasa no estructural y la biomasa estructural, permitiendo

simular la tasa fotosintética bruta, la conversión de fotoasimilados y la absorción de nitrógeno en función de las variables ambientales.

Sin embargo, aunque el modelo de Zhang et al. (2008) fue desarrollado originalmente para condiciones de invernadero, su adaptación y parametrización para hortalizas de hoja bajo iluminación LED artificial en ambientes cerrados representa un desafío significativo debido a la alta sensibilidad fisiológica a la calidad espectral. Pese a que los modelos mecanicistas se rigen por ecuaciones fisiológicas de valor general, la mayoría de sus parámetros nominales derivan de la literatura bajo condiciones microclimáticas y cultivares específicos (Wallach et al., 2014). La extrapolación directa de estos parámetros suele generar desvíos significativos en las predicciones. Por lo tanto, la calibración precisa del modelo constituye una etapa crítica e imprescindible para garantizar predicciones confiables que favorezcan la automatización y la optimización de los insumos en las PFALs.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue adaptar y calibrar el modelo mecanicista de crecimiento de tres compartimentos de Zhang et al. (2008) para simular la acumulación de biomasa seca en lechuga tipo mantequilla, en respuesta a dos espectros de luz LED en un sistema mini-PFAL.

Materiales y Métodos

Ubicación y descripción del sistema mini-PFAL

Los experimentos se llevaron a cabo del 07 al 20 de abril de 2026 un sistema de fábrica de plantas con iluminación artificial tipo mini-PFAL, ubicada en la Universidad Autónoma Chapingo.El sistema consistió en una estructura metálica modular de tres niveles de producción (1.22 m de longitud, 1.00 m de ancho y 0.35 m de altura entre niveles). Para la producción vegetal, se implementó un sistema hidropónico tipo NFT (*Nutrient Film Technique*) conformado por tubos de PVC de $3''$ de diámetro con perforaciones de $2''$ espacialmente distanciadas a 12.5 cm. Cada nivel albergó siete tubos de PVC. El riego se llevó a cabo mediante un reservorio de 100 L y una bomba recirculante SML-4000 de 100 W operada de forma intermitente (20 min de riego por cada 20 min sin riego) para garantizar el suministro continuo de nutrientes y la oxigenación radicular.

En este estudio se utilizaron 100 plantas de lechuga tipo mantequilla (var. Francesa Mantequilla Vde) germinadas en espuma fenólica. Durante los primeros 15 días posteriores a la germinación, se aplicó únicamente agua para favorecer el establecimiento del sistema radicular, seguido del suministro de una solución nutritiva específica para lechuga diluida al 50% hasta el trasplante. Las plántulas se trasplantaron al mini-PFAL bajo un arreglo en tresbolillo (dejando un tubo y una perforación libre), estableciendo una densidad de 25 plantas por nivel para optimizar el espacio y la intercepción de la radiación. Las plantas sobrantes se destinaron al muestreo destructivo inicial.

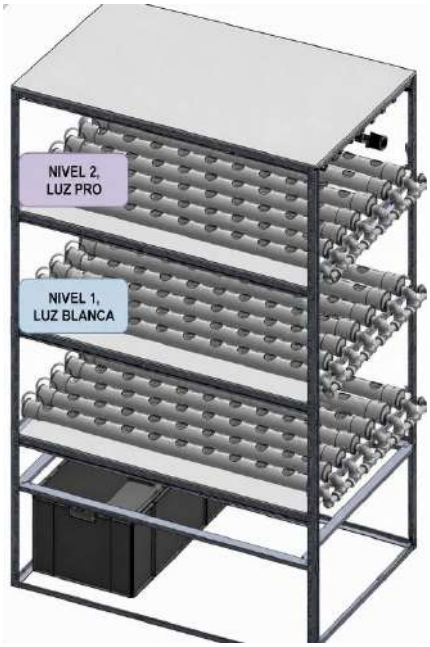


Figura 3. Esquema donde se observa la distribución de sus componentes de la mini-PFAL utilizada en los experimentos.

