

MODELOS DE RESPUESTA EN PRÁCTICAS AGRÍCOLAS

FRANCISCO PÉREZ SOTO
OSCAR PALMEROS ROJAS
RAQUEL SALAZAR MORENO
ESTHER FIGUEROA HERNÁNDEZ
REBECA ALEJANDRA PÉREZ FIGUEROA
PABLO EMILIO ESCAMILLA GARCÍA
DANIEL SEPÚLVEDA JIMÉNEZ

(Compiladores)

ISBN: 978-607-12-0727-2



MODELOS DE RESPUESTA EN PRÁCTICAS AGRÍCOLAS

MODELOS DE RESPUESTA EN PRÁCTICAS AGRÍCOLAS

FRANCISCO PÉREZ SOTO

OSCAR PALMEROS ROJAS

RAQUEL SALAZAR MORENO

ESTHER FIGUEROA HERNÁNDEZ

REBECA ALEJANDRA PÉREZ FIGUEROA

PABLO EMILIO ESCAMILLA GARCÍA

DANIEL SEPÚLVEDA JIMÉNEZ

(Compiladores)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Modelos de respuesta en prácticas agrícolas

ISBN: 978-607-12-0727-2

D.R. ©Universidad Autónoma Chapingo

Carretera México - Texcoco, km 38.5

Texcoco, Edo. de México, C.P. 56230

Tel.: 595 9521500, Ext. 5142

publicaciones@chapingo.mx

Primera edición, septiembre 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Dr. Angel Garduño García
Rector

M.C. Noé López Martínez
Director General Académico

Ing. Jorge Torres Bribiesca
Director General de Administración

Dr. Samuel Pérez Nieto
Director General de Patrimonio y Finanzas

Dra. Consuelo Silvia Olivia Lobato Calleros
Directora General de Investigación, Posgrado y Servicio

Mtra. Tania Jessica Pérez Buendía
Directora General de Difusión Cultural

M.C. Daniel Rodríguez Martínez
Subdirector de Comunicación Universitaria

Dr. Mario Salvador González Rodríguez
Jefe del Departamento de Publicaciones

ÍNDICE

Capítulo I

Modelos de respuesta de biomasa, rastrojo, rendimiento y componentes en arroz a la fertilización fosfatada José Alberto Salvador Escalante Estrada, Yolanda Isabel Escalante Estrada, Luis Enrique Escalante Estrada y Cid Aguilar Carpio	14
---	----

Capítulo II

Diseño de un prototipo de molino triturador de PET destinado a zonas rurales María Victoria Gómez Águila, Miguel Cruz Maldonado, Luis Tonatihu Castellanos Serrano y Ulises Leonardo Mora Mayáns	24
--	----

Capítulo III

Diseño y evaluación de un suavizador de agua sanitaria basado en electromagnetismo para redes hidráulicas en Puebla, México Luis Tonatihu Castellanos Serrano, Francisco Pérez Martínez y María Victoria Gómez Águila	36
---	----

Capítulo IV

Análisis de sistemas y modelos hipercaóticos en 5D y 6D Daniel Sepúlveda Jiménez y Daniel Eduardo Sepúlveda Robles	48
---	----

Capítulo V

Validación de una estación meteorológica de bajo costo basada en ESP32 para el monitoreo agroclimático Jesús Antonio García Martínez, Miguel Servín Palestina, David Vargas Cano y José Israel Casas Flores	63
---	----

Capítulo VI

SPEFA 1.0: Sistema de predicción fenológica para ajo (<i>Allium sativum</i> L.) basado en grados-día de desarrollo y su implementación en una aplicación web Shiny	
David Vargas Cano, Miguel Servín Palestina,	
Jesús Antonio García Martínez y Salvador González Solís	78

Capítulo VII

Simulación numérica del ambiente de una fábrica de plantas con luz artificial en una oficina para producir arúgula	
Jorge Flores Velázquez, Abraham Rojano Aguilar,	
Francisco García Herrera y Aranza Hortencia Navarrete Torres	91

Capítulo VIII

Análisis transitorio del mecanismo de cargador frontal de una retroexcavadora	
Mediante Elementos Finitos	
Daybelis Fernández Valdés, Adolfo López Liévano,	
Dayvis Fernández Valdés y María Victoria Gómez Águila	102

Capítulo IX

Análisis numérico del efecto del daño por impacto en frutos de guayaba	
Dayvis Fernández Valdés, Arturo Ocampo Ramírez,	
María Victoria Gómez Águila y Daybelis Fernández Valdés	115

Capítulo X

Sistema de bajo costo basado en LAN para aplicaciones de monitoreo y riego agrícola	
Rogelio Ernesto García Chávez y David Hebert Del Valle Paniagua	128

Capítulo XI

Clasificación de imágenes a través de una red neuronal convolucional	
Raquel Salazar Moreno, Irineo Lorenzo López Cruz,	
Efrén Fitz Rodríguez y Abraham Rojano Aguilar	138

Capítulo XII

Evaluación de ecuación unidimensional de BusinessQ para el diseño de drenes subterráneos parcelarios	
Ángel Hernández Facundo, Jorge Víctor Prado Hernández	
y Mauricio Carrillo García	155

Capítulo XIII

Modelos de caja negra para la predicción de la producción mundial de café (<i>Coffea arabica</i>)	
Marlio Bedoya Cardoso, Raquel Salazar Moreno y	
Nadia Brigitte Sanabria Méndez	167

Capítulo XIV

Sistema de visión artificial basado en YOLOv8 para la clasificación y medición automática de ajo (*Allium sativum* L.) en postcosecha

Angel Kristof De León Sanchez, Jesús Antonio García Martínez,

Briseida Salas Benavides y Miguel Servín Palestina 184

Capítulo XV

Características de los estudiantes de nuevo ingreso de la Preparatoria Agrícola de la UACH

Oscar Palmeros Rojas, Noé Ramírez Negrete y

Itzayana Amairani Brindis Fernández 202

Capítulo XVI

El uso del celular como herramienta didáctica. El caso del área de física de la UACH

Rafael Zamora Linares, Enrique Armando Gómez Lozoya y

Donato Vázquez Juárez 218

Presentación:

En el presente tomo se publican los siguientes capítulos:

Modelos de Respuesta de Biomasa, Rastrojo, Rendimiento y Componentes en Arroz a la Fertilización Fosfatada. Este capítulo estudia el efecto del fósforo en el arroz, concluyendo que dosis óptimas de 80 kg ha^{-1} aumentan rendimiento y eficiencia hídrica. El modelo más preciso para estimar el rendimiento considera los macollos y el número de granos y la rentabilidad se maximiza a ese nivel de fertilización en el cultivo de arroz.

Diseño de un prototipo de molino triturador de PET destinado a zonas rurales. En este estudio se propone un molino de PET económico y fácil de operar para zonas rurales, alimentado por energía doméstica o solar. El diseño es accesible, sostenible y promueve el reciclaje de plásticos en comunidades, resolviendo limitaciones de acceso a maquinaria especializada.

Diseño y evaluación de un suavizador de agua sanitaria basado en electromagnetismo para redes hidráulicas en Puebla, México. El capítulo presenta un suavizador de agua basado en electromagnetismo, que reduce incrustaciones y costos de mantenimiento. De acuerdo con la investigación el prototipo es viable, económico y ambientalmente amigable, aunque requiere validación en condiciones reales.

Análisis de sistemas y modelos hipercaóticos en 5D y 6D. En este estudio se explora la dinámica hipercaótica en sistemas de ecuaciones diferenciales de 5 y 6 dimensiones, calculando exponentes de Lyapunov y generando gráficas y bifurcaciones para entender la complejidad y probar software especializado en este tipo de análisis.

Validación de una estación meteorológica de bajo costo basada en ESP32 para el monitoreo agroclimático. Se valida una estación meteorológica económica basada en ESP32, mostrando alta precisión en variables clave y siendo una alternativa confiable, escalable y accesible para productores agrícolas frente a la variabilidad climática. Los hallazgos del estudio contribuyen a reducir la brecha tecnológica y a fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a escenarios de variabilidad climática.

SPEFA 1.0: Sistema de predicción fenológica para ajo (*Allium sativum* L.) basado en grados-día de desarrollo y su implementación en una aplicación web Shiny. Este capítulo desarrolla y valida un sistema de predicción fenológica para ajo, implementado en una app web, que maximiza la productividad mediante modelos de grados-día de desarrollo, ajustados para distintas variedades y optimizados para la toma de decisiones agronómicas.

Simulación numérica del ambiente de una fábrica de plantas con luz artificial en una oficina para producir Arúgula. De acuerdo con este trabajo se simula el ambiente para cultivo interior de arúgula usando CFD, demostrando que la temperatura se mantiene adecuada para el desarrollo del cultivo, aunque la radiación natural es insuficiente y se requiere mayor análisis.

Análisis transitorio del mecanismo de cargador frontal de una retroexcavadora mediante elementos finitos. El capítulo presenta un análisis transitorio por elementos finitos del mecanismo de una retroexcavadora, identificando los brazos principales como las zonas más críticas y validando la metodología para evaluar maquinaria agrícola en condiciones dinámicas reales.

Análisis numérico del efecto del daño por impacto en frutos de guayaba. Se utiliza el método de elementos finitos para predecir daños mecánicos en guayabas durante el manejo postcosecha, proporcionando pautas para minimizar daños y mejorar la calidad y vida útil del fruto.

Sistema de bajo costo basado en LAN para aplicaciones de monitoreo y riego agrícola. Se implementa un sistema basado en ESP32 para monitoreo y control de riego agrícola, permitiendo adquisición y visualización de datos en tiempo real a través de una interfaz web, resultando funcional y replicable para entornos educativos y pequeñas explotaciones. El sistema cumple con los objetivos planteados, ofreciendo una solución funcional y replicable para entornos agrícolas educativos y/o de pequeña escala.

Clasificación de imágenes a través de una red neuronal convolucional. Este capítulo describe el uso de CNN y ResNet-50 para clasificación de imágenes agrícolas, mostrando que ResNet-50 supera a la CNN tradicional en precisión, especialmente para identificar flores específicas.

Evaluación de ecuación unidimensional de Boussinesq para el diseño de drenes subterráneos parcelarios. Se evalúa la ecuación de Boussinesq para diseño de drenaje agrícola, demostrando alta capacidad predictiva en suelos arcillosos y aceptable en arenosos, aportando evidencia experimental relevante para el diseño en diferentes condiciones de suelo. La ecuación de Boussinesq constituye una herramienta confiable para el diseño de drenajes agrícolas, pero con necesidad de parametrización más cuidadosa en suelos arenosos.

Modelos de caja negra para la predicción de la producción mundial de café (*Coffea arabica*). Se desarrollan modelos estadísticos y de redes neuronales para simular la producción mundial de café, concluyendo que los modelos híbridos tienen mayor poder predictivo y ofrecen herramientas valiosas para pronóstico de producción y mercado.

Sistema de visión artificial basado en YOLOv8 para la clasificación y medición automática de ajo (*Allium sativum* L.) en postcosecha. Se implementa un sistema de visión artificial con YOLOv8 para clasificar y medir bulbos de ajo automáticamente, alcanzando alta precisión y eficiencia, aunque es necesario validar en condiciones de campo para su aplicación comercial.

Características de los estudiantes de nuevo ingreso de la Preparatoria Agrícola de la UACH. El capítulo analiza variables sociodemográficas y académicas de estudiantes de nuevo ingreso, identificando deficiencias en matemáticas y proponiendo talleres, tutorías y acompañamiento emocional para mejorar el éxito académico e inclusión social.

El uso del celular como herramienta didáctica. El caso del área de física de la UACH. Se examina el uso del celular en el proceso de enseñanza-aprendizaje de física, reconociendo su potencial didáctico, pero enfatizando la necesidad de un equilibrio y supervisión para evitar distracciones en el aula.

Fraternalmente

Francisco Pérez Soto

Capítulo I

José Alberto Salvador Escalante Estrada¹, Yolanda Isabel Escalante Estrada²,
Luis Enrique Escalante Estrada³ y Cid Aguilar Carpio³

Modelos de respuesta de biomasa, rastrojo, rendimiento y componentes en arroz a la fertilización fosfatada

RESUMEN

En México, el arroz (*Oryza sativa* L) ocupa el cuarto lugar de los granos básicos que consume la población. El objetivo del estudio fue determinar el efecto del nivel de fósforo en arroz sobre: los días a ocurrencia a etapas fenológicas, biomasa, el rendimiento en grano, sus componentes paja, la relación entre estas variables, el modelo que mejor estime el rendimiento en grano y la rentabilidad de esta práctica. El estudio se realizó en Iguala, Guerrero, México (731 msnm de altitud) de clima cálido subhúmedo (Aw), en un vertisol, de textura arcillosa, pH 7.7, 45 kg de N y 14 ppm de fósforo, durante el ciclo Primavera-Verano de 2018, bajo riego. El suministro de fósforo en arroz no afectó los días a ocurrencia a las etapas fenológicas. Hasta con 80 kg ha⁻¹ que fue el óptimo aumenta la altura de planta, el rendimiento en grano, el número de granos, macollos, la longitud de panícula, el tamaño del grano y la eficiencia en el uso del agua. Con 120 kg de P ha⁻¹ se logra la mayor biomasa y el rastrojo. El número de macollos, de granos, el índice de cosecha y la eficiencia en el uso del agua, presentan una correlación alta con el rendimiento en grano. El modelo que mejor estima el rendimiento involucra número de macollos y el número de granos. Con el suministro de fósforo hasta 80 kg ha⁻¹, se logra la rentabilidad más alta en el cultivo del arroz A-98.

Palabras clave: índice de cosecha, eficiencia en el uso del agua, rentabilidad, correlación, modelo de estimación.

¹ Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Posgrado de Botánica. Carretera México-Texcoco. Texcoco, Estado de México. jasee@colpos.mx; aguilar.cid@colpos.mx

² Universidad Autónoma del Estado de Guerrero, Chilpancingo, Guerrero, México.

³ Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero. Cocula, Guerrero, México.

ABSTRACT

In Mexico, rice (*Oryza sativa* L) is the fourth most consumed staple grain. The objective of this study was to determine the effect of phosphorus levels in rice on: days to occurrence at phenological stages, biomass, grain yield, its straw components, the relationship between these variables, the model that best estimates grain yield and the profitability of this practice. The study was conducted in Iguala, Guerrero, Mexico (731 msnm of altitude) with a warm subhumid climate (Aw), in a vertisol, with a clayey texture, pH 7.7, 45 kg of N and 14 ppm of phosphorus, during the Spring-Summer cycle of 2018, under irrigation. The supply of phosphorus in rice did not affect the days to occurrence at phenological stages. Plant height, grain yield, grain number, tiller number, panicle length, grain size, and water use efficiency increase even at 80 kg ha⁻¹, which was the optimum. The highest biomass and stubble are achieved with 120 kg of P ha⁻¹. The number of tillers, grains, harvest index, and water use efficiency are highly correlated with grain yield. The model that best estimates yield involves the number of tillers and the number of grains. Phosphorus supplies up to 80 kg ha⁻¹ achieve the highest profitability in A-98 rice cultivation.

Keywords: harvest index, water use efficiency, profitability, correlation, estimation model.

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,2023). Tradicionalmente, se cultiva en suelo inundado y es demandante en fósforo. El fósforo (P) es uno de los nutrimentos de los más necesarios para la producción de alimentos, siendo esencial en los cultivos para llegar a una producción óptima. El fósforo, es un actor principal en la fotosíntesis y el transporte de nutrientes a la planta, esto se traduce en que es fundamental para: generar raíces, potenciar la floración y el pegue o **cuajado** de los frutos. El uso no apropiado de los fertilizantes fosfóricos puede producir efectos perjudiciales al ambiente, por ejemplo, en la calidad del agua como sería la eutrofización, proceso que se caracteriza por un desmedido crecimiento de algunas especies de algas en superficie que impiden el paso de la luz. Así, las algas del fondo no pueden realizar la fotosíntesis y el agua acaba perdiendo casi todo el oxígeno (Yan y col, 2016). Oo *et al.* (2023), señalan que, al comparar la respuesta a niveles de P en arroz blanco y negro, mencionan que el arroz negro que creció fue más limitado con el déficit de que resultó en menos macollos y menor rendimiento de grano, que el arroz blanco. Además, el fertilizante fosfórico es un recurso limitado, no renovable y que es necesario gestionar de manera eficiente, tanto por el impacto económico como por la disponibilidad de este recurso. Esta actual situación de creciente preocupación, ha propiciado la creación de la Plataforma Europea del Fósforo, con el objetivo, entre otros, de conseguir un uso más sostenible de este elemento (CE, 2013). En arroz, el P, estimula el desarrollo radicular, favorece la precocidad de la maduración en bajas temperaturas, la producción de tallos (macollos), el desarrollo del grano y el nivel nutricional del mismo. El P se

absorbe desde las fases iniciales del cultivo, especialmente durante la fase de ahijado, y es fácilmente redistribuido a los diferentes órganos de crecimiento y grano. En suelos inundados, la capacidad de suministrar P del suelo a la planta es mayor que en suelos no inundados, ya que cuando el arrozal se inunda, se desencadenan una serie de fenómenos físicos, microbiológicos y químicos que favorecen el incremento de la disponibilidad del nutrimento (Catala, M. 2011). El primer paso para realizar una gestión sostenible del P es conocer la fertilidad del suelo mediante un análisis que permita conocer la disponibilidad del nutrimento y planificar, si es necesaria una fertilización fosfórica ajustándola a la variedad, el tipo de suelo y sistema de cultivo. Catalá-Former *et al.* (2024), reportan que la aplicación del fósforo de forma sostenible (suministro con base a la disponibilidad de éste en el suelo y el requerimiento de la planta o cultivo) se considera la estrategia de fertilización que es capaz de optimizar el uso de este nutrimento, a la vez que se logra un desarrollo de cultivo y rendimiento en grano semejante a la estrategia convencional. Es importante resaltar que aplicar el fósforo en momentos y dosis que requiere el cultivo (que también puede ser por vía foliar, ya que la movilidad del fósforo es baja o nula en el suelo) conlleva un manejo sostenible de la fertilización fosfórica y, además, puede incrementar el rendimiento económico. Bhatta *et al.* (2021), señalan que un ahorro en suministro de P, puede lograrse mediante la selección de genotipos con eficiencia alta en el uso de este nutrimento. Así, también se puede evitar la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas. 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). 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 aplicación del fósforo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El estudio se realizó en Iguala Guerrero, México (18° 25' N, 99° 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-NO₃ 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 (2005), 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; (1) 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 la aplicación al voleo antes del trasplante de 0 (testigo), 40, 80 y 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ en forma de superfosfato simple. Se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. El tamaño de la parcela experimental fue de 15 m² (5 x 3 m) de los cuales se cosecharon 8 m² (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 superfosfato simple (SPS) con 19.5% de P₂O₅.

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) a densidad de población 11.1 plantas m⁻² (30 x 30 cm). 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 m² (MS), altura de la planta (ALT), longitud de panoja (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: La eficiencia en el uso del agua (EUA, g m⁻² mm⁻¹) con (RG/ PP).

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 °C y 33-38 °C, respectivamente. Durante el ciclo del cultivo la lluvia fue de 730 mm.

Fenología

El suministro de P no afectó 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

El ANDEVA mostró diferencias significativas para la BT, RG, NG, MAC, ALT., LP y EUA. El TG no presentó (Cuadro 1). Con el suministro de P a excepción del TG, la BT, RG, NG, MAC, ALT Y EUA se incrementaron hasta la aplicación de 80 kg de N y disminuyó con niveles superiores. Oo *et al.* (2023), señalan que el déficit de bajo P en el suelo, se refleja en menor número de macollos y un RG, contrario a que cuando se suministra este. Lo cual coincide con lo encontrado en este estudio. Asimismo, estos resultados indican que, en suelo arcilloso con un contenido mediano de P, el arroz requiere de 80 kg de P ha⁻¹ adicional para lograr una BT, RG (figura 1), MAC, NG, LP Y EUA más alto.

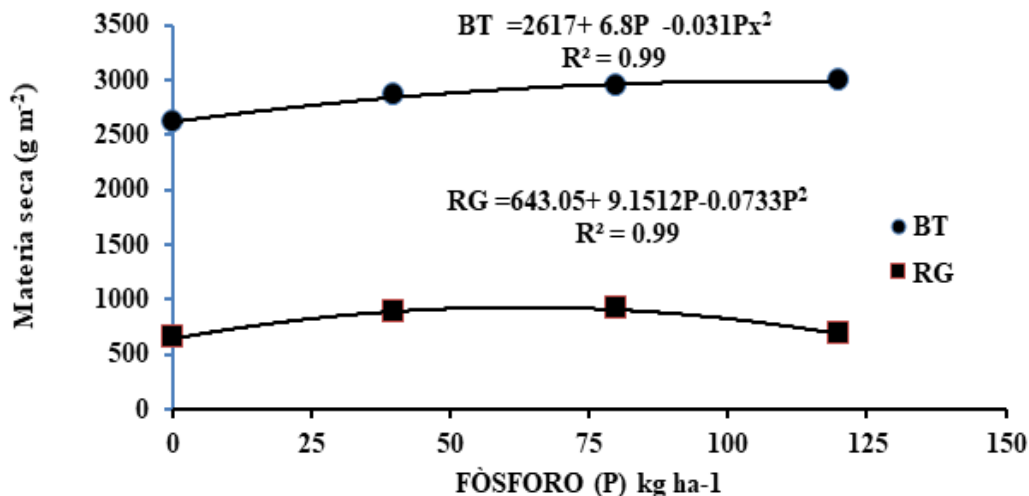
Cuadro 1. Biomasa, rendimiento, sus componentes y eficiencia en el uso del agua en arroz (*Oryza sativa* L.) cultivar Morelos A-98 en función del fósforo. Verano 2018. Iguala Gro.

Fósforo Kg ha ⁻¹	BT gm ⁻²	RG gm ⁻²	NG m ⁻²	MAC m ⁻²	RG M (g)	ALT (cm)	LP (cm)	TG (g)	EUA gm ⁻² m ⁻¹
0	2610c	645c	20373c	131c	4.9a	145b	30ab	0.0312a	0.9b
40	2860b	786b	22037b	166b	4.7a	157a	31a	0.0327a	1.1a
80	2940ab	912a	28061a	200a	4.6a	154a	31a	0.0325a	1.2a
120	2990a	684c	21923c	141c	4.8a	143b	30ab	0.0312a	0.9b
Tukey 0.05	110	80	524	40	0.4	5	1	0.01	0.1
Prob. F	**	**	**	**	NS	*	*	**	**

RG= rendimiento de grano; TG= peso individual del grano (g); NGS= número de granos m⁻²; MAC= macollos por m⁻²; RGM=rendimiento en grano (g) por macollo;

ALT = 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.

Figura 1. Biomasa (materia seca, BT) y rendimiento en grano (RG) del arroz A-98 en función del suministro de fósforo (P). Verano 2018. Iguala Gro.



Biomasa, su acumulación y distribución en rastrojo y semilla

El P ocasionó cambios significativos en la acumulación y distribución de materia seca (MS), en las estructuras de la planta. La mayor cantidad de MS se encontró con 80 kg de N ha⁻¹. Tendencia semejante se encontró en el IC, distribución de materia seca hacia el grano. En cuanto al rastrojo (tallo + hojas) la mayor cantidad fue con 120 kg de P ha⁻¹, seguida de 80 kg ha⁻¹ (figura 2). En cuanto al IC de rastrojo este fue de 77%(Cuadro 2). Esto indica que con 80 kg de P ha⁻¹ se logra mayor acumulación de MS en el grano.

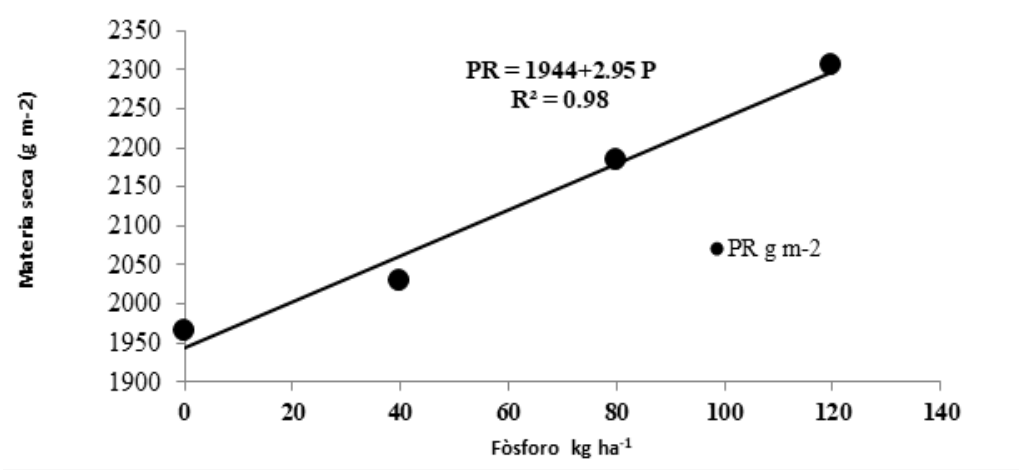
Cuadro 2. Biomasa, su acumulación y distribución en rastrojo y grano. Verano 2018.

Fósforo Kg ha ⁻¹	BT gm ⁻²	RG g m ⁻²	PR g m ⁻²	IC (%) grano	IC (%) rastrojo
0	2610c	645c	1965c	24b	76a
40	2860b	786b	2074b	27b	73ab
80	2940ab	912a	2028b	31a	69c
120	2990a	684c	2306a	23c	77a
Tukey 0.05	110	80	100	3	3
PROBABILIDAD DE F	**	**	**	**	**

BIO = biomasa (materia seca total); PG = peso del grano; PR = peso seco de rastrojo (tallo + hojas);

Dist = distribución (%); IC = índice de cosecha; PF = probabilidad de F; PF 0.01 y 0.05, **, *, respectivamente

Figura 2. Materia seca del rastrojo (PR) del arroz A-98 en función del suministro de fósforo (P).
Verano 2018. Iguala Gro.



Correlación de Pearson del rendimiento en grano, biomasa y sus componentes

El RG presentó una correlación alta ($r= 0.93\text{-}0.99^{**}$) con NG, MAC, IC y EUA (Cuadro 3). Esto indica que para incrementar el RG se requieren más granos y macollos. El incremento en estos atributos se puede lograr en parte con el suministro de fósforo. Relación semejante fue reportada por Escalante *et al.* (2025) cuando se estudia el suministro de nitrógeno en arroz. Asimismo, el RG mostró una alta relación con el IC y la EUA.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables en estudio.
Verano 2018. Iguala Gro.

	BT	RG	NG	MAC	RGM	ALT	LP	TG	IC	EUA
BT		0.51NS	0.54NS	0.51 NS	-0.65NS	0.19NS	0.34NS	0.32NS	0.28NS	0.38NS
RG			0.93**	0.99**	-0.98**	0.78	0.89NS	0.84NS	0.97*	0.98*
NG				0.93*	-0.88NS	0.49NS	0.66NS	0.59NS	0.89NS	0.84NS
MAC					-0.97*	0.76NS	0.88NS	0.83NS	0.97*	0.97*
RGM						-.78NS	0.88NS	0.83NS	-.88NS	-.94NS
ALT							0.98*	0.99**	0.79NS	0.89NS
LP								0.98**	0.88NS	0.96*
TG									0.83NS	0.93NS
IC										0.97*
EUA										

BT=biomasa total;. RG = rendimiento de grano; TG=tamaño del grano (g);
NG = número de granos m⁻²; MAC = macollos por m²; ALT = altura de la planta (cm);
LP = longitud de panoja (inflorescencia); IC = índice de cosecha (%). PF 0.01 y 0.05, **, *, respectivamente.
NS = diferencias no significativas al 0.05 de Probabilidad de F(Prob F).

Mejor modelo de estimación del rendimiento en grano en función de sus componentes, mediante el procedimiento Stepwise.

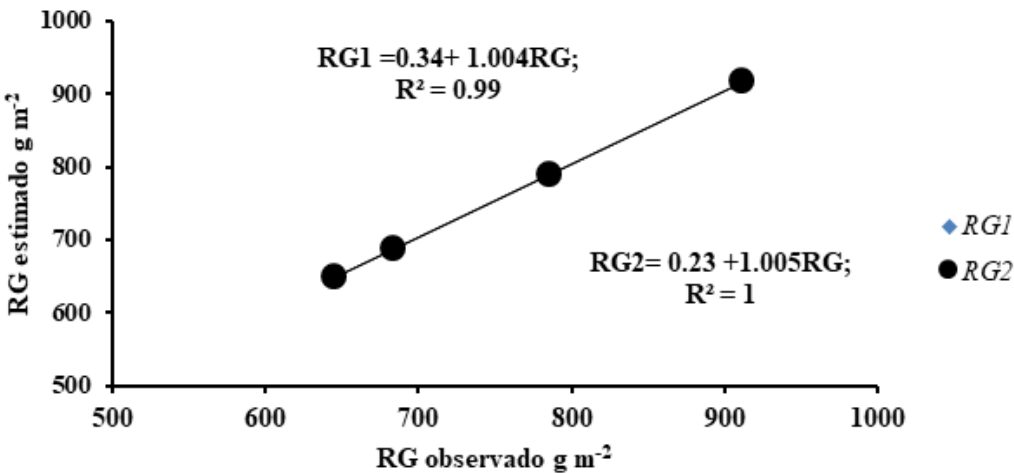
El mejor modelo de estimación del rendimiento (RG) en función de sus componentes involucró al número de macollos por m² (MAC) y el número de granos (NG) con un R²=1 y con menor C(p)=22 en comparación con el modelo con una variable (MAC) que aun cuando el R² fue de 0.99, presentó mayor C(p)=3862. También el MAC está involucrado en el mejor modelo de estimación del RG en arroz con aplicación de nitrógeno (Escalante *et al.* 2025). Esto indica, que el número de macollos es la principal estructura de la planta a mejorar para incrementar el RG en arroz. En el cuadro 4, se presentan las ecuaciones de estimación del RG. La figura 4, presenta la relación entre el RG estimado con los modelos del cuadro 4, con el RG observado. El modelo que involucra más variables presenta el coeficiente de determinación más alto y menor error de estimación.

Cuadro 4. 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	C(p)
RG=138 + 3.9 MAC	MAC	0.99	3862
RG= 153+ 4.1MAC-0.002NG	NG	1.0	22

RG= rendimiento de grano; PCG=peso de cien granos (g); MS=macollos por m²;

Figura 3.-Relación entre el rendimiento estimado mediante los dos modelos con el observado en arroz A-98. Iguala Gro. Verano 2018.



Análisis económico

Rentabilidad

En el Cuadro 5, se observa que la mayor rentabilidad del cultivo fue con la aplicación de 80 kg ha⁻¹

de fósforo, por obtener el mayor ingreso neto y GPI. Es decir que por cada peso invertido se obtuvo \$ 4.95 de retorno. No obstante, puede considerarse el tratamiento con 40 kg ha⁻¹ de fosforo, que por cada peso se gana \$ 4.64, con este tratamiento se pueden reducir los costos de producción y el cultivo sigue siendo rentable.

Cuadro 5. Rentabilidad en el cultivo de arroz con respecto al suministró de fosforo.

Fósforo (Kg ha⁻¹)	RG (kg ha⁻¹)	Costo total (\$)	Ingreso total (\$)	Ingreso neto (\$)	GPI (\$)
0	6450	26,465.00	129,000.00	102,535.00	3.87
40	7860	27,865.00	157,200.00	129,335.00	4.64
80	9120	30,665.00	182,400.00	151,735.00	4.95
120	6840	31,065.00	136,800.00	105,735.00	3.40

GPI = Ganancia por peso invertido. El bulto de fertilizante de 50 kilos en \$250 pesos y el kilo de arroz en \$20 pesos mexicanos.

CONCLUSIONES

En el cultivo de arroz el suministro de fósforo no afecta los días a ocurrencia a las etapas fenológicas. Hasta con 80 kg ha⁻¹ que fue el óptimo aumenta la altura de planta, el rendimiento en grano, el número de granos, macollos, la longitud de panícula, el tamaño del grano y la eficiencia en el uso del agua. Con 120 kg de P ha⁻¹ se logra la mayor biomasa y el rastrojo. No afecta el rendimiento por macollo. El número de macollos, el número de granos, el índice de cosecha y la eficiencia en el uso del agua, presentan una correlación alta con el rendimiento en grano. El modelo que mejor estima el rendimiento involucra número de macollos y el número de granos. Con el suministro de fósforo hasta 80 kg ha⁻¹, se logra la rentabilidad más alta en el cultivo del arroz A-98.

LITERATURA CITADA

- Bhatta BB, Panda RK, Anandan A, Pradhan NSN, Mahender A, Rout KK, Patra BC and Ali J (2021). Improvement of Phosphorus Use Efficiency in Rice by Adopting Image-Based Phenotyping and Tolerant Indices .Front. Plant Sci. 12:717107.doi: 10.3389/fpls.2021.717107,
- Catala, MM., 2011. Guía práctica de la fertilización racional de los Cultivos en España. Capítulo 18, 151-16. En: El abonado del Arroz. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino Pº de la Infanta Isabel, 1Secretaría General Técnica Centro de Publicaciones España.
- Catalá-Forner M., Bertomeu Andrea, Tomás Núria y Pla Eva.2024. Gestión sostenible del fósforo en el cultivo del arroz. artículo técnico. IRTA. pág 1-4.https://ruralcat.gencat.cat/documents/20181/10569668/ARTICULO_GESTION+SOSTENIBLE+DEL+FOSFORO+EN+EL+CULTIVO+DEL+ARROZ_def.pdf/c7f9033-e3ae-4d77-ac91-d6a444747a7e. Consultado 20 junio 2025.

Environmental indicator report (CE). 2013.

- <https://ec.europa.eu/environment/consultations/pdf/phosphorus/ES.pdf>. Consultado 20 junio 2025.
- Dobermann, A. and Fairhurst T.H. ,2000. Rice: Nutrient disorders & nutrient management. Handbook Series. A. Dobermann. Copyright © 2000. Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash .
- 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.
- 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 de agosto de 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, volumen 37.
- Oo AZ, Asai H, Kawamura K, Marui J, Nakahara K, Takai T, Saito H, Win KT and Pariasca-Tanaka J (2023) Optimizing phosphorus management to increase grain yield and nutritional quality while reducing phytic acid concentration in black rice (*Oryza sativa* L.). *Front. Sustain. Food Syst.* 7:1200453. doi: 10.3389/fsufs.2023.1200453.
- Penuelas, J., Sardans, J. Alcaniz, J.M. and. Poch, J.M., 2009. Increased eutrophication and nutrient imbalances in the agricultural soil of NE Catalonia, Spain. *J. Environ. Biol.* September: 841-846.
- Yan, Z., Peñuelas, J., Sardans, J., *et al.*, 2016. Phosphorus accumulates faster than nitrogen globally in freshwater ecosystems under anthropogenic impacts. *Ecology Letters*. 19: 1237–1246.

Capítulo II

**María Victoria Gómez Águila¹, Miguel Cruz Maldonado²,
Luis Tonatiuh Castellanos Serrano³ y Ulises Leonardo Mora Mayáns⁴**

Diseño de un prototipo de molino triturador de PET destinado a zonas rurales

RESUMEN

Las actividades humanas generan una gran cantidad de desechos, destacando las resinas plásticas, que pueden ser recicladas para un segundo uso. Aunque existen centros de reciclaje con máquinas especializadas, su elevado costo y la necesidad de personal capacitado limitan su viabilidad, especialmente en zonas rurales con escasas opciones económicas.

Para atender esta problemática, se ha diseñado un molino de PET adaptado a producciones pequeñas, que es económico y fácil de mantener y operar. Este equipo puede alimentarse con electricidad doméstica o funcionar con energía solar, lo que lo convierte en una opción sostenible. El diseño utiliza materiales comunes y es sencillo de fabricar, eliminando la necesidad de herramientas especializadas para su construcción y uso.

La metodología empleada se fundamenta en principios de ingeniería mecánica, abarcando la identificación del problema, definición de objetivos, lluvia de ideas, diseño del modelo, determinación de parámetros clave y construcción de un prototipo para pruebas. Además, se han analizado las áreas críticas susceptibles a fallos, aplicando métodos tradicionales y simulaciones por computadora para garantizar resultados cercanos a condiciones reales. El molino operará con un motor de 2 hp a 1750 rpm, complementado con un reductor de velocidades con relación de transmisión 15:1. Este enfoque no solo promueve el reciclaje de plásticos, sino que también ofrece una solución accesible y eficiente para la gestión de residuos en comunidades pequeñas.

Palabras clave: trapiche, plástico, artefacto

^{1,3} Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carr México-Texcoco. Chapingo, Edo México, CP 56230. México. mgomeza@chapingo.mx, procesoslcc@hotmail.com,

² Egresado de la carrera Ingeniería Mecánica Agrícola, año 2023. Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carr México-Texcoco. Chapingo, Edo México, CP 56230. México, miguel.cruz2000@hotmail.com

⁴ Alumno del Programa Educativo “Ingeniería Agroindustrial”. Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carr México-Texcoco. Chapingo, Edo México, CP 56230. México Al22107462@chapingo.mx

ABSTRACT

Human activities generate a large amount of waste, particularly plastic resins, which can be recycled for secondary use. Although there are recycling centers with specialized machines, their high cost and the need for trained personnel limit their viability, especially in rural areas with few economic options.

To address this issue, a PET mill has been designed for small-scale production that is economical and easy to maintain and operate. This equipment can be powered by household electricity or operate on solar energy, making it a sustainable option. The design uses common materials and is straightforward to manufacture, eliminating the need for specialized tools for its construction and use.

The methodology employed is based on principles of mechanical engineering, including problem identification, objective definition, brainstorming, model design, key parameter determination, and the construction of a prototype for testing. Additionally, critical areas prone to failure have been analyzed using traditional methods and computer simulations to ensure results close to real conditions. The mill will operate with a 2 hp motor at 1750 rpm, supplemented by a speed reducer with a transmission ratio of 15:1. This approach not only promotes plastic recycling but also offers an accessible and efficient solution for waste management in small communities.

Palabras clave: trapiche, plastic, artifact

INTRODUCCIÓN

El uso excesivo del PET (tereftalato de polietileno) genera varios problemas significativos para el medio ambiente. El PET es un tipo de plástico que, si no se recicla adecuadamente, puede terminar en vertederos, ríos y océanos, contribuyendo a la contaminación plástica. Esto afecta la vida marina y los ecosistemas acuáticos, ya que los animales pueden ingerirlo o quedar atrapados en los desechos plásticos. El PET puede tardar cientos de años en descomponerse en el medio ambiente. La contaminación por plásticos, incluido el PET, puede tener efectos negativos en la salud humana. Los micro plásticos contaminan el agua potable y los alimentos, lo que plantea riesgos para la salud a largo plazo.

Los animales que ingieren plástico pueden sufrir problemas de salud, como obstrucciones intestinales, desnutrición y, en muchos casos, la muerte. Además, los plásticos liberan sustancias químicas tóxicas en el medio ambiente, afectando a los organismos que los rodean. Es fundamental tomar medidas para reducir el uso excesivo de PET y fomentar su reciclaje para mitigar estos problemas ambientales.

Una de las alternativas para disminuir tal efecto, es la de triturar el PET una vez que ha sido utilizado. Existen máquinas, denominadas molinos trituradores del PET, que trabajan con cuchillas o molinos, como son: los molinos de cuchillas, de martillos o de rodillos. Si bien es cierto que en el mercado nacional e internacional existen tales molinos, éstos son altamente costosos, rebasando las decenas de dólares, lo que dificulta la compra de éstas a las pequeñas comunidades.

El presente trabajo constituye parte de los resultados presentados en la tesis profesional del Ingeniero Miguel Cruz Maldonado, como respuesta a la necesidad generada en el Municipio Palma

Cuata, Ignacio de la Llave, Veracruz, cuyo objetivo principal fue el diseño de un molino triturador de PET de re uso para disminuir los volúmenes de basura, y mitigar los efectos indeseables que generan al medio ambiente, que cumpla los requerimientos de ser de bajo costo de fabricación, fácil mantenimiento y operación, con alimentación de corriente directa y adaptable a paneles solares.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método empleado es el que comúnmente se utiliza para el diseño de máquinas. Primeramente, se procedió a la investigación bibliográfica una vez identificada la problemática existente en el Municipio Palma Cuata, Ignacio de la Llave, identificándose que la mayoría de las máquinas destinadas a este fin tienen un alto valor de adquisición y se diseñan para satisfacer grandes demandas en el reciclado. Adicionalmente a este inconveniente, se identificaron en el mercado varios molinos cuya función es la de moler el forraje y/o granos, de baja eficiencia mecánica, y que no facilitan la trituración del PET.

Lo anteriormente justifica la necesidad de diseñar un molino triturador de PET.

El prototipo de máquina (figura 1), consta fundamentalmente de cuatro etapas (figura 2), recepción del PET 1, cuchillas 2, encargadas de triturar el PET el que descende por gravedad hasta los tamices 3, y una vez triturado y seleccionado el tamaño de los granos, se desplazan hacia el plano de salida 4.