Se evaluó el efecto de dos tratamientos de iluminación LED sobre la acumulación de biomasa del cultivo con un fotoperiodo constante de 14 h luz / 10 h oscuridad. Los tratamientos fueron: luz blanca (Tratamiento 1) suministrada por 8 barras LED T8 Active Grow Sun White Spectrum (Active Grow, EE. UU.), y luz blanca Pro (Tratamiento 2) suministrada por 8 barras LED T8 Active Grow Sun White Pro Spectrum (Active Grow, EE. UU.). En ambos tratamientos la longitud de las lámparas fue de 1.20 m. Las luminarias se espaciaron a 12.5 cm entre sí. La intensidad de radiación fotosintéticamente activa (PAR) fue de 193.43 y 198.86 μmol m^{-2} s^{-1} para el tratamiento 1 y 2, respectivamente; determinadas con un medidor cuántico MQ-610 (Apogee Instruments, EE. UU.).

Obtención de datos

Para evaluar la dinámica de crecimiento y el desarrollo fisiológico de la lechuga, se realizaron seis muestreos destructivos de tres plantas por nivel del sistema mini-PFAL, los días 07, 10, 13, 16, 18 y 20 de abril de 2026. El peso fresco total de la planta (g), el peso fresco del tallo (g) y el peso fresco de la raíz (g) se midió con una balanza analítica digital. En el sistema radicular, se midió la longitud (cm), el ancho (cm) y el volumen de agua desplazado (mL) mediante el método de volumetría por inmersión. Posteriormente, para la determinación de la biomasa seca estructural y total (g), los órganos vegetales se clasificaron por separado y se sometieron a secado en una estufa de convección forzada a 65 °C durante 72 h, hasta alcanzar peso constante. La estimación del área foliar total (LA, m^2) y del índice de área foliar (LAI) se realizó mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes. Las fotografías fueron capturadas con un dispositivo móvil de alta resolución (iPhone 16 Pro), montado perpendicularmente sobre un tripié a una distancia focal fija de 1.0 m respecto al plano de muestreo. Para cada planta seleccionada, se registraron dos perspectivas: vista cenital de la planta completa para la estimación del área de cobertura (A), y vista individualizada de las hojas separadas sobre un fondo de contraste calibrado.

Las imágenes se almacenaron en formato JPEG con una resolución espacial de 2048 x 1536 píxeles. Cuando se requirió, las imágenes fueron acondicionadas mediante edición digital previa para corregir artefactos de fondo. Posteriormente, la segmentación y cuantificación del área foliar se realizó mediante el software de código abierto ImageJ (National Institutes of Health, EE. UU.). La escala espacial se calibró individualmente para cada toma utilizando una referencia métrica conocida, obteniendo así el área foliar unitaria por hoja, el área foliar total por planta y el LAI correspondiente para su posterior integración en el modelo matemático del cultivo.

Descripción del modelo matemático

Para la simulación del crecimiento de lechuga se adaptó el modelo dinámico mecanicista de tres compartimentos propuesto por Zhang et al. (2008). El modelo integra tres submodelos acoplados mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO). El peso seco total de la parte aérea (w, en g) se divide en dos compartimentos de biomasa: biomasa no estructural (w_S, en g), correspondiente a los carbohidratos solubles disponibles, y biomasa estructural (w_G, en g), referente a la materia fija de paredes y tejidos.

La tasa de síntesis de biomasa estructural ($\frac{dw_G}{dt}$) se describe con la siguiente ecuación:

$$\frac{dw_G}{dt} = \mu_{max}\left(\frac{w_S}{w_S+w_G}\right) c_{q10,\mu}^{(T-20)/10}\, w_G \tag{1}$$

donde μ_{max} es la tasa de crecimiento máximo a saturación a 20 °C (h^{-1}), $c_{q10,\mu}$ es el coeficiente térmico Q_{10} para la conversión de biomasa, T es la temperatura media del aire (°C).

Por su parte, el balance de masa en el compartimiento de biomasa no estructural ($\frac{dw_S}{dt}$) es la diferencia entre la entrada por fotosíntesis bruta (P_g) y el consumo invertido en la formación de biomasa estructural:

$$\frac{dw_S}{dt} = \theta P_g - \frac{1}{Y_G}\frac{dw_G}{dt} \tag{2}$$

donde θ es el factor de conversión estequiométrica de CO_2 a materia seca (g DM $g^{-1}CO_2$), P_g es la tasa de fotosíntesis bruta del dosel [$g(CO_2)\, h^{-1}$], Y_G es la eficiencia de conversión de carbohidratos no estructurales a biomasa estructural (g g^{-1}). La biomasa seca total acumulada (w) en cada paso de tiempo t se obtuvo mediante $w = w_G + w_S$.