Figura 1. Prototipo de máquina (1- carcasa, 2 - alimentación, 3 - motor, 4 - transmisión, 5 y 6 -reductor de velocidades)

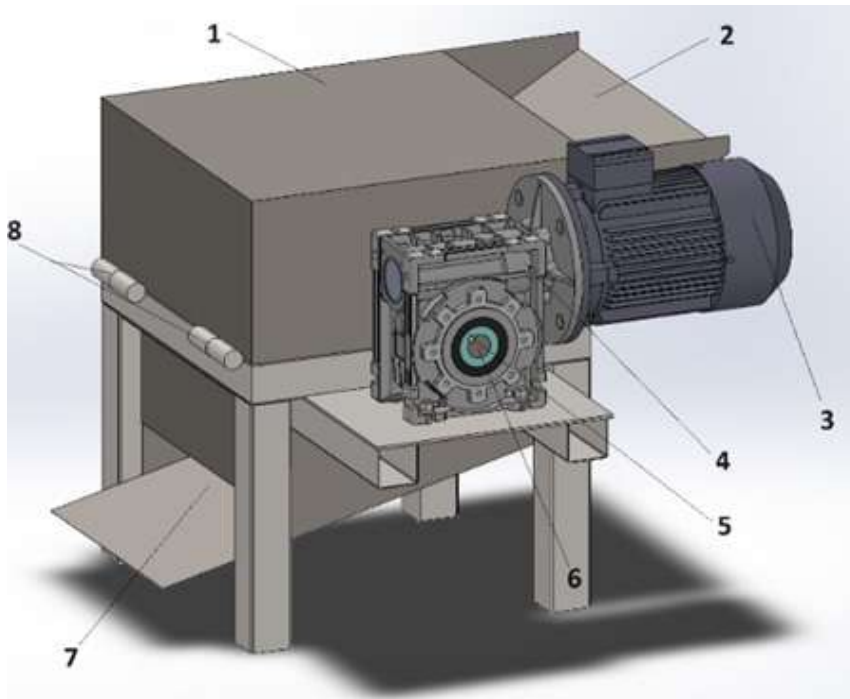
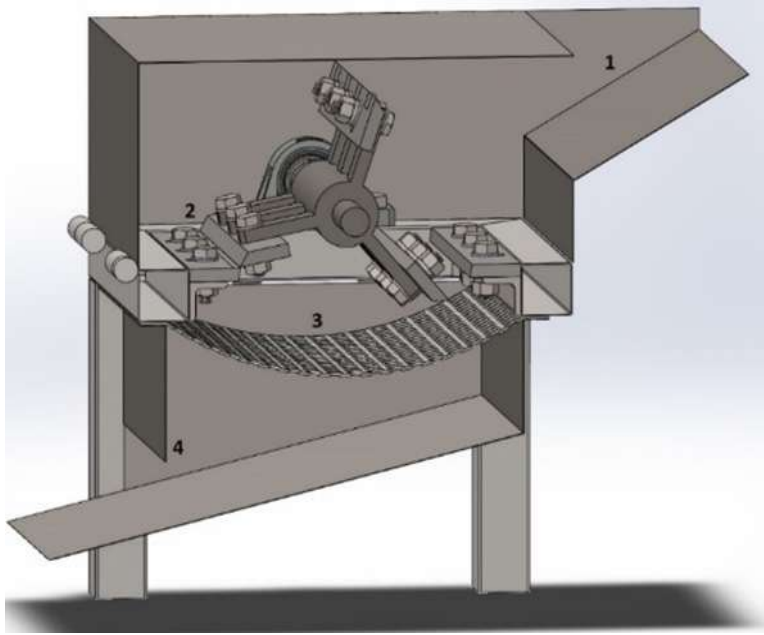


Figura 2. Vista interna del prototipo de máquina (1.-recepción, 2.- cuchillas, 3.- tamices, 4.- salida)



Los parámetros de diseño más importante que se consideraron fueron: la geometría del prototipo (dimensiones y la selección de los materiales de construcción), selección del motor y transmisión.

El motor se elige en dependencia del momento torsor requerido, y el esfuerzo a la fractura del PET. Según Pecorini y Hertzberg (1993) el esfuerzo a la fractura máximo es igual a 9.5 MPa y el área de sección transversal de una botella del PET es aproximadamente igual a 72mm². La fuerza cortante máxima se determina a través de la ecuación 1 (Beer, 2021).

$$V = \tau * A \quad (1)$$

Donde:

V=fuerza cortante;N

τ =esfuerzo tangencial permisible; τ =9.5 MPa

A:área de la sección transversal ;A=72 mm²

Sustituyendo en la ecuación 1, la fuerza cortante máxima es igual a 684 N

El momento torsor máximo se determina mediante la ecuación 2 (Budynas y Nisbett, 2012) y la distancia que se puede ver en la figura 3 de 0.12m.

$$T_{\max} = V \cdot d = 684 \text{ N} \cdot 0.12 \text{ m} = 82 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2)$$

Donde:

$T_{\max}$: momento torsor máximo; N.m

V=fuerza cortante; V =684 N

d= distancia medida desde el centro de la flecha y el filo de las cuchillas, como se observa en la figura 3, d= 0.12 m.

La decisión de acoplar el motor de 2 hp, del fabricante (WEG, 2023), que gira a 1750 rpm, entrega un momento torsor igual a , lo cual implica acoplar un reductor de velocidades con relación de transmisión 15:1.

Dimensiones del prototipo

La geometría del prototipo de máquinas se definió en dependencia del espacio donde iba a trabajar. La validación de sus dimensiones y las cargas que soportarían en el trabajo se realizó a través del análisis por el método de elementos finitos. Para ello se dibujaron los modelos en Solid Works, las partes del prototipo.

Materiales para la fabricación y sus costos

Los materiales que se emplearán y sus costos, sin incluir mano de obra aparecen en el cuadro 1.

RESULTADOS

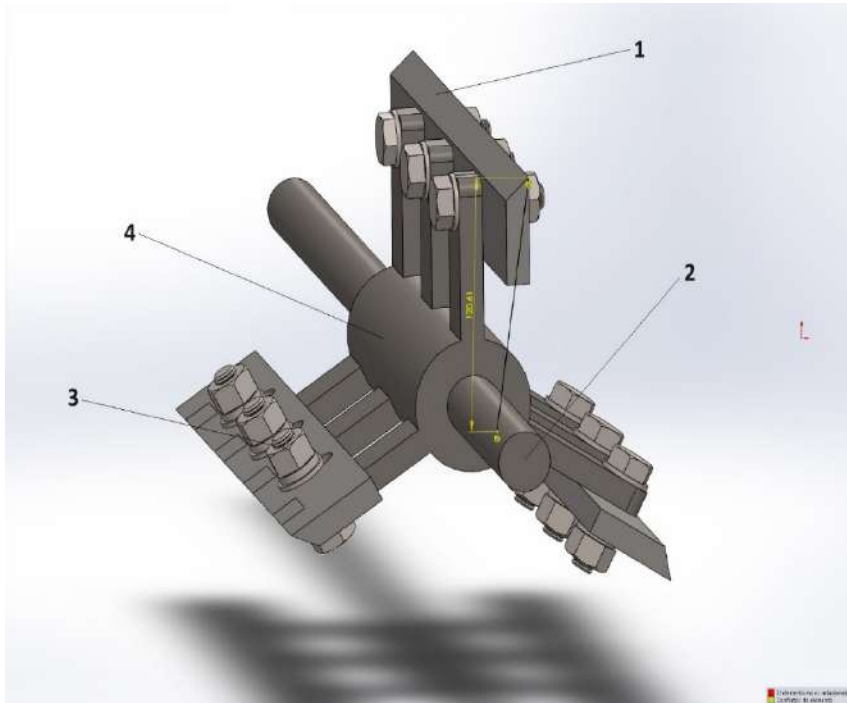
Una vez realizado el diseño conceptual del prototipo de máquina, se comprueba que todos sus componentes cumplen con los requerimientos necesarios para que trabajen sin peligro de falla.

Como se observa en la figura 4, sólo se genera este esfuerzo en una de las tres cuchillas debido a la geometría del porta cuchillas, siendo la parte cercana al cilindro donde se manifiesta el mayor esfuerzo, siendo mucho menor al esfuerzo permisible, igual a 160 MPa, lo que valida el resultado.

Porta cuchillas

El elemento porta cuchilla se modela en 3D, utilizando el software Solid Works, se simulan las fuerzas que actúan sobre ella, y se realiza el análisis por elementos finitos. Derivado de este análisis se obtiene el esfuerzo de Von Mises, igual a 107.3 MPa (figura 3), los desplazamientos resultante máximo igual a 0.259 mm (figura 5) y los desplazamientos unitarios resultante máximo de 0.259 mm (figura 6).

Figura 3. Cuchillas ensambladas (en amarillo la distancia)
(1- Cuchillas, 2- Flecha, 3- Elementos de unión, 4- Porta cuchillas)



Flecha

Empleando similar procedimiento, se modela la flecha (figura 7), se realiza el análisis de los esfuerzos de Von Mises, y se observa que la zona donde se concentran mayormente los esfuerzos es en la parte fija de la flecha, donde alcanza un esfuerzo máximo de 66.3 MPa, mucho menor a los esfuerzos permisibles para el acero estructural igual a 160 MPa.

Cuadro 1. Materiales

Descripción	Dimensión; m	Dimensión disponible; m	Precio unitario MXN	Cantidad	Precio total MXN
Barra redonda de acero AISI 1020 2-1/2"	0.2	0.5	1,490.00	1	1,490.00
Barra plana de acero AISI O2 2"x1"	1.5	1.8	7,500.00	1	7,500.00
Barra plana de acero AISI 1020 1"x1"	0.7	0.9	1,090.00	1	1,090.00
Barra redonda de acero AISI 1020 1-1/8"	0.6	0.9	1,500.00	1	1,500.00
Perfil tubular cuadrado ASTM A36 2"x2" C-18	3.5	6	450.00	1	450.00
Lámina de acero ASTM A36 C-10	0.3 x 0.21	0.3 x 0.3	400.00	1	400.00
Lámina de acero ASTM A1008 C-22	1.2 x 1.2	2.4 x 1.2	700.00	1	700.00

Ángulo de acero ASTM A36 1-1/2" x 1/8"	0.7	6	350.00	1	350.00
Lámina perforada de acero	0.3 x 0.5	0.9 x 2.1	440.00	1	440.00
Cuña cuadrada 3/8"	0.2	1	120.00	1	120.00
Chumacera de piso 1-1/8"			140.00	2	280.00
Bisagra tubular con balín y grasa 1" x 4-1/2"			125.00	2	250.00
Tornillo hexagonal grado 5 5/8" x 3-1/2"			30.00	4	120.00
Rondana plana galvanizada 5/8"			2.00	4	8.00
Arandela de presión galvanizada 5/8"			2.00	4	8.00
Tuerca hexagonal grado 5 5/8"			4.00	4	16.00
Tornillo hexagonal grado 8 1/2" x 2"			50.00	15	750.00
Rondana plana galvanizada 1/2"			2.00	30	60.00
Arandela de presión galvanizada 1/2"			2.00	15	30.00
Tuerca hexagonal grado 8 1/2"			5.00	15	75.00
Reductor de velocidad 15:1 NMRV063			4,500.00	1	4,500.00
Motor monofásico 2 HP			2,500.00	1	2,500.00
Tornillo hexagonal grado 5 3/8" x 1-1/2			5.00	4	20.00
Rondana plana galvanizada 3/8"			2.00	4	8.00
Arandela de presión galvanizada 3/8"			2.00	4	8.00
Tuerca hexagonal grado 5 3/8"			5.00	4	20.00
					22,693.00

Figura 4. Esfuerzo de Von Mises de la porta cuchilla

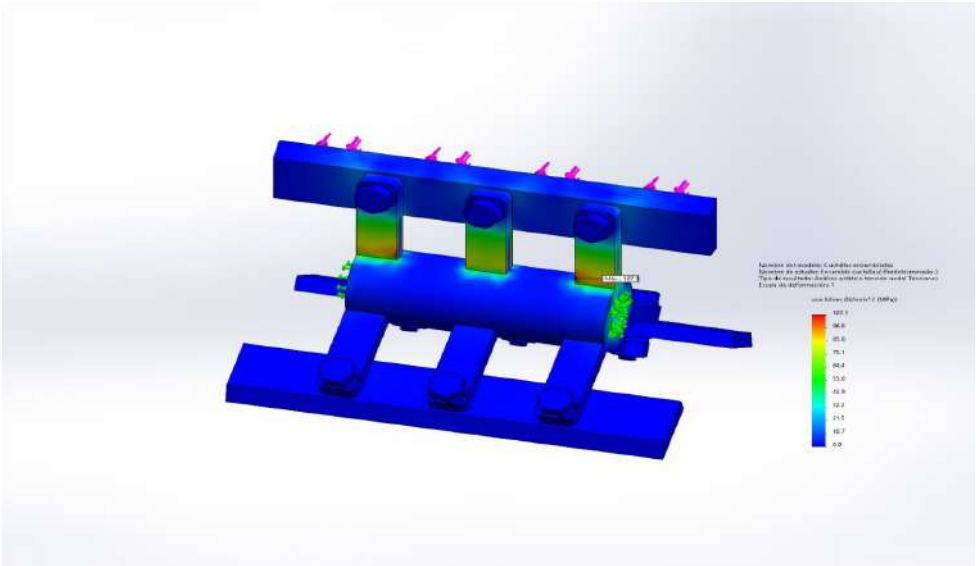


Figura 5. Desplazamientos resultantes de la porta cuchillas

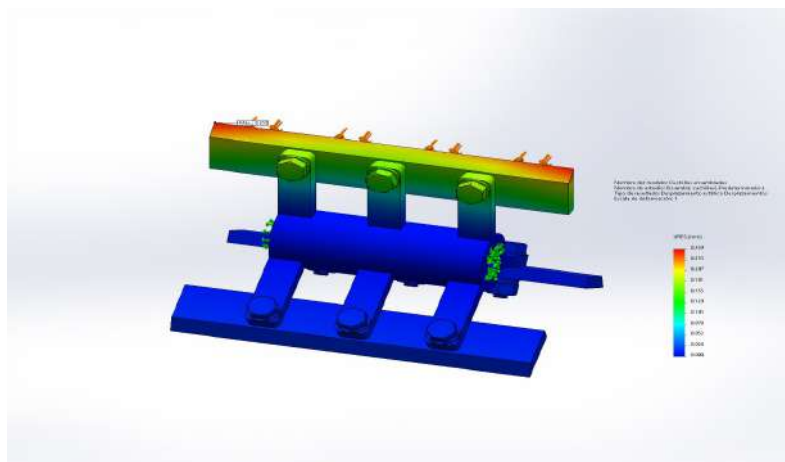


Figura 6. Deformaciones unitarias de la porta cuchillas

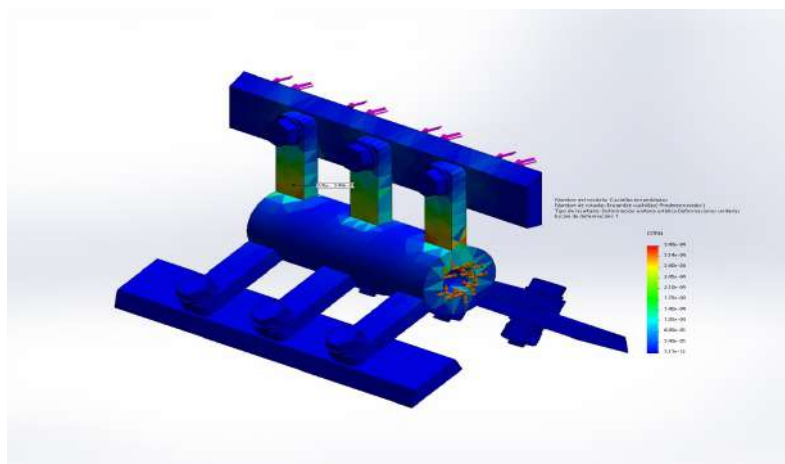
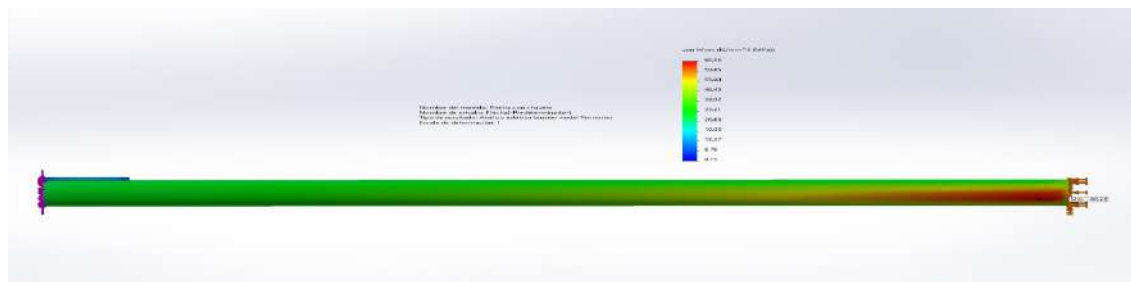
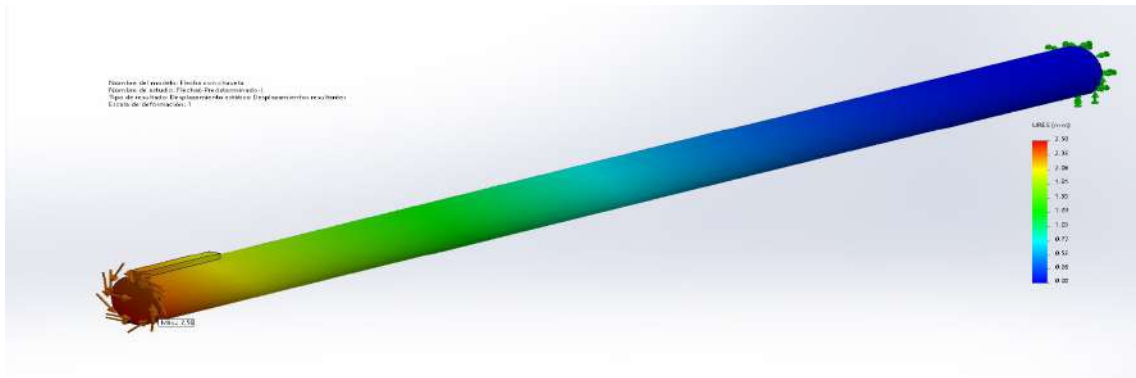


Figura 7. Esfuerzos de Von Mises de la flecha



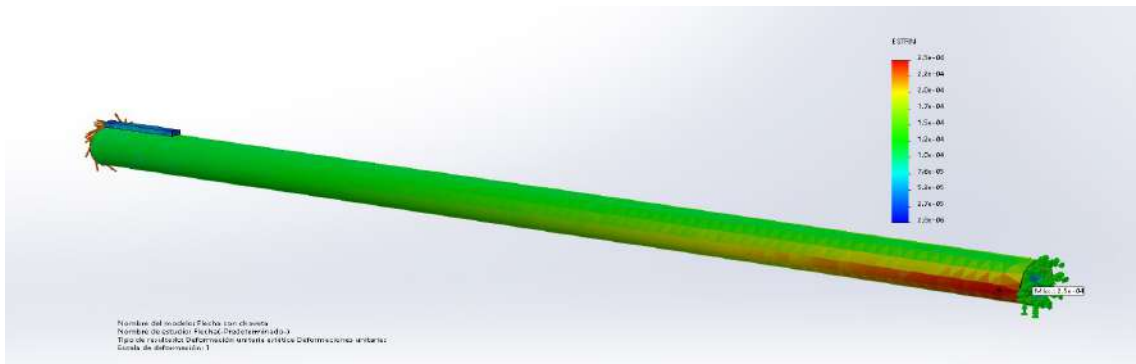
Con relación a los desplazamientos resultantes, se observa en la figura 8, que la zona donde se generan estas es donde se aplica el momento torsor, y es igual a 28.58 mm, menor al permisible igual a 30.0 mm.

Figura 8. Desplazamientos resultantes de la flecha



La deformación unitaria máxima en la flecha es de 2.5×10^{-4} y se ubica cerca de la geometría considerada fija (figura 9).

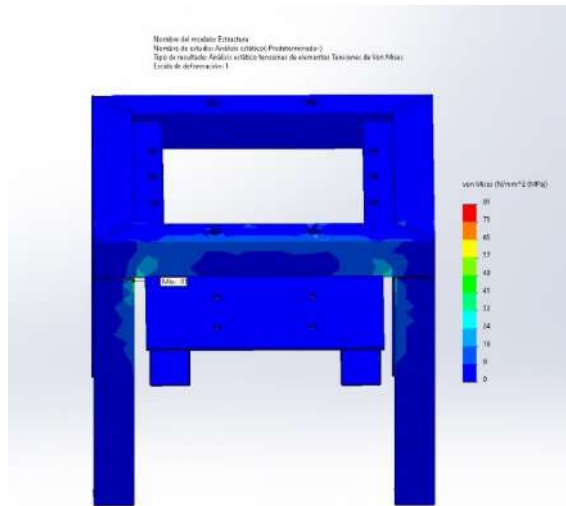
Figura 9. Deformaciones unitarias de la flecha



Estructura

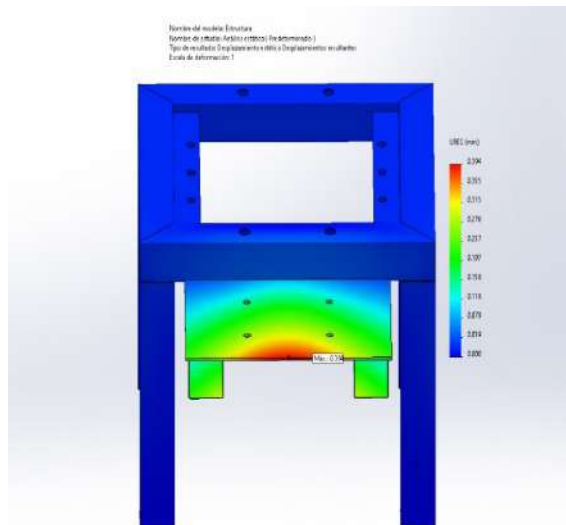
Se realizó el análisis estático, y se obtuvo el esfuerzo máximo al aplicar las cargas sobre la estructura, siendo el mayor igual a 81 MPa (figura 9), y se concentra en una de las caras del marco debido a que en esa zona también se encuentra la lámina que sostiene el peso del motor y el reductor de velocidad.