La entrada de carbono al sistema mediante la fotosíntesis bruta del dosel (P_g) se calculó considerando la intercepción de luz por el dosel, la concentración de CO_2, la conductancia foliar y la influencia del estado nutricional de nitrógeno en la planta:

$$P_g = A\,(1 - e^{-k\cdot LAI})\, f(N_{up})\, \frac{\xi\, I\,(\sigma C_{CO_2} - \beta)}{\xi\, I + \sigma C_{CO_2}} \tag{3}$$

donde A es el área proyectada del dosel (m^2), k es el coeficiente de extinción de luz del dosel, LAI es el índice de área foliar (m^2 hoja m^{-2} suelo), $f(N_{up})$ es un factor adimensional de modulación fotosintética por contenido relativo de nitrógeno, ξ es la eficiencia en el uso de la

luz (g CO_2 J^{-1}), I es la radiación fotosintéticamente activa incidente (PAR) (J m^{-2} h^{-1}), σ: es la conductancia foliar al CO_2 (m h^{-1}), C_{CO_2} es la concentración ambiental de CO_2 (g m^{-3}), y β es el punto de compensación de CO_2 (g m^{-3}).

La tasa instantánea de absorción de nitrógeno $\left(\frac{dN_{up}}{dt}\right)$ se modela mediante cinética de Michaelis-Menten modificada por la biomasa seca acumulada:

$$\frac{dN_{up}}{dt} = J_{max}\left(\frac{c_N\, w}{c_N + K}\right) \tag{4}$$

donde N_{up} es la cantidad acumulada de nitrógeno en la biomasa aérea (mmol), c_N es la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva (mM), K es la constante de semisaturación para la absorción de nitrógeno (mM), J_{max} es la tasa máxima de absorción por unidad de peso seco (mmol h^{-1} g^{-1}DM), la cual disminuye exponencialmente con el incremento de w de acuerdo con:

$$J_{max} = J_{max,0}\, e^{-\alpha w} \tag{5}$$

donde $J_{max,0}$ es la tasa máxima inicial de absorción (mmol h^{-1} g^{-1}DM) y α es el coeficiente de reducción de la absorción por efecto del tamaño de la planta (g^{-1}DM).

El efecto de la concentración interna de nitrógeno sobre la capacidad fotosintética se describe mediante la relación entre el nitrógeno absorbido y la biomasa seca (N_{up}/w, expresado en mmol · g^{-1}DM equivalente a contenido porcentual de N):

$$f(N_{up}) = \begin{cases} 0 & \text{si } (N_{up}/w) < 0.02 \\ \frac{1}{3}\left(\frac{N_{up}}{w} - 0.02\right) \times 100 & \text{si } 0.02 \le (N_{up}/w) \le 0.05 \\ 1 & \text{si } (N_{up}/w) > 0.05 \end{cases} \tag{6}$$

Cuadro 1. Parámetros nominales empleados en el modelo dinámico de crecimiento de lechuga (Zhang et al., 2008).

Parámetro	Unidad	Valor nominal
c_N	mM	12.0
$J_{max,0}$	mmol · h^{-1} · g^{-1}DM	0.035
α	g^{-1}DM	0.155
K	mM	0.02
μ_{max}	h^{-1}	0.01
θ	g DM · $g^{-1}CO_2$	0.68
Y_G	g · g^{-1}	0.80
$c_{q10,\mu}$	Adimensional	1.60
ξ	g CO_2 · J^{-1}	14×10^{-6}
β	g · m^{-3}	0.36
σ	m · h^{-1}	7.20
k	Adimensional	0.90

El modelo fue implementando como una función en MATLAB. Para la ejecución del modelo, los valores nominales de los parámetros se adoptaron del trabajo original de Zhang et al. (2008) (Cuadro 1). Por otro lado, los parámetros cinéticos de absorción de nitrógeno ($J_{max,0}$, α y K) fueron calibrados para los dos tratamientos de luz.
Para calcular la fotosíntesis el modelo requiere el área proyectada de la planta y el índice de área foliar. Sin embargo, el modelo no incluye submodelos para estas dos variables. Por lo anterior, se ajustaron modelos de regresión entre el peso seco del dosel (w) y el área proyectada del dosel (A), y entre el peso seco del dosel (w) y el índice de área foliar (LAI). Estas funciones permitirán estimar A y LAI a partir del peso seco simulado (Cuadro 2).

Calibración del modelo

El sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODEs) del modelo se resolvió numéricamente en el entorno MATLAB, con el método de Runge-Kuta de cuarto orden de tamaño de paso variable (ode45). Para mejorar la capacidad predictiva de biomasa seca (W) por el modelo, se calibraron los parámetros α y J_{max0} para ambos tratamientos de iluminación (T1 y T2).
La calibración se realizó con el algoritmo de mínimos cuadrados no lineales (lsqcurvefit), minimizando la suma de errores al cuadrado entre la biomasa seca simulada y la biomasa seca medida. La calidad del ajuste del modelo se determinó con el error cuadrático medio ($RMSE$) y la eficiencia del modelo (Nash-Sutcliffe).

Resultados y discusión

Modelos para área proyectada e índice de área foliar

En el Cuadro 2 se muestra la relación matemática obtenida entre el área proyectada y el peso seco, y entre el índice de área foliar y el peso seco, para los dos tratamientos de luz. Los elevados coeficientes de determinación obtenidos ($R^2 > 0.92$ en todos los casos) confirman que el procesamiento digital de imágenes asistido por ImageJ es una metodología no destructiva altamente precisa para estimar el área foliar de lechuga cultivadas en la mini-PFAL.

Cuadro 2. Modelos de regresión lineal para estimar el área proyectada (A, m^2) y del índice de área foliar (LAI) a partir del peso seco del dosel (w, g) en los dos tratamientos de luz.

Tratamiento	Relación evaluada	Modelo ajustado	Coeficiente de determinación (R^2)
Luz blanca (T1)	Peso seco vs área proyectada (w vs. A)	$A = 0.0096w$	0.97
	Peso seco vs índice de área foliar (w vs. LAI)	$LAI = 0.7529w$	0.93
Luz blanca pro (T2)	Peso seco vs área proyectada (w vs. A)	$A = 0.0111w$	0.95

Tratamiento	Relación evaluada	Modelo ajustado	Coeficiente de determinación (R^2)
	Peso seco vs índice de área foliar (w vs. LAI)	$LAI = 0.8776w$	0.94

La pendiente de las curvas de regresión entre la biomasa y el área proyectada fue mayor en el tratamiento T2 (luz blanca pro). Para las curvas de regresión entre la biomasa y el índice de área foliar, también se observa una mayor pendiente en el tratamiento T2 con respecto al tratamiento T1 (luz blanca). Esta diferencia en la pendiente sugiere una mayor compactación de tejidos foliares o un desarrollo más denso de la lámina foliar bajo las condiciones microclimáticas o de radiación prevalecientes en el tratamiento T2 (luz blanca pro).

Los mapas de densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) a una altura de 5 cm con respecto a la planta mostraron una distribución espacial relativamente uniforme (Figuras 6 y 7).

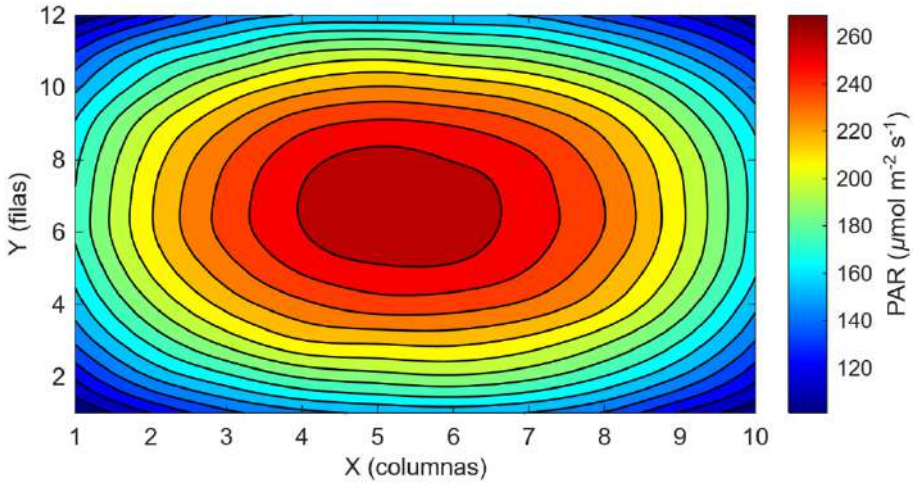


Figura 4. Intensidad de luz en el tratamiento T1 (luz blanca) a 5 cm de altura respecto a la base.