Figura 10. Esfuerzos de Von Mises en la estructura



Con relación al análisis de los desplazamientos resultante que se generan una vez aplicada las cargas, se observa en la figura 10, que la mayor magnitud es igual a 0.39 mm, prácticamente insignificante, y surge en la parte de la lámina más alejada al centro de la máquina.

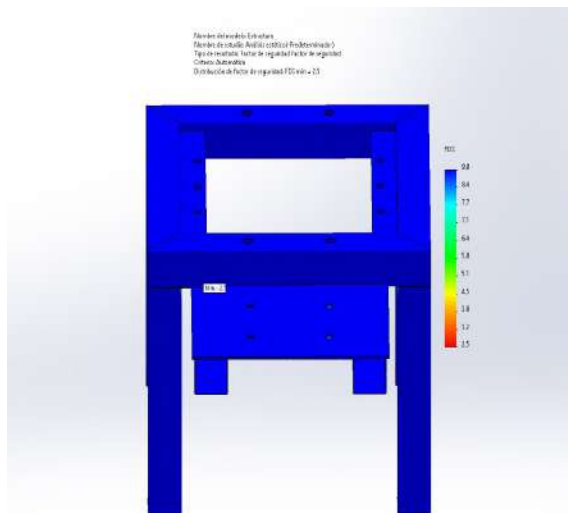
Figura 11. Desplazamientos resultantes en la estructura



Factor de seguridad.

Finalmente, se analiza por el método de elementos finitos, el factor de seguridad, parámetro muy importante para validar los resultados anteriormente alcanzados, y es igual a 2.5 (figura 12), lo que indica que es suficiente para la estructura, debido a que el esfuerzo máximo se encuentra en un pequeño punto, y la carga debido al peso de la estructura es identificada con alta certeza.

Figura 12. Factor de seguridad de la estructura



CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó el prototipo de máquina para la trituración del PET, destinado al ejido Palma Cuata, Ignacio de la Llave, Veracruz, teniendo en cuenta el desecho más común que se encuentra de forma doméstica, los envases de bebidas, estos, por lo general, no son mayores a 3 litros de capacidad.

El análisis de las cargas, esfuerzos y desplazamientos fueron validados con el empleo del análisis por elementos finitos, lo que el diseño y construcción de máquina es viable teniendo un elevado coeficiente de seguridad.

BIBLIOGRAFÍA

- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2021). *Mecánica de materiales*. Editorial McGraw-Hill Interamericana. P25.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Editorial McGraw-Hill. pp 418-425.
- Castro, Á. A. (Ed.). (2023). *¿Qué es y cómo funciona el reciclaje mecánico de plásticos?* Plastic

Technology México. <https://www.pt-mexico.com/articulos/que-es-y-como-functiona-el-reciclaje-mecanico-de-plasticos>.

Pecorini, T. J., & Hertzberg, R. W. (1993). The fracture toughness and fatigue crack propagation behaviour of annealed PET. *Polymer*, 34(24), 5053–5062. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(93\)90248-9](https://doi.org/10.1016/0032-3861(93)90248-9).

Asociación Nacional de Industrias del Plástico, A. C. (2021). *2° Informe del acuerdo nacional para la nueva economía del plástico en México*. <https://anipac.org.mx/wp-content/uploads/2021/12/2o-INFORME-Acuerdo-Nal-Plasticos-6-12-21.pdf>.

Asociación Nacional de Industrias del Plástico, A. C. (2021). *2° Informe del acuerdo nacional para la nueva economía del plástico en México*. <https://anipac.org.mx/wp-content/uploads/2021/12/2o-INFORME-Acuerdo-Nal-Plasticos-6-12-21.pdf>

Ecología y Compromiso Empresarial. (2023). *Cifras y estadísticas*. COCE. <https://www.ecoce.mx/cifras-y-estadisticas>

The Association of Plastic Recyclers. (2023). *APR design guide*. <https://plasticsrecycling.org/apr-design-guide>

WEG. (2023). *Motor 2 HP 4P G56H 1F 115/208-230 V 60 Hz IC01 - ODP - Con pies*. <https://www.weg.net/catalog/weg/MX/es/Motores-El%C3%A9ctricos/Motor-de-Inducc%C3%ADon---NEMA/Usos-Generales/ODP-Rolled-Steel/Steel-Motor/Motor-2-HP-4P-G56H-1F-115-208-230-V-60-Hz-IC01---ODP---Con-pies/p/10679078>

Capítulo III

**Luis Tonatiuh Castellanos Serrano¹, Francisco Pérez Martínez²
y María Victoria Gómez Águila¹**

Diseño y evaluación de un suavizador de agua sanitaria basado en electromagnetismo para redes hidráulicas en Puebla, México

RESUMEN

En 2024, en colaboración con Ingeniería Solar Aplicada de Puebla S.A. de C.V., se desarrolló un prototipo de suavizador de agua basado en principios de electromagnetismo para mitigar los problemas asociados a la dureza del agua en redes hidráulicas residenciales y comerciales en Puebla, México. La dureza del agua, provocada por altas concentraciones de carbonatos de calcio y magnesio, genera incrustaciones que afectan la eficiencia de los sistemas hidráulicos, incrementan el consumo energético y elevan los costos de mantenimiento. Este proyecto tuvo como objetivo diseñar y evaluar un dispositivo eficiente, económico y sostenible que emplea campos electromagnéticos generados por bobinas para modificar temporalmente la estructura de los minerales responsables de la dureza sin alterar la composición química del agua. El desarrollo incluyó circuitos NE555, bobinas de cobre, transformadores y herramientas de diseño y simulación como Proteus y SolidWorks para optimizar el prototipo. Se realizaron pruebas controladas en laboratorio, evaluando la reducción del sarro y comparando el rendimiento con dispositivos comerciales. Los resultados mostraron una reducción efectiva de la formación de incrustaciones, con costos de fabricación significativamente menores (aproximadamente \$2,500 MXN) comparados con dispositivos comerciales (\$3,400-\$12,000 MXN). El diseño demostró viabilidad técnica, accesibilidad económica y beneficios ambientales, aunque se identificó la necesidad de validar su desempeño en condiciones reales y optimizar su diseño. Este trabajo representa un avance hacia soluciones sostenibles para el tratamiento del agua, contribuyendo a la accesibilidad tecnológica y al manejo responsable de los recursos hídricos en México.

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. CIISCINASyC. Texcoco, km 38.5. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. México.

² Egresado Programa educativo Ingeniería Mecatrónica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Zootecnia. Carretera México-Texcoco, km 38.5. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. México. 26b17 franciscoperez@gmail.com correo: lcastellanos@chapingo.mx; mgomeza@chapingo.mx

Palabras Clave: Suavizador de agua, electromagnetismo, dureza del agua, sostenibilidad.

ABSTRACT

In 2024, in collaboration with Ingeniería Solar Aplicada de Puebla S.A. de C.V., a prototype water softener based on electromagnetic principles was developed to mitigate the problems associated with water hardness in residential and commercial hydraulic networks in Puebla, Mexico. Water hardness, caused by high concentrations of calcium and magnesium carbonates, generates scale deposits that affect the efficiency of hydraulic systems, increase energy consumption, and raise maintenance costs. This project aimed to design and evaluate an efficient, economical, and sustainable device that employs electromagnetic fields generated by coils to temporarily modify the structure of hardness-causing minerals without altering the chemical composition of the water. The development included NE555 circuits, copper coils, transformers, and design and simulation tools such as Proteus and SolidWorks to optimize the prototype. Controlled tests were conducted in the laboratory, evaluating scale reduction and comparing performance against commercial devices. Results showed effective reduction in scale formation, with significantly lower manufacturing costs (approximately \$2,500 MXN) compared to commercial devices (\$3,400–\$12,000 MXN). The design demonstrated technical feasibility, economic accessibility, and environmental benefits; however, the need to validate its performance under real-world conditions and optimize its design was identified. This work represents a step toward sustainable solutions for water treatment, contributing to technological accessibility and responsible management of water resources in Mexico.

Keywords: Water softener, electromagnetism, water hardness, sustainability

INTRODUCCIÓN

En las actividades y procesos industriales así como los agrícolas el agua es un recurso vital. Sin embargo, no toda el agua disponible cumple con las características óptimas para su uso, ya sea por la presencia de contaminantes o por su composición química natural. Uno de los problemas más comunes es la “dureza del agua”, provocada por altas concentraciones de minerales como carbonatos de calcio y magnesio, que afectan la funcionalidad de redes hidráulicas, sistemas de calefacción y electrodomésticos. Esta situación es relevante en regiones como Puebla, donde las condiciones geológicas y climáticas contribuyen a la presencia de aguas duras.

Según la clasificación de la Organización Mundial de la Salud (OMS), se define como agua dura a dureza en el agua es una característica que se produce por una variedad de iones metálicos polivalentes disueltos, predominantemente cationes de calcio y magnesio, como bicarbonato, carbonato, sulfato, cloruro y nitrato. Se considera que el agua es dura cuando supera los 60 mg/l de concentración.

El impacto de la dureza del agua es significativo, tanto en términos económicos como funcionales. La acumulación de sarro en las tuberías y equipos reduce su eficiencia, incrementa el consumo energético y acorta la vida útil de los sistemas. De acuerdo a la OMS (2024) el agua con una dureza mayor a 200 mg/l, junto con factores como el pH y la alcalinidad, puede provocar

la formación de incrustaciones en las instalaciones de tratamiento, el sistema de distribución, y las tuberías y depósitos de los edificios. Además, provoca un consumo excesivo de jabón, con la consiguiente formación de restos insolubles de jabón

En el ámbito doméstico, el agua dura genera inconvenientes como el uso excesivo de detergentes, formación de manchas en superficies y dificultades en la limpieza (Carmona, 2018). Así mismo, Melitón y Rosado (2008) expone que el consumo prolongado de aguas que presenta >120 mg/L de Carbonato de Calcio (CaCO_3) presentan un factor de riesgo en la producción de cálculos en las vías urinarias. Estos problemas subrayan la importancia de desarrollar soluciones efectivas para tratar la dureza del agua y garantizar su calidad.

Actualmente, existen diversos métodos para abordar la dureza del agua, que van desde tratamientos químicos hasta dispositivos electromagnéticos. Los tratamientos químicos, como el uso de resinas de intercambio iónico, son efectivos pero presentan desventajas significativas con los altos costos, mantenimiento constante y pueden alterar las propiedades organolépticas del agua. Además, estos métodos poco sostenibles en términos ambientales, ya que generan subproductos químicos que deben ser gestionados adecuadamente.

Por otro lado, los tratamientos basados en principios de electromagnetismo han ganado popularidad debido a su capacidad para alterar temporalmente la estructura de los minerales presentes en el agua sin modificar su composición química. Estos dispositivos aplican campos magnéticos que inhiben la formación de cristales sólidos, reduciendo así la acumulación de sarro en las tuberías. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías es limitada por su costo inicial, dificultando su acceso y adquisición en la mayoría de los hogares y pequeñas empresas.

La región de Puebla enfrenta un desafío particular relacionado con la dureza del agua, que impacta directamente en las redes hidráulicas residenciales y comerciales. Este problema se traduce en elevados costos de mantenimiento, ya que la acumulación de sarro requiere la renovación frecuente de las instalaciones. Además, la dureza del agua incrementa el gasto energético al reducir la eficiencia de los sistemas de calentamiento de agua, como calderas y termotanques.

Ante este panorama, surge la necesidad de desarrollar tecnologías accesibles y efectivas para el tratamiento del agua dura. El presente proyecto propone el diseño de un dispositivo suavizador de agua basado en principios de electromagnetismo, con un enfoque de reducir los costos de fabricación y operación. El diseño del dispositivo se busca ofrecer una solución sostenible y que beneficie tanto a los usuarios como al medio ambiente, reduciendo el consumo de energía y las emisiones asociadas al mantenimiento y reemplazo de sistemas hidráulicos.

Asimismo, el diseño se basa en principios fundamentales del electromagnetismo, como las leyes de Faraday, Ampere y Maxwell, que permiten calcular y generar campos magnéticos específicos para modificar temporalmente la estructura de los minerales presentes en el agua. Además, el uso de herramientas de simulación como Proteus y SolidWorks permitirá optimizar el diseño antes de su fabricación, reduciendo los costos y tiempos asociados al desarrollo del prototipo.

El desarrollo del dispositivo suavizador se lleva a cabo en colaboración con la empresa Ingeniería Solar Aplicada de Puebla S.A. de C.V., conocida por su experiencia en soluciones energéticas sostenibles. La propuesta incluye la integración de tecnologías avanzadas, como circuitos RLC y componentes electrónicos semiconductores, que garantizarán la eficiencia y accesibilidad del producto.

Se propone que el dispositivo desarrollado sea capaz de reducir significativamente la dureza del agua en redes hidráulicas residenciales, mejorando la eficiencia de los sistemas y prolongando su vida útil. Además, el bajo costo de fabricación permitirá su comercialización a precios competitivos, facilitando su adopción en hogares y pequeñas empresas.

El proyecto no solo busca resolver un problema técnico específico, sino también contribuir al desarrollo de tecnologías sostenibles y accesibles en México. Al reducir el costo y aumentar la disponibilidad de soluciones para el tratamiento del agua dura, se espera mejorar la calidad de vida de las personas y fomentar prácticas responsables en el uso de los recursos hídricos. Además, la colaboración con Ingeniería Solar Aplicada de Puebla S.A. de C.V., refuerza el compromiso de promover la innovación tecnológica en el ámbito de las energías renovables y la sostenibilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo y evaluación del prototipo de suavizador de agua sanitaria, se utilizaron los siguientes materiales y herramientas:

1. Componentes Electrónicos:

- Circuitos integrados NE555 configurados para generar pulsos electromagnéticos.
- Resistencias, capacitores y diodos para la regulación y dirección de la corriente.
- Transformador de 127Vca a 12Vcd.
- Bobinas de alambre de cobre con núcleos de diferentes permeabilidades.

2. Software de Diseño y Simulación:

- **Proteus 8.12:** Para la simulación de circuitos electrónicos y análisis del comportamiento eléctrico.
- **SolidWorks:** Utilizado para el diseño asistido por computadora de la carcasa y otros componentes del prototipo.

3. Herramientas de Fabricación de PCB:

- Placa fenólica.
- Cloruro férrico para grabado químico.
- Plancha de transferencia térmica para impresión de pistas en la placa.

4. Equipos para Montaje:

- Protoboard para pruebas iniciales.

- Soldadores y estaño para conexiones finales.
- Fuente de alimentación externa de 12V.

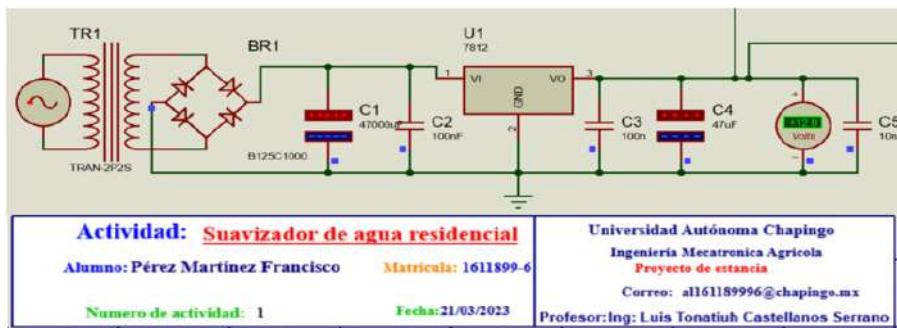
1. Diseño del Sistema Eléctrico

El desarrollo del sistema eléctrico comenzó con la configuración de una fuente de alimentación lineal para convertir una entrada de 127Vca a una salida estable de 12Vcd. Para la fuente de alimentación incluyó:

- 1 transformador para la reducción de tensión de 127-12V de 1.5 A con tap central
- 1 puente rectificador de diodos BR34 para convertir corriente alterna en directa.
- 1 capacitor de 2200 μ F a 20V para suavizar la señal.
- Reguladores LM7812 para estabilización la salida.

Una vez realizado la configuración electrónica de las bobinas para la generación de pulsos con cierta frecuencia, así como los cálculos de campo magnético del solenoide y del campo magnético para la verificación de la permeabilidad magnética relativa, se procedió a realizar el diseño y simulación de la fuente de alimentación. El circuito RLC implementado permitió la generación de pulsos electromagnéticos transmitidos a las bobinas. Este diseño se fundamentó en las leyes de Faraday y Ampere-Maxwell.

Figura 1. Diagrama del circuito de alimentación diseñado en Proteus (Autoría Propia).



2. Simulación en Laboratorio Virtual

Para la validación de los datos y parámetros eléctricos del sistema se llevó a cabo a través de Proteus 8.12 para lo cual se siguieron los siguientes pasos:

1. Comprobación de la estabilidad de la salida de 12V en la fuente de alimentación (ver Figura 2).
2. Análisis del comportamiento de las bobinas e integrados NE555 para verificar la generación de pulsos electromagnéticos (Ver Figura 3)

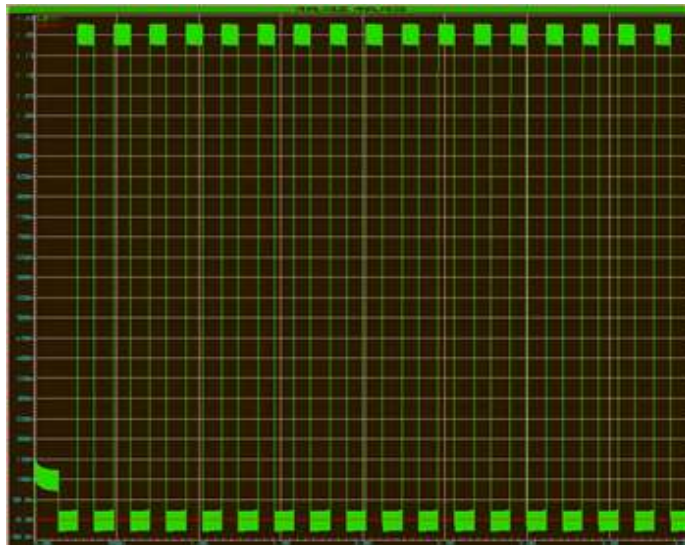
Los resultados fueron representados gráficamente para observar la intensidad de corriente y la estabilidad del campo magnético generado.

Figura 2. Resultado de la simulación de la fuente de alimentación (Autoría Propia).



3. Fabricación del prototipo suavizador

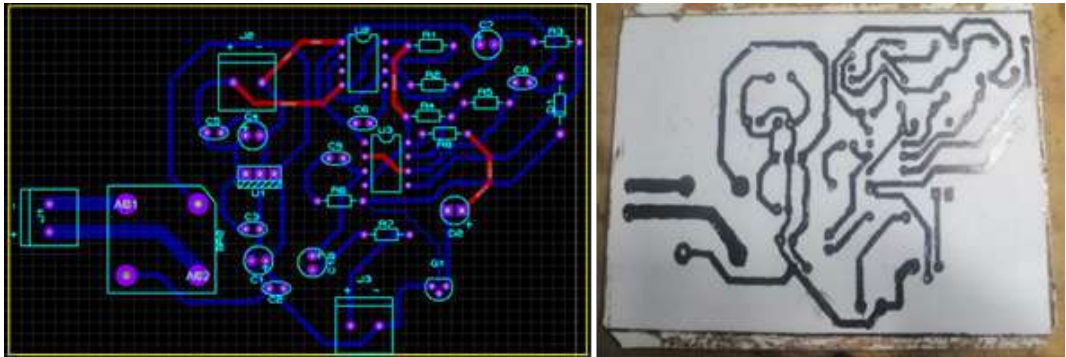
Figura 3. Grafica del comportamiento del suavizador en los inductores (Autoría Propia).



El montaje inicial se realizó en un protoboard, seguido de la fabricación de una PCB (Placa de Circuito Impreso) para alojar los componentes electrónicos. Este proceso de fabricación incluyó lo siguientes pasos:

1. Diseño de pistas en Proteus.
2. Transferencia térmica del diseño a una placa fenólica.
3. Grabado químico con cloruro férrico para eliminar cobre no deseado.
4. Limpieza, perforación y soldadura de componentes.