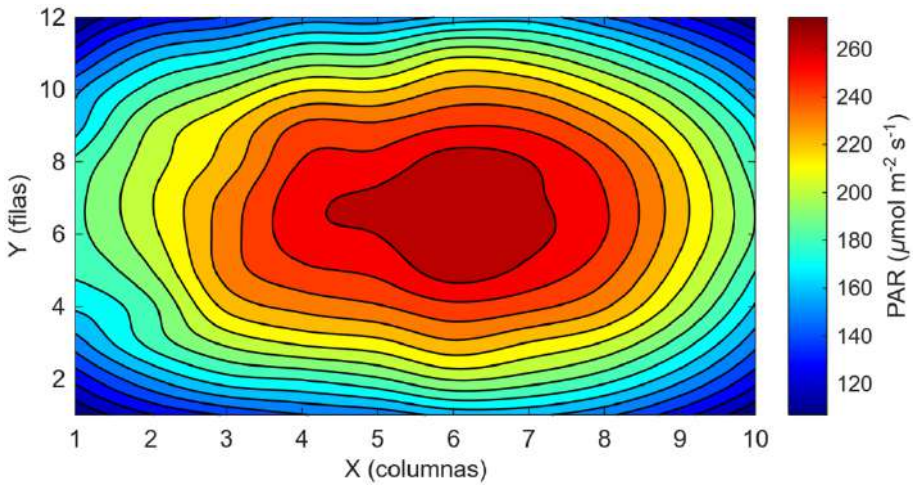


Figura 5. Intensidad de luz en el tratamiento T2 (luz blanca pro) a 5 cm de altura respecto a la base.

Calibración del modelo

Los datos de entrada al modelo para la calibración fueron la temperatura (°C) para los tratamientos de luz T1 (luz blanca) y T2 (luz blanca pro), respectivamente (Figuras 8 y 9); y datos de CO_2 (ppm) que compartieron los dos tratamientos (Figura 10). Los valores calibrados de los parámetros se muestran en el Cuadro 3. Las estadísticas de bondad de la calibración del modelo muestran una elevada precisión predictiva del modelo dinámico de tres compartimentos para describir la acumulación de materia seca de lechuga en la mini-PFAL.

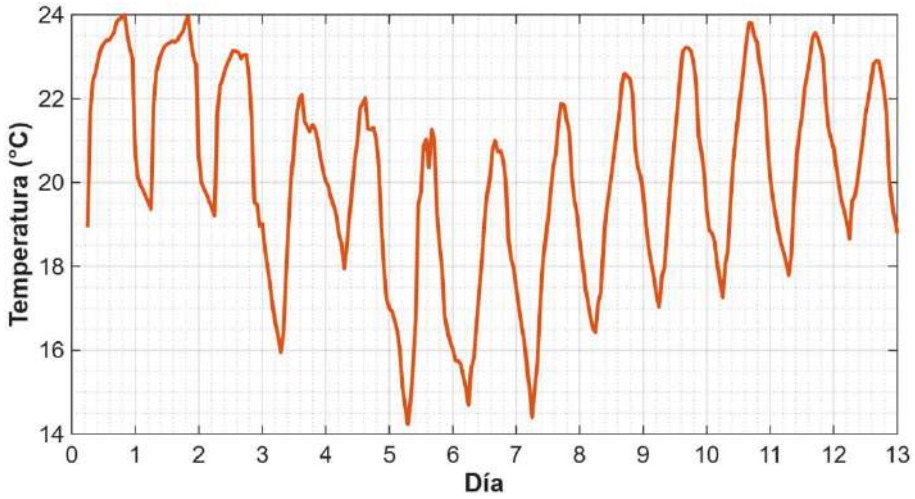


Figura 6. Temperatura (°C) registrada en el tratamiento con luz blanca T1 utilizada como entrada en la calibración del modelo matemático del cultivo.