Figura 4. A) Pistas de PCB elaboradas; b) Placa fenólica perforada para ser soldada (Autoría Propia).

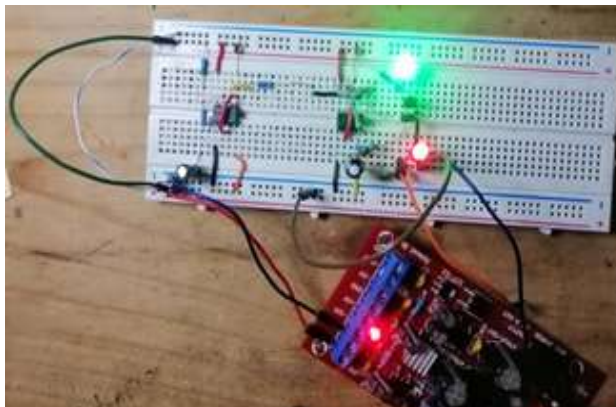


4. Ensamblaje del prototipo

El armado y ensamblaje final consistió en los siguientes pasos:

1. Montaje de las bobinas alrededor de una tubería simulada.
2. Integración del circuito de alimentación con una fuente de entrada externa.
3. Instalación de indicadores LED para verificar la correcta circulación de la corriente en el sistema.

Figura 5. Vista superior del prototipo ensamblado (Autoría Propia).



1. Pruebas de funcionalidad

Las pruebas del prototipo incluyeron:

1. Medición del campo magnético generado por las bobinas utilizando un amperímetro.
2. Evaluación de la capacidad del sistema para reducir la dureza del agua mediante pruebas comparativas con muestras controladas.
3. Análisis del rendimiento del dispositivo frente a productos comerciales.

Los resultados preliminares mostraron que el sistema puede generar campos magnéticos lo suficientemente fuertes como para alterar temporalmente la estructura de los cristales de calcio y magnesio, logrando una reducción efectiva en la formación de sarro en las tuberías simuladas.

De manera física los valores arrojados por la fuente de poder son iguales a los arrojados en el simulador Proteus y por ende, es correcto el funcionamiento del dispositivo ablandador de agua para uso sanitario.

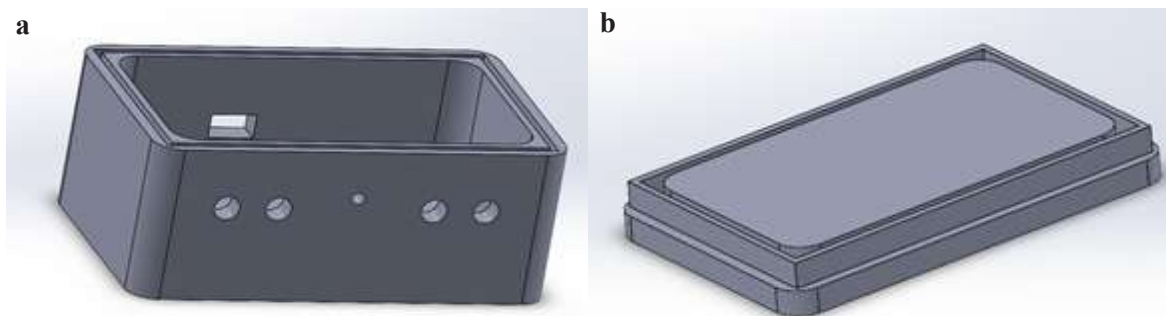
Figura 6. Prototipo operativo en pruebas funcionales (Autoría Propia).



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de estuche contenedor se realizó en SolidWorks en dos partes como se muestra a continuación:

Figura 7. Modelo de estuche contenedor para suavizador a) vista frontal de base de estuche;
b) tapa del case vista superior (Autoría Propia).



Una vez maquinado, se procedió al armado y presentación final (figura 8).

Figura 8. Vista frontal del Suavizador (Autoría Propia).



Siguiendo con la metodología de diseño, una vez que se procedió a la manufactura, ensamble, puesta en marcha y evaluación del equipo, se realizó una comparación con un producto existente en el mercado para contrastar su costo y rentabilidad. Los resultados a parecen en el cuadro 1.

Cuadro 1. Comparación del producto (Autoría Propia).

Producto obtenido	Modelo existente (ss-1-Helvex acondicionador)
	
Costo: 1,000.00 MNX (precio estimado)	Costo: 6,336.00 MNX (costo al momento de elaborar este trabajo)
Funcionamiento: El dispositivo se basa en la integración de dos unidades de control de frecuencia configuradas para operar en un rango específico que permite alterar las propiedades del agua sin contacto directo. Estas frecuencias, diseñadas para ser imperceptibles tanto visual como auditivamente, aseguran una experiencia cómoda para el usuario. El dispositivo genera ondas electromagnéticas que interactúan principalmente con los compuestos del “grupo 2”, como el carbonato de calcio y el carbonato de magnesio. Al someter estos minerales a un tratamiento continuo, las ondas evitan la cristalización y la formación de sedimentos. Este proceso inhibe la acumulación de sarro en las tuberías, mejorando la eficiencia y prolongando la vida útil de los sistemas hidráulicos.	Funcionamiento: Usa tecnología de un microprocesador para generar en forma electrónica ondas inaudibles que disuelven o suspenden partículas de carbonato de calcio en el agua
Dimensiones: 16.02 cm * 10.14 cm	Dimensiones: 9.9 cm *19.3 cm

Fuente: Autoría Propia

En cuanto al funcionamiento de la fuente de alimentación, la simulación del sistema eléctrico diseñado en Proteus mostró una salida estable de 12.03 VCD, lo cual es consistente con los requerimientos operativos del circuito. Esta estabilidad se logró gracias a la integración del regulador LM7812 y los capacitores de filtrado. Las gráficas generadas evidenciaron que la ondulación de la señal se mantuvo por debajo de los límites aceptables, confirmando la eficiencia de la fuente en la entrega de potencia constante.

Referente a las pruebas realizadas en las bobinas, estas mostraron que la intensidad de corriente inducida osciló alrededor de 1.2 A, generando un campo magnético adecuado para alterar la estructura mineral del agua dura. Estas pruebas se alinearon con los cálculos realizados utilizando las leyes de Faraday y Ampere-Maxwell, lo que respalda la validez teórica del diseño.

Las gráficas generadas en Proteus demostraron que los pulsos magnéticos son consistentes y cumplen con los parámetros necesarios para afectar temporalmente los minerales responsables de la dureza del agua.

El costo total de fabricación del prototipo fue notablemente inferior al de dispositivos comerciales disponibles en el mercado, cuyos precios oscilan entre \$3,400 y \$12,000 MXN. Al comparar con dispositivos comerciales, el prototipo ofrece un desempeño similar a una fracción del costo, lo que aumenta su potencial para ser implementado en mercados residenciales y rurales.

Aunque los resultados son prometedores, las pruebas se llevaron a cabo en condiciones controladas. Es necesario realizar evaluaciones en diferentes contextos, incluyendo variaciones de dureza del agua y volúmenes mayores, para validar completamente la eficacia del dispositivo en condiciones reales.

CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo suavizador de agua basado en principios de electromagnetismo demostró ser una solución eficiente, accesible y sostenible para abordar los problemas derivados de la dureza del agua en sistemas hidráulicos residenciales. Al utilizar pulsos electromagnéticos generados por circuitos económicos y accesibles, se logró evitar la cristalización de compuestos como el carbonato de calcio y magnesio, reduciendo significativamente la formación de sarro y prolongando la vida útil de las tuberías.

La validación técnica del dispositivo, tanto en simulaciones como en pruebas prácticas, confirmó su viabilidad y su capacidad para operar sin contacto directo con el agua, lo que garantiza una experiencia segura y cómoda para el usuario. Además, el bajo costo de producción, aproximadamente \$1,000.00 MXN, lo posiciona como una alternativa competitiva frente a dispositivos comerciales cuyo costo es considerablemente mayor.

Si bien los resultados obtenidos son prometedores, se identificaron áreas de oportunidad para futuras investigaciones. Entre ellas, se destaca la necesidad de evaluar el rendimiento del dispositivo en condiciones reales, considerar diferentes niveles de dureza del agua, y optimizar su diseño para maximizar la eficiencia energética y la durabilidad de sus componentes.

La presente investigación no solo aporta una solución técnica al problema de la dureza del agua, sino que también contribuye al desarrollo de tecnologías accesibles para un público amplio, reforzando el compromiso con la sostenibilidad económica y ambiental. Este enfoque establece una base sólida para la implementación de dispositivos electromagnéticos en el tratamiento de agua y abre la puerta a nuevas mejoras y aplicaciones en este campo.

LITERATURA CITADA

- Canadá, M. (2024). La dureza del agua: efectos, directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y regulaciones en diferentes países.
- Carmona, K. (2018). Facultad de farmacia y bioquímica y bioquímica, Determinación de plomo y dureza cálcica en agua de consumo humano de Caja de Agua, San Juan de Lurigancho, Febrero – Marzo 2017 Tesis para optar el Título Profesional de Químico Farmacéutico.
- Julian Soto, F. (2009). *La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias*. Oaxaca: CIIDIR-Instituto Politécnico Nacional-Oaxaca.
- La Dureza del agua. (N.d.). Facsa.com. Retrieved September 4, 2024, from <https://www.facsa.com/municipios/wp-content/uploads/2016/02/Facsa-dureza-del-agua-Alcora.pdf>
- Melitón, W. & Rosado, F. (2008) “Impacto en la salud por consumo de agua dura en pobladores de la parte baja del río Chili, Arequipa, Perú”. (Tesis de investigación). Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.
- Sergio Matínez Moya, N. B. (2019). *TÉCNICAS ELECTROMAGNETICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS Y DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO CON DISPOSITIVO TK3K*. orihuela: Congreso Nacional del agua.
- Yarna. (15 de 11 de 2023). *Amazon*. Obtenido de Sistema descalcificador de agua electronico capacitivo: suavizante alternativo sin sal para toda la casa, reduce los efectos de la cal [CWD30, tubo máximo de 2 pulgadas]: Amazon.com.mx: Herramientas y Mejoras del Hogar. (2023). Amazon.com.mx. https://www.amazon.com.mx/descalcificador-capacitivo-suavizante-alternativo-formaci%C3%B3n/dp/B085ZZM4SG/ref=asc_df_B085ZZM4SG/?tag=gledskshopmx-20&linkCode=df0&hvadid=450874338630&hv

Capítulo IV

Daniel Sepúlveda Jiménez¹ y Daniel Eduardo Sepúlveda Robles¹

Análisis de sistemas y modelos hipercaóticos en 5D y 6D

RESUMEN

En este trabajo se analiza la dinámica compleja, hipercaótica, para un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden no lineal acopladas en 5D propuesto por Qiang Wei y Hong Niu y para un modelo en 6D propuesto por Michael Kopp y Andrii Kopp. Estudiar y analizar este tipo de sistemas y modelos permite entender la dinámica compleja que se encuentra al resolver sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales acopladas en 5D y 6D y extender el análisis a mas dimensiones. También este tipo de análisis permite probar el software existente como el Matlab-Simulink, el Mathematica y otro tipo de software similar. Para el sistema en 5D y el modelo en 6D se calculan los exponentes de Lyapunov lo cual permite inferir la naturaleza hipercaótico del sistema y del modelo. También se obtienen las gráficas de cada una de las variables de estado en función del tiempo, algunas gráficas paramétricas y diagramas de bifurcación. Estos resultados permiten mostrar la dinámica hipercaótica presente en el sistema 5D y en el modelo 6D.

Palabras clave: Hipercaós, sistemas hipercaóticos, exponentes de Lyapunov, bifurcación, dinámica compleja.

ABSTRACT

In this work, the complex, hyperchaotic dynamics of a 5D coupled nonlinear first-order differential equation system proposed by Qiang Wei and Hong Niu and a 6D model proposed by Michael Kopp and Andrii Kopp are analyzed. Studying and analyzing these types of systems and models allows us to understand the complex dynamics encountered when solving 5D and 6D coupled nonlinear differential equation systems and to extend the analysis to more dimensions. This type of analysis also allows us to test existing software such as Matlab-Simulink, Mathematica, and other similar software. For the 5D system and the 6D model, the Lyapunov exponents are calculated, which allows us to infer the hyperchaotic nature of the system and the model. Plots of each of the state

¹ Centro de Investigación en Economía y Matemáticas Aplicadas de la UACH. sepjim700@yahoo.com.mx; hbky2d@yahoo.com.mx

variables as a function of time, some parametric plots, and bifurcation diagrams are also obtained. These results show the hyperchaotic dynamics present in the 5D system and in the 6D model.

Keywords: Hyperchaos, hyperchaotic systems, Lyapunov exponents, bifurcation, complex dynamics.

INTRODUCCIÓN

El caos es un movimiento aleatorio irregular producido por un sistema dinámico no lineal determinista, sensible al cambio en las condiciones iniciales [Lu J. y Chen G. (2002)]. Los métodos de integración numéricos de ecuaciones diferenciales no lineales, y especialmente el rápido desarrollo de la tecnología informática han brindado la posibilidad de realizar investigaciones en profundidad sobre caos. En los últimos 20 años, el caos es una teoría a la que se le ha dedicado mucha investigación, esta teoría ha recibido mucha atención debido a sus aplicaciones en Física, Ingeniería, Economía, Reactores Químicos, Teoría de Control, Redes Biológicas, Redes Neuronales Artificiales y Telecomunicaciones entre otras aplicaciones.

El hipercaos fue reportado por primera vez por Rossler [Rossler, (1979)], con su sistema hipercaótico de cuatro dimensiones. Un sistema hipercaótico es un sistema caótico con más de un exponente de Lyapunov positivo y por lo tanto su dinámica es más compleja.

Hipercaótico significa que el sistema tiene comportamientos dinámicos más complejos que un sistema caótico. Las aplicaciones del hipercaos se han convertido recientemente en un tema central de investigación sobre todo en las últimas dos décadas, también se encontraron algunos sistemas generadores de hipercaos interesantes y se ha estudiado su dinámica, investigando con profundidad debido a su aplicación en distintas ramas de la ciencia.

Se ha encontrado tanto en estudios teóricos como experimentales, sistemas caóticos con múltiples exponentes de Lyapunov positivos, que es precisamente una propiedad fundamental del hipercaos [Wolf, A. y col., (1985)] y [Wu, W. J. y Chen, Z. Q., (2010)]. Al explorar la literatura científica se encuentra que en los últimos 15 años varios trabajos para la construcción de sistemas hipercaóticos por lo que es importante su estudio y análisis.

Para obtener hipercaos, el sistema debe cumplir dos requisitos importantes. En primer lugar, la dimensión mínima del espacio de fases que integra un atractor hipercaótico debe ser de al menos cuatro, lo que requiere que el número mínimo de ecuaciones diferenciales ordinarias autónomas de primer orden acopladas sea cuatro. En segundo lugar, el número de términos en las ecuaciones acopladas que dan lugar a la inestabilidad debe ser al menos dos, de los cuales al menos uno debe tener una función no lineal. [T. G. Gao y Col. (2007)].

Algunos trabajos de investigación recientes sobre hipercaos y sus métodos de control son: Lin Cao, quien estudia un sistema financiero hipercaótico de dimensión cuatro y su problema de control [Lin Cao, (2018)], Sundarapandian y colaboradores que analizan un sistema financiero de dimensión tres y su realización en un circuito electrónico y obtienen un controlador global sincronizando las trayectorias de estado [Sundarapandian y col. (2019)], Erfeng Xu y colaboradores que analizan el

modelo financiero propuesto por Yu y colaboradores [H. Yu y col. (2012)], el cual es un sistema hipercaótico, Xia Lu quien analiza un sistema financiero hipercaótico y su control basado en un controlador intermitente [Xia Lu, (2020)], Lei Gong que analiza un sistema financiero de dimensión cuatro desde el punto de vista de torca y energía [Lei Gong, (2022)]. Babalola M. I. y colaboradores quienes estudian un sistema financiero de dimensión cuatro y su control por medio de la técnica de control pasivo [Babalola y col., (2018)], Amin Zarei quien analiza un sistema hipercaótico de dimensión cinco y sus múltiples atractores caóticos [Amin Zarei, (2015)].

METODOLOGÍA

En este trabajo se analizan: Un sistema de ecuaciones diferenciales que muestra una dinámica hipercaótica propuesto por Qiang Wei y Hong Niu, y un modelo matemático también con dinámica hipercaótica propuesto por Michael Kopp y Andrii Kopp, el sistema se compone de 5 ecuaciones diferenciales no lineales acopladas, mientras que el modelo describe la convección débilmente no lineal en un fluido eléctricamente conductor que gira de forma no uniforme en un campo magnéticamente constante. El modelo se puede analizar por medio de 6 ecuaciones diferenciales acopladas no lineales. Para llevar a cabo el estudio y análisis dinámico del sistema y del modelo se calculan para cada uno de ellos sus exponentes de Lyapunov, se obtienen las trayectorias de cada una de las variables de estado por medio de integración numérica con ayuda del software MATHEMATICA, también se obtienen las graficas paramétricas y los diagramas de bifurcación para algunos de los parámetros involucrados en el sistema y en el modelo. El análisis se lleva cabo con diferentes valores iniciales para cada una de las variables de estado. Para finalizar se presentan las conclusiones correspondientes.

El sistema de Qiang Wei y Hong Niu. [Qiang W y Hong N, 2021 y Hong N, 2022]

Las ecuaciones dinámicas del sistema hipercaótico 5D son:

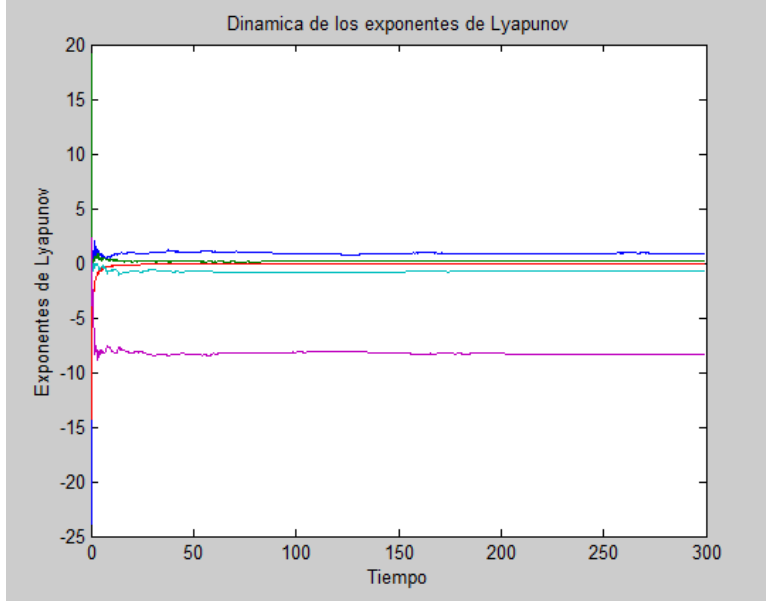
$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) \\ \dot{y} = (c - a)x + cy + w - xz \\ \dot{z} = -bz + xy \\ \dot{v} = mw \\ \dot{w} = -y - hv \end{cases} \quad (1)$$

Donde las variables de estado $x, y, z, v, w \in \mathbb{R}$ y los parámetros son: $a = 23, b = 3, c = 18, m = 12$ y $h = 4$. Las condiciones iniciales son: $x(0) = 1, y(0) = 2, z(0) = 1, v(0) = 2, w(0) = 1$

Exponentes de Lyapunov

Con ayuda de una adaptación al programa de Vasili Govorukhin [Vasili G. (2025)], se calculan los exponentes de Lyapunov para este modelo. La figura (1), muestra la dinámica de los exponentes de Lyapunov, se tienen dos coeficientes de Lyapunov positivos lo cual indica que el sistema es hipercaótico.

Figura (1). Los Exponentes de Lyapunov son:
 $L_1 = 0.916720$, $L_2 = 0.174812$, $L_3 = -0.009639$, $L_4 = -0.710270$, $L_5 = -8.371623$



Elaboración propia.

La suma de los exponentes de Lyapunov del sistema hipercaótico gobernado por las ecuaciones (1) es negativo, lo cual indica que el sistema es disipativo.

$$L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 = -8.0 < 0 \quad (2)$$

Gráficas de las variables de estado.

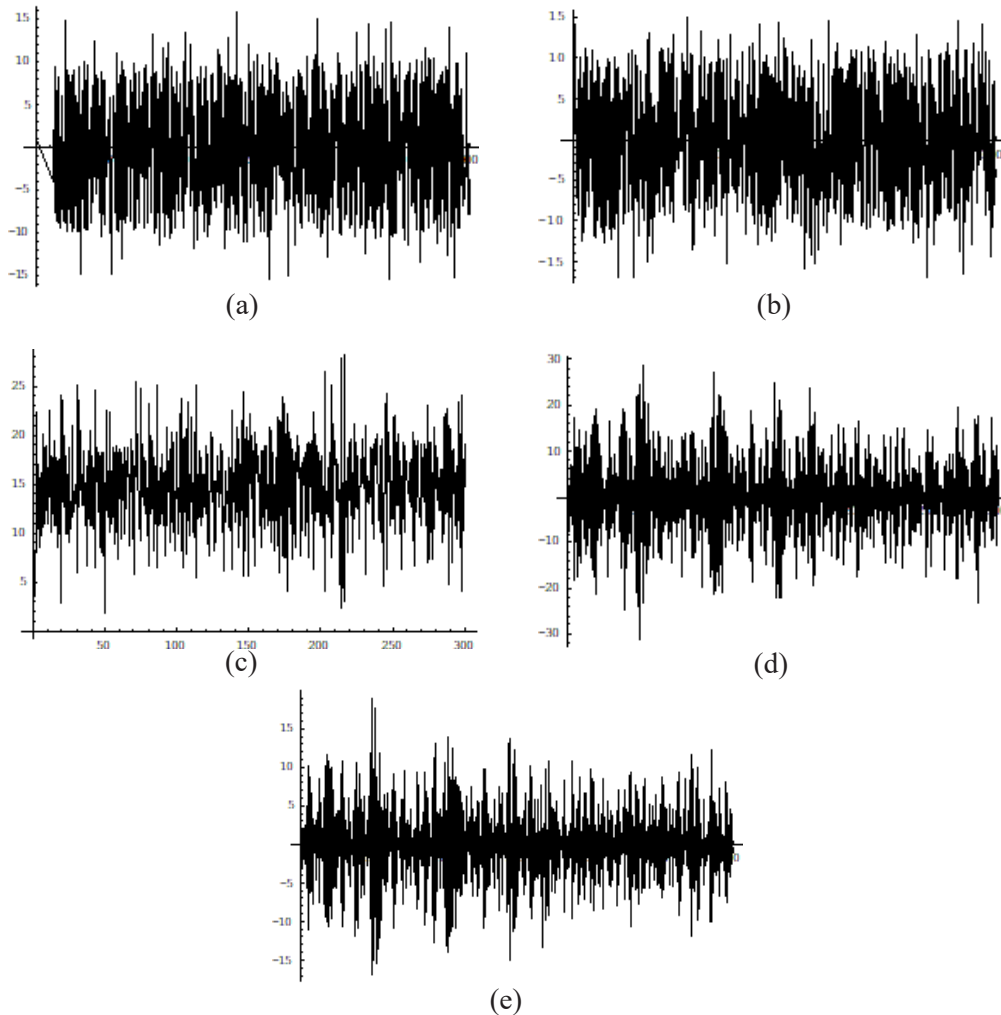
En esta sección se presenta el comportamiento dinámico del sistema gobernado por el sistema de ecuaciones diferenciales (1). Para llevar a cabo las simulaciones del sistema propuesto los parámetros usados son: $a = 23$, $b = 3$, $c = 18$, $m = 12$, $h = 4$, y el punto inicial $P_0 = (1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0)$

Para estos valores de los parámetros se obtuvieron las gráficas para el comportamiento temporal de cada una de las variables involucradas. Las gráficas muestran un comportamiento aleatorio y muy sensible a cambio en las condiciones iniciales como es el caso de un sistema hipercaótico, como es corroborado por medio del cálculo de los exponentes de lyapunov. Las gráficas se muestran en la figura (2). De estas gráficas se concluye que el rango de variación de cada una de las variables de estado es:

$$x \in [-15, 15], \quad y \in [-16, 16], \quad z \in [0, 30], \quad v \in [-30, 30], \quad w \in [-20, 20]$$

Gráficas x, y, z, v, w contra el tiempo

Figura (2). Comportamiento temporal de las variables de estado indicadas en el sistema de ecuaciones diferenciales (1) con parámetros $a=23, b=3, c=18, m=12, h=4.0$ y condiciones iniciales $P_0=(1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0)$.
(a) x contra t; (b) y contra t; (c) z contra t y (d) v contra t, (e) w contra t.

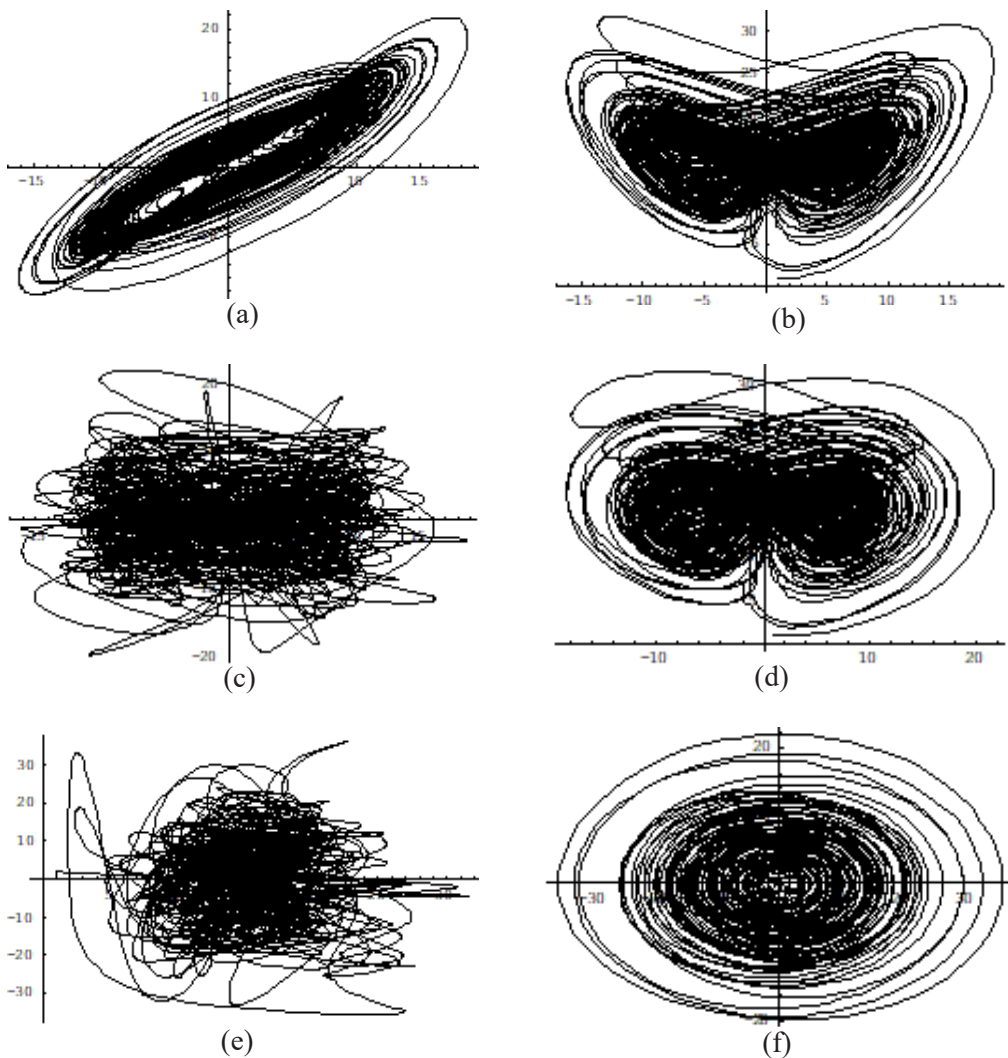


Elaboración propia.

Gráficas Paramétricas

También se elaboraron algunas gráficas paramétricas del modelo, se muestran en la figura (3), estas son: (a) Proyección sobre el plano x contra y; (b) Proyección sobre el plano x contra z; (c) Proyección sobre el plano x contra w; (d) Proyección sobre el plano y contra z; (e) Proyección sobre el plano z contra v y (h) Proyección sobre el plano v contra w. Estas gráficas permiten destacar la complejidad de las trayectorias entre cada par de variables de estado.

Figura (3). Gráficas paramétricas del sistema representado por el sistema de ecuaciones (2) con parámetros $a=23$, $b=3$, $c=18$, $m=12$, $h=4$ y condiciones iniciales $P_0=(1.0,1.0,1.0,1.0,1.0)$.
 (a) Proyección sobre el plano x contra y ; (b) Proyección sobre el plano x contra z ;
 (c) Proyección sobre el plano x contra w ; (d) Proyección sobre el plano y contra z ;
 (e) Proyección sobre el plano z contra v ; (f) Proyección sobre el plano v contra w .

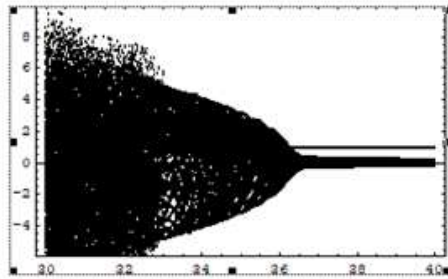


Elaboración propia.

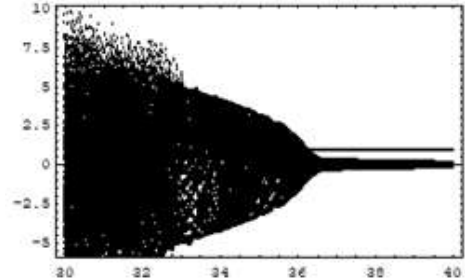
Diagramas de Bifurcación

Otro elemento importante de estudio y análisis de los sistemas caóticos e hipercaóticos, son los diagramas de bifurcación, estos muestran los diferentes valores de cada una de variables de estado para cambios en los parámetros de estado.

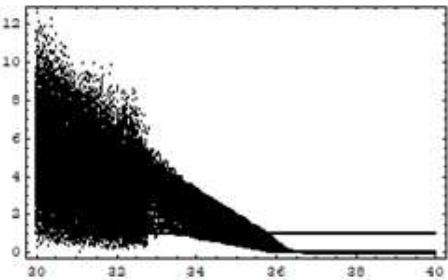
Figura (4). Diagramas de bifurcación de las variables (a) x, (b) y, (c) z, (d) v, (e) w, cuando el parámetro a cambia de 30 a 40. Los otros parámetros se mantienen fijos, su valor es: $b=3.0$; $c=18$; $m=12$; $h=4$.



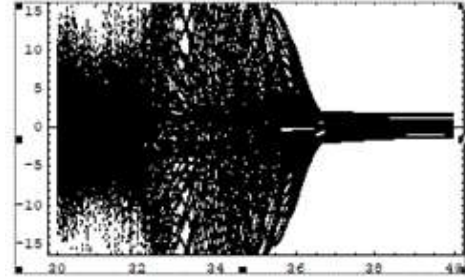
(a)



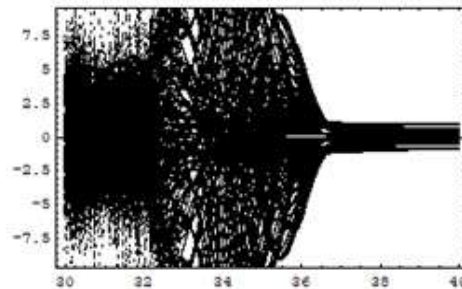
(b)



(c)



(d)



(e)

Elaboración propia.

El modelo de Michael Kopp y Andrii Kopp [M. Kopp y A. Kopp, 2022]

En la siguiente sección se presenta el modelo de Michael Kopp y Andrii Kopp, este describe la convección débilmente no lineal en un fluido eléctricamente conductor que gira de forma no uniforme en un campo magnético constante. Las ecuaciones dinámicas del sistema hipercaótico 6D son, [M. I. Kopp y col; (2018)]:

$$\begin{cases} \dot{X} = -X + RY - TV - HU \\ \dot{V} = -V + HW + \sqrt{Ta}(1 + Ro)X \\ \dot{U} = -Pm^{-1}U + Pr^{-1}X \\ \dot{W} = -Pm^{-1}W - Pr^{-1}V + Ro\sqrt{Ta}U \\ \dot{Y} = Pr^{-1}(-Y + X - XZ) \\ \dot{Z} = Pr^{-1}(-bZ + XY) \end{cases} \quad (3)$$

Donde las variables de estado X, V, U, W, Y, Z son: X y V son amplitudes de las perturbaciones del campo de velocidad, U y W son amplitudes de las perturbaciones del campo magnético y Y y Z son amplitudes de las perturbaciones del campo de temperatura.

H, Ta, T, Pm, Pr, Ro y b son constantes reales, y R (el número de Rayleigh) es un parámetro de bifurcación.

Utilizando los valores de los parámetros $Ta = 1080, T = 0,1, Pm = 1, Pr = 10, b = 8 / 3,$

$Ro = -3 / 4$ y $H = 2$, el sistema de la ecuación (3) queda de la manera siguiente:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 + Rx_2 - 2x_4 - 0.1x_5 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{10}(-x_2 + x_1 - x_1x_3) \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{10}\left(-\frac{8}{3}x_3 + x_1x_2\right) \\ \dot{x}_4 = -x_4 + \frac{1}{10}x_1 \\ \dot{x}_5 = -x_5 + 8.21x_1 + 2x_6 \\ \dot{x}_6 = -x_6 - 24.65x_4 - \frac{1}{10}x_5 \end{cases} \quad (4)$$

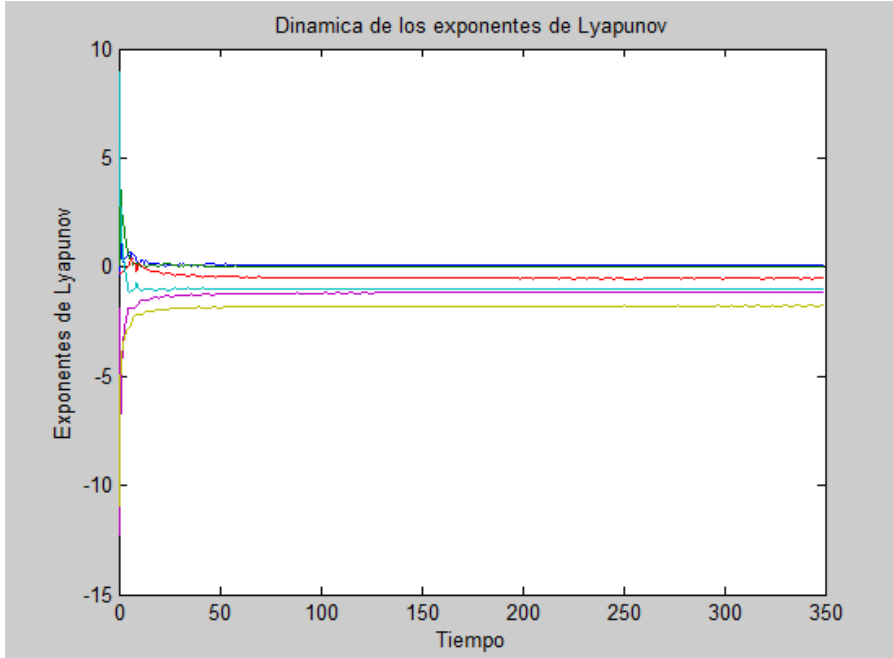
Con el propósito de trabajar las simulaciones con el software MATHEMATICA, hacemos las siguientes identificaciones: $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z, x_4 = u, x_5 = v, x_6 = w$

Cálculo de los exponentes de Lyapunov del modelo de Michael Kopp y Andrii Kopp.

Al calcular los coeficientes de Lyapunov del sistema de ecuaciones diferenciales del modelo ecuaciones (4), se obtienen dos exponentes positivos lo cual indica que el sistema es hipercaótico.

En la figura (5) se muestra la dinámica de los exponentes de Lyapunov. El valor de estos coeficientes es:

Figura (5). Los Exponentes de lyapunov son: $L_1 = 0.088176$, $L_2 = 0.008428$, $L_3 = -0.526398$, $L_4 = -1.018360$, $L_5 = -1.151837$, $L_6 = -1.766676$



Elaboración propia.

A continuación, se calcula la dimensión de Kaplan-York (KYD)

$$D_{KY} = 2 + \frac{L_1 + L_2}{|L_3|} = 2 + \frac{0.088176 + 0.008428}{0.526398} = 2.1835 \quad (5)$$

Esta dimensión es fraccionaria como era de esperarse para el caso de un sistema hipercaótico.

La suma de los exponentes de Lyapunov del sistema hipercaótico gobernado por las ecuaciones (3) es negativo, lo cual indica que el sistema es disipativo.

$$L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 = -4.366667 < 0 \quad (6)$$

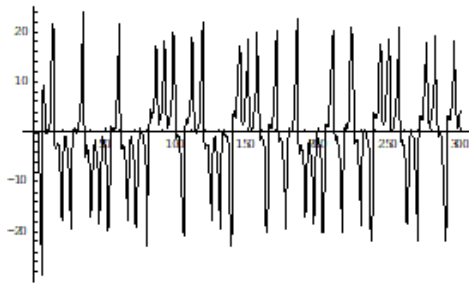
Gráficas de las variables de estado.

En esta sección se presenta el comportamiento dinámico del modelo gobernado por el sistema de ecuaciones diferenciales (3). Para llevar a cabo las simulaciones del sistema propuesto los parámetros son: $a=0.1, b=2, c=8/3, d=8.21, e=24.65, r=58$, y el punto inicial. $P_0=(1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0)$. Para estos valores de los parámetros se obtuvieron las gráficas para el comportamiento temporal de cada una de las variables involucradas. Las gráficas muestran un comportamiento aleatorio, sensible a las condiciones iniciales como es el caso de un sistema hipercaótico como fue mostrado por medio del cálculo de los exponentes de Lyapunov. El rango de variación de cada una de las variables de estado es el siguiente:

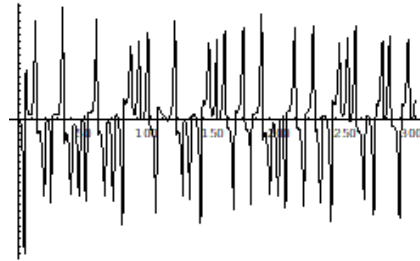
$$x \in [-30, 26], y \in [-1.0, 0.8], z \in [0, 1.7], u \in [-2.8, 1.8], v \in [-122, 110], w \in [-35, 40]$$

Gráficas x, y, z, u, v, w contra el tiempo del modelo de Michael Kopp y Andrii Kopp.

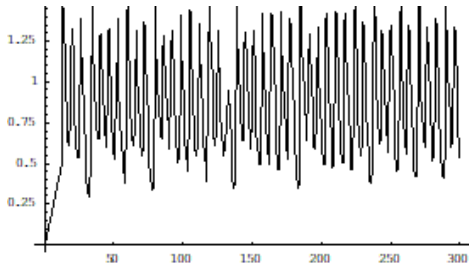
Figura (6). Comportamiento temporal de las variables de estado: x, y, z, u, v, w , del modelo de Michael Kopp y Andrii Kopp gobernado por el sistema de ecuaciones diferenciales (3) con parámetros y condiciones iniciales. (a) x contra t ; (b) y contra t ; (c) z contra t y (d) u contra t , (e) v contra t y (f) w contra t .



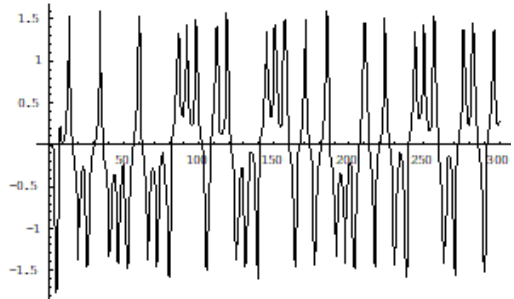
(a)



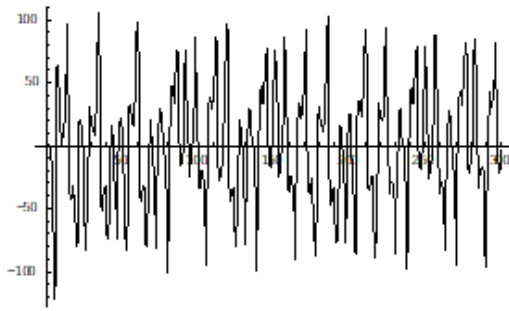
(b)



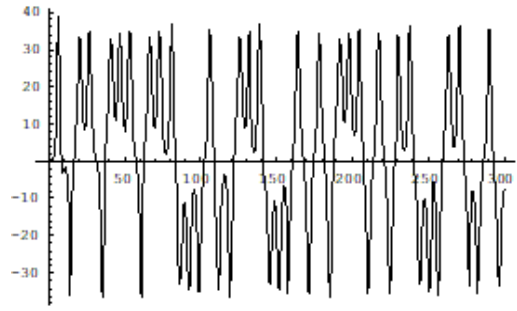
(c)



(d)



(e)



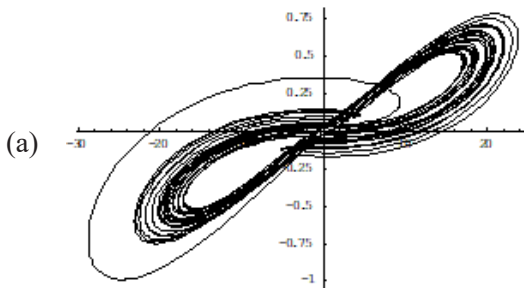
(f)

Elaboración propia.