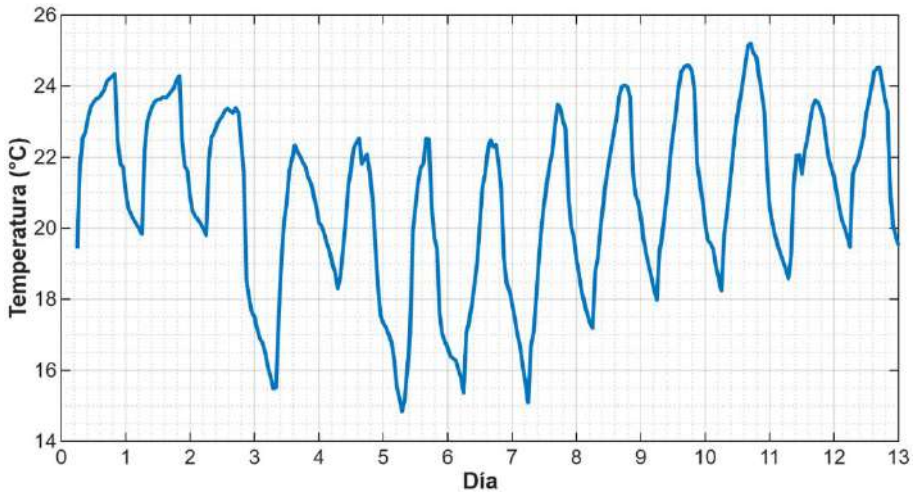


Figura 7. Temperatura (°C) registrada en el tratamiento con luz blanca pro T2 utilizada como entrada en la calibración del modelo matemático del cultivo.

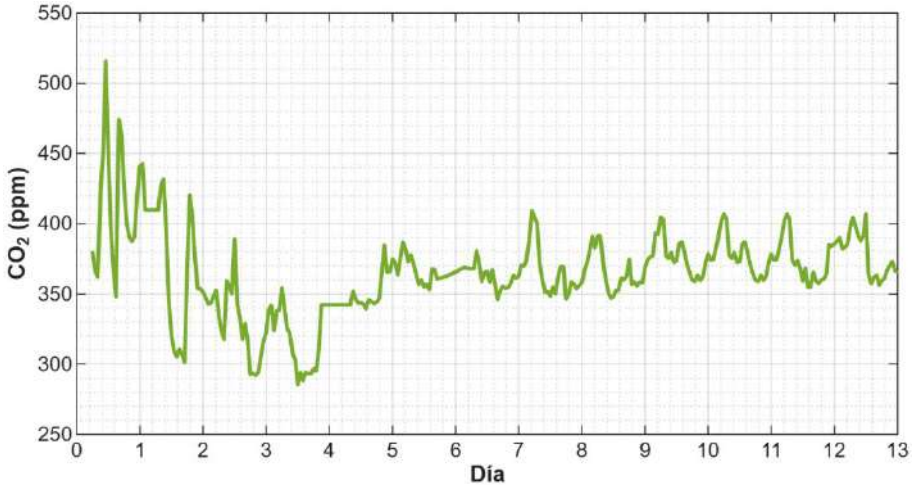


Figura 8. Concentración de CO_2 (ppm) utilizada en ambos tratamientos de luz como entrada en la calibración del modelo matemático del cultivo.

Cuadro 3. Parámetros calibrados y métricas de bondad de ajuste para biomasa seca total (w) en los tratamientos de luz T1 (luz blanca) y T2 (luz blanca pro).

Parámetro / Métrica de desempeño	**Notación**	**Tratamiento T1**	**Tratamiento T2**	**Unidad**
Parámetros calibrados				
Tasa inicial máxima de absorción de N	$J_{max,0}$	0.0356	0.0352	mmol $h^{-1}g^{-1}$MS
Coeficiente de decaimiento	α	0.2073	0.2759	g^{-1}MS
Estadísticas de calibración				
Raíz del error cuadrático medio	$RMSE$	0.4403	0.5031	g
Eficiencia del modelo (Nash-Sutcliffe)	EF	0.9276	0.8667	Adimensional

En las Figuras 11 y 12 se muestran la evolución temporal de la biomasa medida y simulada con el modelo calibrado. En el tratamiento T1, se puede observar una subestimación del modelo para los primeros cinco muestreos, y una sobreestimación para el último muestreo. En el tratamiento T2 se encontró la misma tendencia que para el tratamiento T1, una subestimación del modelo para los primeros cinco días muestreados, y una sobreestimación para el ultimo muestreo. Como se observa en la gráfica, la biomasa en el último muestreo fue mayor en el tratamiento T1 con respecto al alcanzado en el tratamiento T2.