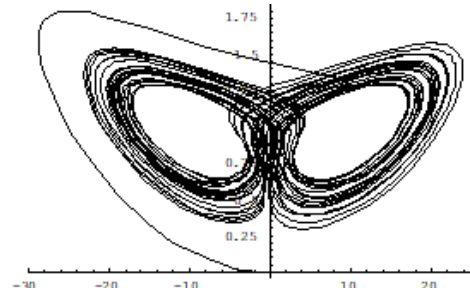
Gráficas Paramétricas del modelo de Michael Kopp y Andrii Kopp

También se elaboraron algunas gráficas paramétricas del modelo de Michael Kopp y Andrii Kopp, se muestran en la figura (7), estas son: (a) Proyección sobre el plano x contra y ; (b) Proyección sobre el plano x contra z ; (c) Proyección sobre el plano x contra u ; (d) Proyección sobre el plano z contra x ; (e) Proyección sobre el plano z contra u ; (f) Proyección sobre el plano z contra v y (g) Proyección sobre el plano z contra w .

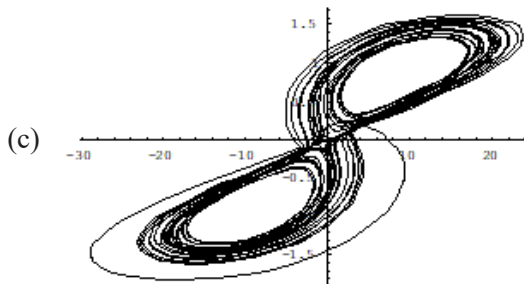
Figura (7). Gráficas paramétricas del sistema representado por el sistema de ecuaciones (3) con parámetros $a=0.1$, $b=2$, $c=8/3$, $d=8.21$, $e=24.65$, $r=58$ y condiciones iniciales $P_0=(0,0,0,0,1)$. (a) Proyección sobre el plano x contra y ; (b) Proyección sobre el plano x contra z ; (c) Proyección sobre el plano x contra u ; (d) Proyección sobre el plano z contra x ; (e) Proyección sobre el plano z contra u ; (f) Proyección sobre el plano z contra v ; (g) Proyección sobre el plano z contra w .



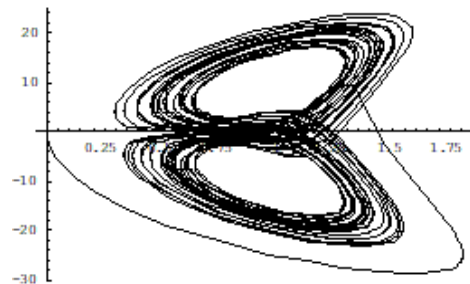
(a)



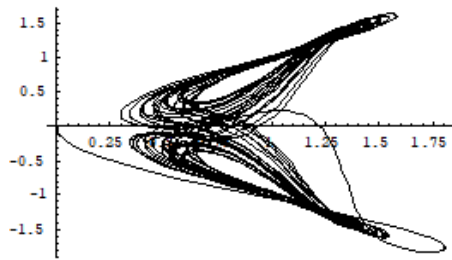
(b)



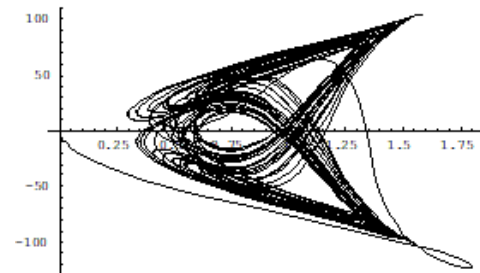
(c)



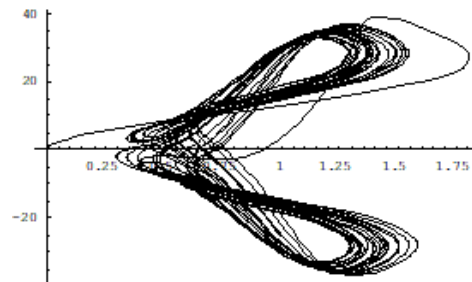
(d)



(e)



(f)

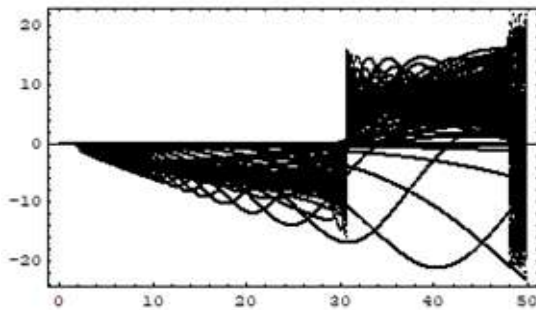


(g)

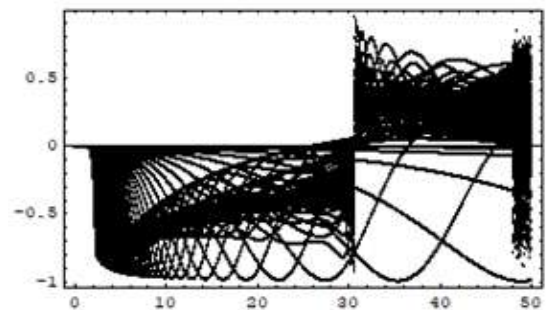
Elaboración propia.

Diagramas de Bifurcación de Michael Kopp y Andrii Kopp

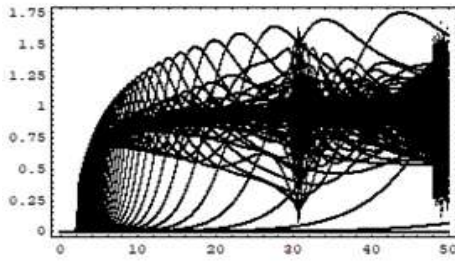
Figura (8). Diagramas de bifurcación de las variables (a) x , (b) y , (c) z , (d) u , (e) v , (f) w cuando el parámetro r cambia de 0 a 50. Los otros parámetros son: $a=0.1$; $b=2$; $c=8/3$; $d=8.21$; $e=24.65$.



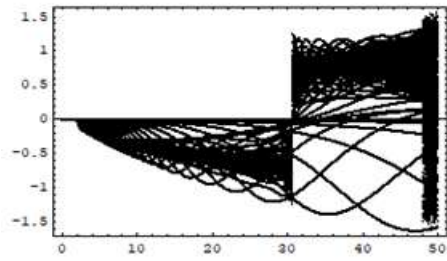
(a)



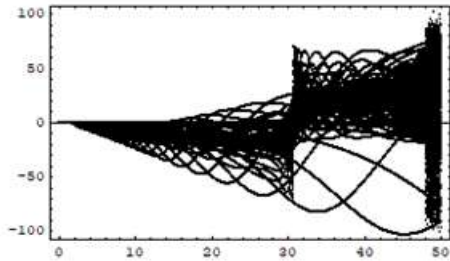
(b)



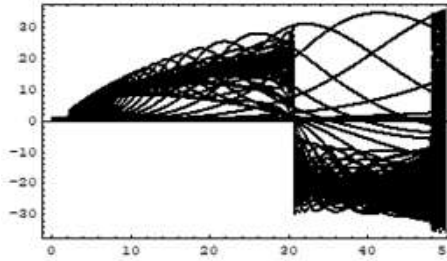
(c)



(d)



(e)



(f)

Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza la dinámica compleja de un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales en 5D propuesto por Qiang Wei y Hong Niu. Se calculan los exponentes de Lyapunov para distintos valores iniciales de las variables de estado, dos de ellos son positivos lo cual permite inferir que el sistema es hipercaótico, la suma de los exponentes de Lyapunov es negativo, así que, el sistema es disipativo. Se obtienen las gráficas de las variables de estado en función del tiempo y se observa su sensibilidad a las condiciones iniciales, también se obtienen algunas gráficas paramétricas y finalmente se calculan los diagramas de bifurcación cuando el parámetro a cambia de 30 a 40 para cada una de las variables de estado, esto muestra la dinámica compleja del sistema analizado **y su carácter hipercaótico**.

En el análisis del modelo de Michael Kopp y Andrii Kopp, el cual describe la convección débilmente no lineal en un fluido eléctricamente conductor que gira de forma no uniforme en un campo magnético constante. Al analizar este modelo por medio de un sistema de ecuaciones en 6D, se encuentran dos coeficientes positivos lo cual permite inferir que el sistema es hipercaótico, la suma de los coeficientes de Lyapunov es negativa, así que el sistema es disipativo, la naturaleza compleja del sistema se muestra al calcular la dimensión de Kaplan-York la cual es fraccionaria ($D_{ky}=2.1835$).

Se obtienen simulaciones numéricas que permiten describir la dinámica del modelo y la existencia de orbitas periódicas y movimiento hipercaótico. Esta conclusión es reforzada con el calculo de algunas gráficas paramétricas. Finalmente se realizó un análisis dinámico del sistema gobernado por el sistema de ecuaciones (3) y se muestra la existencia de regímenes periódicos, cuasi periódicos y caóticos en función de los valores del número de Rayleigh.

LITERATURA CITADA

- Amin Zarei. (2015). “Complex dynamics in a 5-D hyper-chaotic attractor with four-wing, one equilibrium and multiple chaotic attractors”. *Nonlinear Dynamics* 81(1-2):585-605.DOI: 10.1007/s11071-015-2013-5
- Babalola1. M. I, B. E. Iyozzor y I. Odesanya; (2018); “Chaos control of a modified 4d memristor chaotic oscillator via passive control technique”; *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)* Vol. 37, No. 2, April 2018, pp. 480 – 483.
- Haojie Yu, Guoliang Cai. y Yuxiu Li; (2012); “Dynamic analysis and control of a new hyperchaotic finance system”; *Nonlinear Dyn* (2012) 67:2171–2182, DOI 10.1007/s11071-011-0137-9.
- Hong Niu. (2022) “Analysis and Stability Control of a Novel 5D Hyperchaotic System”. *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life* Vol. 8(4); March (2022), pp. 245–248. DOI: <https://doi.org/10.2991/jrnal.k.211108.003>; ISSN 2405-9021; eISSN 2352-6386
- Lei Gong; (2022). “A New Hyperchaotic Financial System”. *The 2022 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2022)*, January 20 to 23, 2022.
- Lin Cao. (2018); “A Four-Dimensional Hyperchaotic Finance System and Its Control Problems”; *Hindawi Journal of Control Science and Engineering* Volume 2018, Article ID 4976380, 12 pages <https://doi.org/10.1155/2018/4976380>
- Lu J. y Chen G., (2002). “A new chaotic attractor coined,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 12, no. 3, pp. 659–661.
- Michael Kopp, y Andrii Kopp. (2022). “A New 6D Chaotic Generator: Computer Modelling and Circuit Design”. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, vol. 12, no. 4, 2022, pp. 288-307
- M. I. Kopp, et al., (2018). “Magnetic Convection in a Nonuniformly Rotating Electroconducting Medium,” *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 127, no. 6, pp. 1173-1196, July 2018.
- Qiang Wei y Hong Niu. (2021).”Control of a Novel 5D Hyperchaotic System”. *The 2021 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2021)*, January 21 to 24, 2021.
- Rossler O. E; (1979); “An equation for Hyperchaos”; *Physics Letters*, vol. 71, No. 2, 3, Pp. 155-157.
- Sundarapandian Vaidyanathan, Aceng Sambas, Sezgin Kacar y Unal Cavusoglu; (2018); “A New

Finance Chaotic System, its Electronic Circuit Realization, Passivity based Synchronization and an Application to Voice Encryption”; Nonlinear Engineering, volume 8, issue 1, pages 193-205 DOI: 10.1515/nleng-2018-0012.

- S. Wolfram, (1991). Mathematica: A system for doing mathematics by computer, Addison-Wesley Publishing Co, Second edition (1991).
- T. G. Gao, G. R. Chen, Z. Q. Chen and S. J. Cang, (2007). The generation and circuit implementation of a new hyper-chaos based upon Lorenz system, Physics Letters A 361(1–2), 2007, pp. 78–86.
- Vasiliy Govorukhin (2025). Calculation Lyapunov Exponents for ODE(<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4628-calculation-lyapunov-exponents-for-ode>), MATLAB Central File Exchange.
- Wolf, A., Swift, J.B., Swinney, H.L., John, A.W. (1985); Determining Lyapunov exponents from a time series. Physica D **16**, 285–317.
- Wu, W.J., Chen, Z.Q. (2010); Hopf bifurcation and intermittent transition to hyperchaos in a novel strong four-dimensional hyperchaotic system. Nonlinear Dyn. **60**, 615–630.
- Xia Lu. (2020); “A Financial Chaotic System Control Method Based on Intermittent Controller”; Hindawi Mathematical Problems in Engineering Volume 2020, Article ID 5810707, 12 pages <https://doi.org/10.1155/2020/5810707>

Capítulo V

Jesús Antonio García Martínez¹, Miguel Servín Palestina²,
David Vargas Cano¹ y José Israel Casas Flores²

Validación de una estación meteorológica de bajo costo basada en ESP32 para el monitoreo agroclimático

RESUMEN

El impacto del cambio climático en la agricultura demanda soluciones adaptativas que optimicen el uso de los recursos y garanticen la sostenibilidad de la producción. Actualmente, los sistemas de monitoreo meteorológico profesional resultan costosos y de cobertura limitada, lo que restringe su adopción por parte de pequeños y medianos productores. En regiones agrícolas, donde los microclimas generan variaciones significativas en variables climáticas, disponer de información local y oportuna es indispensable para la toma de decisiones. El objetivo de este estudio fue validar una estación meteorológica de bajo costo (EMBC) basada en un microcontrolador ESP32, equipada con sensores de temperatura, humedad relativa, radiación global, velocidad y dirección del viento, así como precipitación, comparándola con una estación profesional de referencia (EAA) ubicada en el Campo Experimental Zacatecas (CEZAC). Entre enero y agosto de 2025 se recopilieron mediciones con una frecuencia de 15 minutos, que fueron analizadas mediante correlación de Pearson y calibradas con modelos de regresión lineal. Los resultados mostraron un desempeño altamente satisfactorio en temperatura ($R^2=0.99$), humedad relativa ($R^2=0.95$) y radiación global ($R^2=0.98$), mientras que las variables de precipitación, velocidad y dirección del viento presentaron correlaciones moderadas a bajas, asociadas a limitaciones intrínsecas de los sensores analógicos. La calibración permitió minimizar los residuos y mejorar la concordancia con la estación de referencia, confirmando que la EMBC representa una alternativa confiable, económica y escalable para el monitoreo climático en zonas rurales. En conjunto, estos hallazgos contribuyen a reducir la brecha tecnológica y a fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a escenarios de variabilidad climática.

¹ Universidad Autónoma de Zacatecas. Avda. Ramón López Velarde, 801. Zacatecas, Zacatecas, México.

² Campo Experimental Zacatecas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, 98500 Calera de Victor Rosales, Km. 24.5 carretera Zacatecas-Fresnillo, México

Correo:antonio.garcia.gama@gmail.com: servin.miguel85@gmail.com: d.v.c.cano@gmail.com: casas.israel@inifap.gob.mx

Palabras clave: Microcontrolador ESP32, Internet de las cosas, Agricultura de precisión, Estación meteorológica inteligente, Sensor

ABSTRACT

Climate change impacts on agriculture demand adaptive solutions that optimize resource use and ensure production sustainability. Current professional meteorological monitoring systems are costly and have limited coverage, restricting their adoption by small and medium-scale producers. In agricultural regions, where microclimates generate significant variations in climatic variables, access to local and timely information is essential for decision-making. This study aimed to validate a low-cost meteorological station (EMBC) based on an ESP32 microcontroller, equipped with temperature, relative humidity, global radiation, wind speed and direction, and precipitation sensors, by comparing it with a professional reference station (EAA) located at CEZAC, Zacatecas. Between January and August 2025, measurements were collected at 15-minute intervals and analyzed using Pearson correlation and linear regression calibration models. Results showed highly satisfactory performance for temperature ($R^2=0.99$), relative humidity ($R^2=0.95$), and global radiation ($R^2=0.98$), while precipitation, wind speed, and wind direction variables exhibited moderate to low correlations, associated with intrinsic limitations of analog sensors. Calibration minimized residuals and improved agreement with the reference station, confirming that the EMBC represents a reliable, economical, and scalable alternative for climate monitoring in rural areas. Collectively, these findings contribute to reducing the technological gap and strengthening the resilience of agricultural systems facing climate variability scenarios.

Keywords: Microcontroler ESP32, Internet Of Things, Precision Agriculture, Smart Weather Station, Sensor

INTRODUCCIÓN

La agricultura es altamente dependiente de las condiciones meteorológicas, pues estas determinan el crecimiento de los cultivos, la evapotranspiración, la nutrición y el manejo del riego. La medición precisa de variables como temperatura, humedad, radiación, viento y precipitación es esencial para optimizar la productividad y hacer frente al cambio climático (Abdelmoneim et al., 2024; Faïd et al., 2022) with various applications in several critical domains such as agriculture. Smart farming is a real-world application in which Internet of Things (IoT).

Sin embargo, los sistemas meteorológicos profesionales suelen ser costosos y de cobertura global, lo que limita su accesibilidad para muchos agricultores. En Zacatecas, la red de estaciones climáticas del CEZAC proporciona datos regionales valiosos, pero no siempre reflejan las condiciones precisas de cada predio, debido a la existencia de microclimas (Dafonte et al., 2024) Los pronósticos meteorológicos locales precisos permiten a los agricultores reducir sus costos de manera efectiva. Como resultado, las estaciones meteorológicas portátiles se han convertido en herramientas esenciales para la agricultura moderna (Woo et al., 2023)

Ante esta limitación, las estaciones meteorológicas de bajo costo basadas en tecnologías del Internet

las cosas (IoT) representan una oportunidad prometedora para fortalecer la Agricultura de precisión. Estos sistemas permiten desplegar redes locales de monitoreo climático mediante Estaciones meteorológicas inteligentes que integran múltiples sensores para el registro en tiempo real de variables críticas (Bernardes et al., 2023). Entre los microcontroladores más utilizados en este tipo de soluciones destaca el ESP32, gracias a su bajo costo, capacidad de conectividad inalámbrica y eficiencia energética (da Silva et al., 2025; Ioannou et al., 2021).

En Brasil, se desarrolló un modelo de estación automática solar-alimentada con Microcontrolador ESP32, que mostró un desempeño adecuado en métricas como MAE, RMSE y R^2 . Estudios similares evidencian que los sensores de bajo costo mejoran su precisión tras aplicar procedimientos de calibración (Abdinoor et al., 2025). Asimismo, el uso de estaciones inteligentes solares para entornos agrícolas ha demostrado una alta correlación ($R^2 > 0.99$ en temperatura y > 0.98 en humedad) y costos significativamente menores en comparación con los equipos comerciales (Mokhtarzadeh et al., 2025).