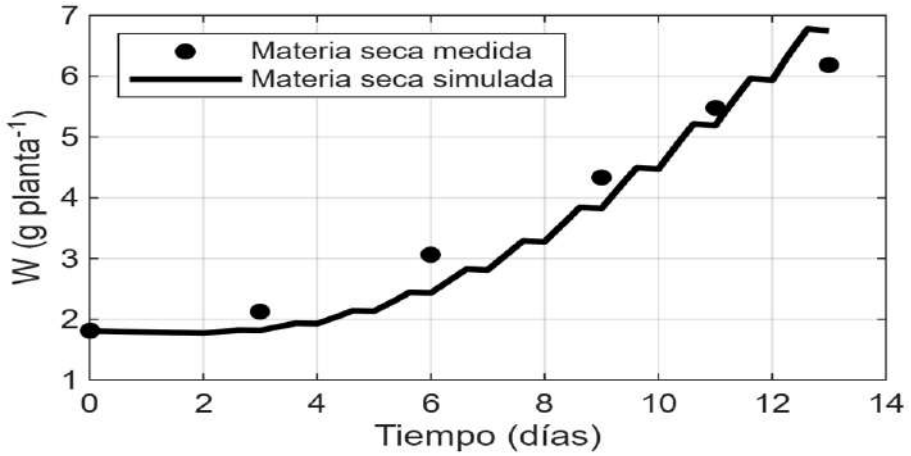


Figura 11. Materia seca medida y simulada con el modelo calibrado para el tratamiento con luz blanca (T1).

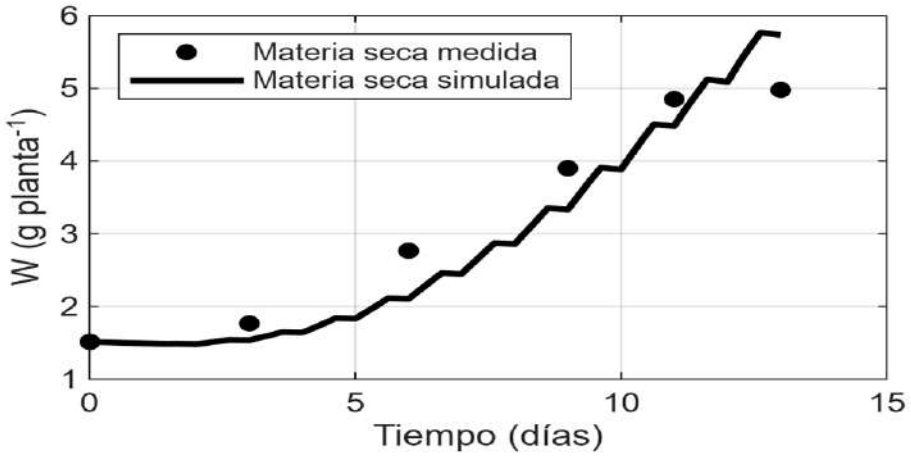


Figura 12. Materia seca medida y simulada con el modelo calibrado para el tratamiento con luz blanca pro (T2).

La tasa inicial máxima de absorción de nitrógeno ($J_{max,0}$) mostró una consistencia en ambos tratamientos de luz, manteniéndose cercano al valor nominal reportado por Zhang et al. (2008). Esto demuestra la robustez del submodelo de absorción iónica.

El coeficiente de decaimiento (α) presentó una mayor sensibilidad al tratamiento de luz. El mayor valor de α se obtuvo para el tratamiento T2. Esto denota un efecto de autorregulación o atenuación más pronunciado en la absorción específica de nitrógeno a medida que la planta acumula biomasa, lo cual correlaciona directamente con la mayor densidad foliar e intercepción fotosintética observada en dicho nivel. Los valores de RMSE reflejan un ajuste de alta precisión para ambos tratamientos de luz. En el tratamiento T2, aunque el error se incrementó ligeramente, se mantiene dentro del margen de aceptación estándar para modelos de crecimiento agrícola. La eficiencia del modelo (EF) alcanzó valores cercanos a 1.0 en ambos tratamientos, lo que ratifica que el modelo calibrado simula la dinámica de acumulación de biomasa para lechuga cultivadas con iluminación LED en un sistema hidropónico NFT.

Conclusiones

El modelo dinámico de tres estados propuesto por Zhang et al. (2008) fue adaptado y calibrado para lechuga en una minifábrica de plantas con dos tratamientos de iluminación LED. Los parámetros tasa inicial máxima de absorción de nitrógeno ($J_{max,0}$) y coeficiente de decaimiento (α) para absorción de nitrógeno, fueron estimados con el método de mínimos cuadrados no lineales implementado en la rutina lsqcurvefit de MATLAB. Los valores estimados de $J_{max,0}$ fueron similares en los dos tratamientos de luz y similares al valor nominal, mientras que los valores de α fueron muy diferentes entre tratamientos y de su valor nominal. El procesamiento de imágenes digitales mediante ImageJ demostró ser una herramienta no destructiva altamente precisa y confiable para la estimación del área foliar y del área proyectada del dosel en lechuga tipo mantequilla. De acuerdo con los índices estadísticos RMSE y EF, el modelo calibrado simulo de manera satisfactoria la dinámica de acumulación de biomasa para lechuga cultivada bajo los dos tratamientos de iluminación LED.

Literatura citada

Amirshekari, M. H., & Fakhroleslam, M. (2025). Impact of artificial light on photosynthesis, evapotranspiration, and plant growth in plant factories: Mathematical modeling for balancing energy consumption and crop productivity. *Smart Agricultural Technology*, 11, 100901. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100901

Choi, E. J., Kim, J., & Lee, S. M. (2023). Energy demand analysis of a lettuce growing plant factory: A case for Indonesian and Korean regions. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 64(4), 529–541. https://doi.org/10.1007/s13580-023-00529-8

Edwards, W. R. N., & Barber, S. A. (1976). Nitrogen uptake characteristics of corn roots at low N concentration as influenced by plant age. *Agronomy Journal*, 68(1), 17–19. https://doi.org/10.2134/agronj1976.00021962006800010005x

Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, 160, 31–43. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 235–265. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7

Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). (2016). *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*. Academic Press.

Lee, J. W., Eom, J. N., Kang, W. H., Shin, J. H., & Son, J. E. (2013). Prediction of transpiration rate of lettuces (*Lactuca sativa* L.) in plant factory by Penman–Monteith model. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 22(2), 182–187. https://doi.org/10.12791/KSBEC.2013.22.2.182

Marcelis, L. F. M., Heuvelink, E., & Goudriaan, J. (1998). Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae*, 74(1-2), 83–111. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00083-1

Patiño, A. (2022). *Modelación matemática y simulación del crecimiento de cultivos en ambientes protegidos* (Publicación / Tesis académica).

Pérez, R., & Morales, M. (2021). Avances en agricultura de ambiente controlado e iluminación LED para la producción agrícola sostenible. *Revista Iberoamericana de Ciencias Agrícolas*.

Sago, Y., Yasutake, D., Hidaka, K., Yasunaga, E., Eguchi, T., Yoshida, S., & Kitano, M. (2011). Kinetics of root ion absorption affected by environmental factors and transpiration III. A kinetic model integrated with transpiration. *Environmental Control in Biology*, 49(1), 41–46. https://doi.org/10.2525/ecb.49.41

Schenk, H. J. (1996). Modeling the effects of temperature on growth and persistence of tree species: A critical review of tree population models. *Ecological Modelling*, 92(1), 1–32. https://doi.org/10.1016/0304-3800(95)00155-7

Siddiqi, M. Y., & Glass, A. D. M. (1986). A model for the uptake of nitrate in barley using multiple charge, pH dependent mechanisms. *Journal of Experimental Botany*, 37(5), 584–601. https://doi.org/10.1093/jxb/37.5.584

Sweeney, D. G., Hand, D. W., Slack, G., & Thornley, J. H. M. (1981). Modelling the growth of winter lettuce. In *Mathematics and Plant Physiology* (pp. 217–229). Academic Press

Van Straten, G., van Henten, E. J., van Willigenburg, L. G., & van Ooteghem, R. J. C. (2010). *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/EBK1420059618
Van Hente, E.J. (1994). Validation of a dynamic lettuce growth model for greenhouse climate control. Agricultural Systems, 45: 55-72.

Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., & Brun, F. (Eds.). (2014). *Working with Dynamic Crop Models: Methods, Tools and Examples for Agriculture and Environment* (2nd ed.). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2011-0-09098-1

Zhang, L. Z., van Straten, G., & van Henten, E. J. (2008). A dynamic model for lettuce growth in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 801, 1421–1428. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.173