Complementariamente, se han propuesto sistemas IoT con algoritmos de inteligencia artificial y arquitecturas ágiles orientadas a la agricultura de precisión, que combinan sensores de bajo costo con plataformas de conectividad robustas y escalables (Faid et al., 2022; Mokhtarzadeh et al., 2025). En este marco, surge la necesidad de diseñar y validar estaciones meteorológicas inteligentes de bajo costo que combinen sensores accesibles, plataformas IoT y sistemas de bajo consumo energético, capaces de generar datos confiables en tiempo real para la agricultura de precisión. Estas soluciones buscan equilibrar rentabilidad, precisión y eficiencia operativa, superando las limitaciones de los sistemas convencionales de monitoreo climático. En este marco, el estudio tuvo como objetivo validar el desempeño de una estación meteorológica de bajo costo basada en el microcontrolador ESP32, mediante la comparación de sus registros con los obtenidos en la estación de referencia del CEZAC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar y descripción de los equipos

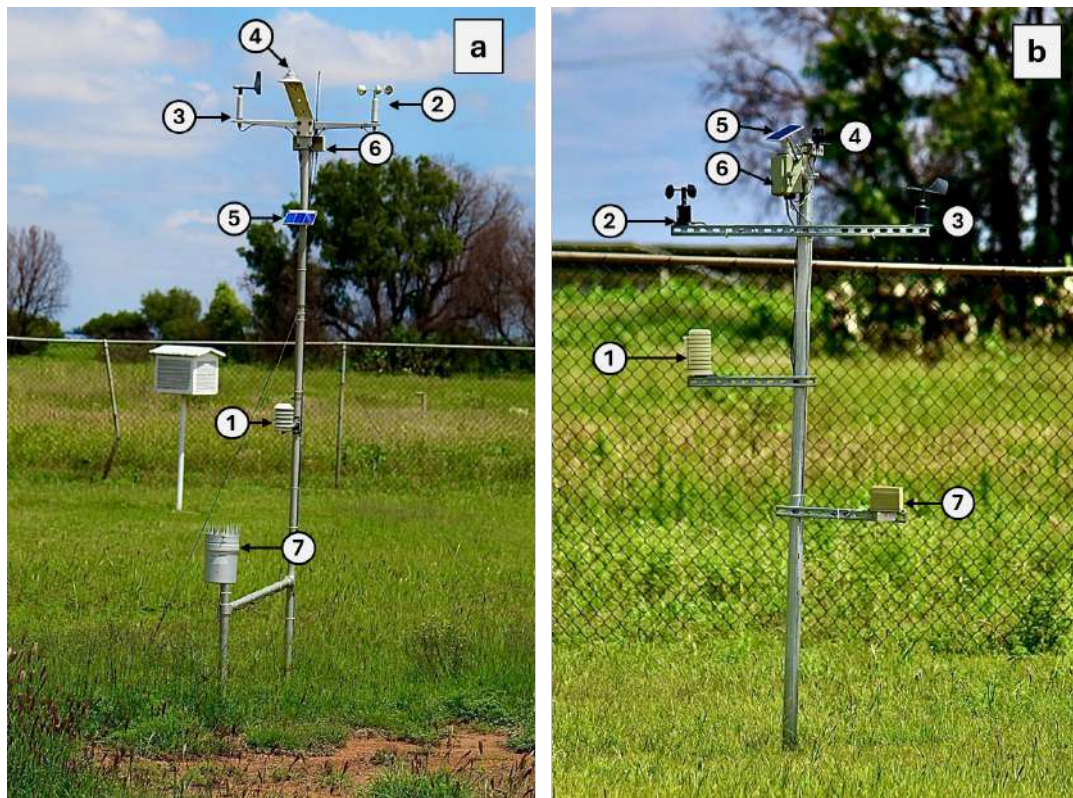
El estudio se llevó a cabo en colaboración con el Campo Experimental Zacatecas (CEZAC), perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México. El Cuadro 1 muestra la comparación entre los dos sistemas de estaciones meteorológicas: la estación meteorológica de referencia, correspondiente a la estación agroclimática automatizada ADCON Telemetry Serie A753 (EAA), ampliamente utilizada en la red de monitoreo climático del INIFAP, equipada con sensores calibrados para la medición de precipitación, radiación solar, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, además de un registrador de datos con capacidad de transmisión inalámbrica en tiempo real, diseñado para aplicaciones agrícolas y ambientales de alta precisión y una estación meteorológica de bajo costo (EMBC), construida a partir de un microcontrolador ESP32, con sensores digitales económicos para medir variables climáticas de interés agrícola, alimentada mediante un sistema fotovoltaico compacto con respaldo en batería.

Cuadro 1: Especificaciones técnicas de las estaciones meteorológicas comparadas.

Variable medida	EAA	EMBC
Temperatura del aire	Sensor: genérico Rango: -40 a +60 °C Resolución: 0.01 °C	Sensor: DHT22 Rango: -40 - 80°C Resolución: 0.1°C
Humedad relativa	Sensor genérico Rango: 0-100 % Resolución: 0.01 %RH	Sensor: DHT22 Rango: 0-100 % Resolución: 0.01 %RH
Radiación solar	Piranómetro SP-Lite y CMP3 (Kipp & Zonen) Rango: 0-2000 W/m ²	Rango: 0 - 1.800 W/m ² Precisión: ±5%
Dirección del viento	Sensor genérico Rango: 0-360°	Sensor: RS-FX-N01 Rango: 0-360°
Velocidad del viento	Sensor genérico Rango: 0-200 km/h	Sensor: PR-3000-FSJT-V5 Rango: 0-108 km/h
Precipitación	Sensor genérico Cazoleta: 0.2mm	Sensor MS-WH-SP-RG Cazoleta: 0.303 mm
Alimentación	Batería interna 6.5 V con respaldo solar	Batería interna 4.2 V con respaldo solar
Controlador	Unidad RTU ADCON A753 con transmisión inalámbrica en tiempo real.	Microcontrolador ESP32 con transmisión inalámbrica LoRa/WiFi

La Figura 1 muestra las estaciones que fueron utilizadas para esta evaluación, instaladas en un mismo predio agrícola, con una separación de aproximadamente 4 metros, con el fin de garantizar que detectaran los mismos eventos meteorológicos bajo condiciones ambientales equivalentes, lo que permitió la comparación directa de sus registros.

Figura 1: Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio: (a) estación de referencia CEZAC–ADCON A753 y (b) estación meteorológica de bajo costo basada en microcontrolador ESP32. Componentes de las estaciones meteorológicas: 1) Sonda de humedad y temperatura, 2) Anemómetro, 3) Veleta, 4) Piranómetro, 5) Panel solar, 6) Adquisidor de datos, 7) Pluviómetro.



Adquisición de datos meteorológicos

Recolectamos las mediciones meteorológicas de dos estaciones durante la observación continua de 238 días (1 de enero al 26 de agosto del 2026). Cada estación proporcionó las mediciones una vez cada 15 min. Así, a partir de un largo período de observación ininterrumpida, obtuvimos muestreos de precipitación (P; mm), radiación solar (Rad, W/m^2), temperatura (T, $^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (HR, %), velocidad del viento (Vel, m/s) y dirección del viento (Dir, $^{\circ}$).

Validación de la estación meteorológica

La validación se basó en la comparación directa de las variables medidas por ambas estaciones. Dado que las estaciones estuvieron ubicadas a escasa distancia, se asumió que los datos obtenidos correspondían al mismo entorno climático. La estación EAA se tomó como estándar de referencia, y la estación de bajo costo se evaluó en términos de precisión y exactitud, de acuerdo con metodologías aplicadas en estudios similares de validación de sensores ambientales.

Medidas de desempeño

El desempeño de los sensores se evaluó mediante indicadores estadísticos de uso común en validaciones ambientales: coeficiente de correlación de Pearson (PCC), coeficiente de determinación (R^2), error absoluto medio (MAE) y error cuadrático medio (RMSE). Además, se realizó un análisis de residuos para examinar posibles sesgos sistemáticos.

Para correlacionar las mediciones meteorológicas en pares de sensores, aplicamos PCC:

$$PCC = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Donde x e y son dos valores dados correlacionados a partir de dos sensores, y $\bar{x}$ y $\bar{y}$ son sus promedios, respectivamente.

Teniendo en cuenta que los resultados de Adcon son la verdad fundamental, determinamos la bondad de ajuste de EMBC a Adcon para cada par de sensores equivalentes aplicando el coeficiente R^2

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \widehat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{y} - y_i)^2} \quad (2)$$

Donde y_i y $\widehat{y}_i$ son los valores reales y predichos, es decir, los resultados de EAA y EMBC, respectivamente. El mejor caso es $R^2=1$, es decir, cuando los valores predichos coinciden exactamente con los reales, de modo que la suma residual de los cuadrados es cero.

Para medir qué tan bien pueden ajustarse los resultados de EMBC a EAA, para cada par de sensores equivalentes, analizamos los residuos entre ellos a partir del promedio de errores al cuadrado y la raíz cuadrada de dicho promedio, respectivamente:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \widehat{y}_i)^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (4)$$

Donde y_i y $\widehat{y}_i$ son los valores reales y predichos, como en la ecuación (2). Mientras que MSE es una métrica de riesgo que corresponde a una puntuación cuadrática de la magnitud residual promedio, RMSE es su raíz cuadrada, que se puede interpretar con la misma unidad que los datos medidos.

Las diferencias entre las mediciones de ambas estaciones se analizaron con una prueba t de Student pareada, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, para verificar si existían discrepancias estadísticamente significativas. El estadístico t se calculó como:

$$t = \frac{\bar{d}}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}} \quad (5)$$

Donde $\bar{d}$ representa la diferencia promedio entre los valores registrados por las dos estaciones, s_d es la desviación estándar de dichas diferencias y n es el número de pares de observaciones. Los grados de libertad se determinaron como $gl = n-1$.

Calibración de sensores meteorológicos con modelos de regresión lineal

Para obtener las ecuaciones de ajuste, se aplicaron modelos de regresión lineal simple para cada variable meteorológica, considerando como variable dependiente los datos registrados por la estación de referencia Adcon y como variable independiente los datos de la EMBC. El modelo lineal se expresó como:

$$y = a + bx + \epsilon \quad (6)$$

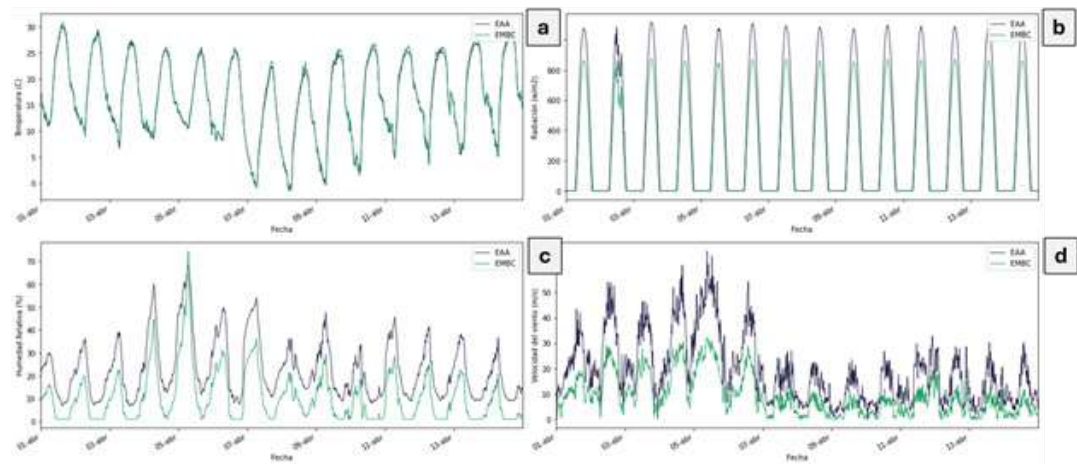
Donde y representa los valores de referencia Adcon, x los valores de EMBC, a el intercepto, b la pendiente y ϵ el error residual.

La validez de los modelos se evaluó bajo el criterio de que una pendiente cercana a uno ($b \approx 1$) y un intercepto no significativamente diferente de cero ($a \approx 0$), lo cual indica ausencia de sesgo sistemático (White et al., 2007). La bondad de ajuste se determinó con el coeficiente de determinación (R^2) el error absoluto medio (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Este procedimiento ha sido documentado ampliamente en estudios de validación de estaciones meteorológicas de bajo costo (da Silva et al., 2025).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La **Figura 2** presenta las series temporales de 14 días correspondientes a las variables meteorológicas medidas por la Estación Meteorológica de Bajo Costo (EMBC) y la Estación Meteorológica Automática (EAA). La superposición de ambas series permite observar la dinámica temporal de cada variable y, al mismo tiempo, evaluar el grado de concordancia entre las estaciones. En general, las tendencias capturadas por la EMBC siguen de manera consistente las mediciones de referencia proporcionadas por la EAA, aunque se aprecian ligeras discrepancias en determinados intervalos, atribuibles a diferencias en la sensibilidad y calibración de los sensores. Considerando a la EAA (Adcon) como verdad fundamental, estos resultados permiten analizar de manera comparativa la precisión relativa de la estación de bajo costo, destacando tanto las coincidencias como las divergencias entre ambas fuentes de información.

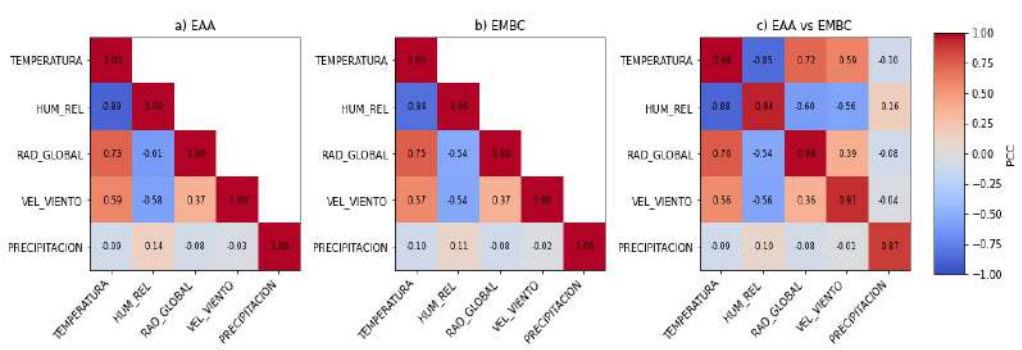
Figura 2: Series temporales de observación meteorológica obtenidas con la Estación EMBC (línea verde) y la Estación EAA (línea azul), mostrando los registros de diferentes sensores: Temperatura del Aire (a), Radiación Global (b), Humedad Relativa (c) y Velocidad del Viento (d).



Medidas de desempeño

La Figura 3 presenta los coeficientes de correlación de Pearson (PCC) entre pares de sensores de ambas estaciones. En la estación EAA (Figura 3a) se observó una correlación negativa fuerte entre la humedad relativa y la temperatura, coherente con el comportamiento esperado en ambientes semiáridos, además de correlaciones positivas moderadas entre la radiación global, la temperatura y la velocidad del viento ($PCC < 0.7$). En EMBC (Figura 3b) se mantuvo este patrón, aunque con coeficientes ligeramente menores, lo que refleja mayor variabilidad en sus mediciones. Al comparar ambas estaciones (Figura 3c), los sensores equivalentes de temperatura y humedad relativa mostraron alta similitud ($PCC > 0.85$), mientras que en radiación y viento las correlaciones fueron moderadas ($0.4\text{--}0.6$), lo que sugiere diferencias de calibración o sensibilidad. En contraste, la precipitación presentó baja correlación, evidenciando la dificultad de capturar con precisión este tipo de eventos en función de la tecnología del sensor.

Figura 3: Coeficiente de correlación de Pearson de los resultados observados.



Para investigar tal diferencia, comparamos esos pares de sensores analizando los resultados residuales entre ellos con las métricas de rendimiento R^2 , MSE y RMSE. En Cuadro 2 se presentan las métricas obtenidas entre EAA y EMBC. Para evaluar la significación estadística de los resultados, se aplicaron pruebas t pareadas asumiendo la siguiente parametrización: el intervalo de confianza del 95%, con la hipótesis nula es decir, un dato recogido de un sensor determinado s en LCAWS es igual a uno correspondiente en PWS. De lo contrario, la hipótesis alternativa

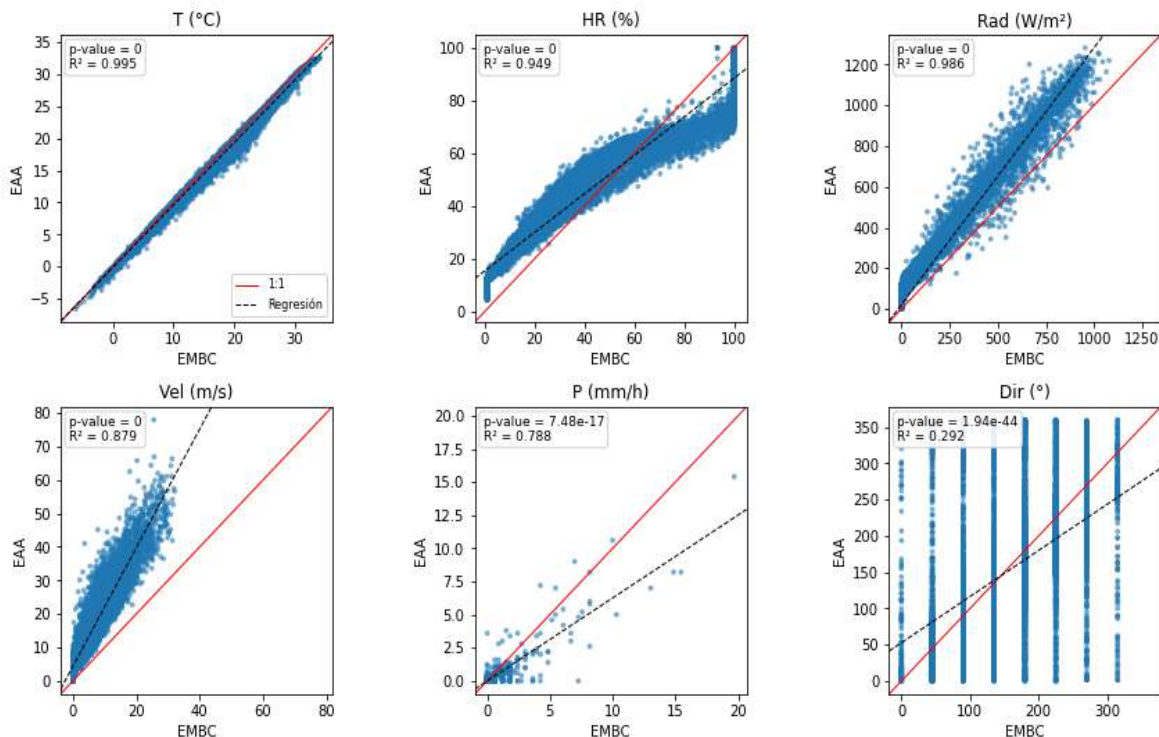
Cuadro 2 Métricas de rendimiento y significación estadística entre EAA y EMBC

Sensor	R^2	MAE	MSE	RMSE	Importancia	
					Valor t	Valor p
Temperatura	0.9952	0.5856	0.5956	0.7717	170.7	0
Precipitación	0.7878	0.0136	0.0279	0.1669	8.345	7.48e-17
Humedad relativa	0.9486	11.366	158.68	12.584	56.5	0
Radiación	0.9856	74.391	13071.86	114.33	128.4	0
Velocidad	0.8787	8.8101	103.23	10.160	263.1	0
Dirección	0.2916	44.726	5197.85	72.096	14.01	1.9e-44

Como se presenta en el Cuadro 2, los sensores de temperatura, humedad relativa y radiación muestran una alta precisión, con coeficientes de determinación $R^2 \geq 0.94$ y residuos relativamente bajos de acuerdo con los valores de MAE, MSE y RMSE obtenidos. Esto se refleja en los diagramas de dispersión de la Cuadro 2, donde los resultados de estas variables en la estación de bajo costo (EMBC) se aproximan de manera consistente a los obtenidos con la estación de referencia (EAA). Por otro lado, los sensores de precipitación y velocidad del viento presentan correlaciones moderadas ($R^2 = 0.79$ y $R^2 = 0.88$, respectivamente), lo que sugiere mayor dispersión en las mediciones y posibles limitaciones instrumentales. En contraste, la dirección del viento evidenció el menor ajuste ($R^2 = 0.29$), reflejando las dificultades inherentes a la medición de esta variable en estaciones de bajo costo.

A pesar de obtener métricas de desempeño prometedoras en la mayoría de los sensores, al evaluar la significancia estadística de los resultados entre EMBC y EAA se verificaron valores de p altamente significativos ($p < 0.001$). En otras palabras, la hipótesis nula se rechaza para todas las variables, lo que significa que estadísticamente los sensores de bajo costo producen resultados diferentes a los de la estación de referencia, incluso en aquellos casos donde el grado de ajuste es elevado. En condiciones ideales, aceptar H_0 implicaría una coincidencia casi perfecta entre las mediciones de ambos sistemas, con valores de $t \approx 0$ y $p \approx 1$.

Figura 4: Diagramas de dispersión del período de observación (1 de enero al 26 de agosto del 2025) entre la EMBC y la EAA, mostrando los resultados de distintos sensores: Temperatura del aire (T), Humedad relativa (HR), Radiación global (Rad), Velocidad del viento (Vel), Precipitación (P) y Dirección del viento (Dir).



A diferencia de los sensores digitales, de las variables temperatura, humedad relativa y radiación, el sensor de velocidad del viento, dirección del viento y precipitación son sensores que cuentan con partes mecánicas para funcionar o hacer su trabajo de censado, es por ello que su precisión depende de la eficiencia y calidad de las mediciones analógicas. Los eventos climáticos se miden a partir de pulsos de interruptores de láminas capturados por la interacción mecánica causada por esos eventos en el dispositivo sensor. Además, estos sensores se implementan bajo diferentes diseños para cada estación, que incluyen diferentes dimensiones físicas. La cantidad de precipitación necesaria para volcar el cucharón basculante EMBC es mayor que la del EAA (0.303 mm frente a 0.2 mm). Además el área de captación es de 55 cm² y 1824cm², respectivamente. Esto significa que el sensor pluviómetro AEE es más sensible, ya que requiere menos precipitación para detectar eventos lluviosos que el sensor EMBC. Esto implicó un recuento diferente de la precipitación por parte de las estaciones durante el período de observación de 238 días (1 de enero al 26 de agosto del 2025). Con 525 mm y 315 registrados por EMBC y EAA, respectivamente. Aunque la resolución de EMBC fue aproximadamente 1.6 veces mayor, los residuos del pluviómetro entre las estaciones fueron de baja magnitud, con y (mm), al tiempo que permitieron la previsibilidad de , se describe en el Cuadro 2.

Entre los sensores magnéticos, la velocidad del aire mostro un R^2 más bajo de 0.8787, y los residuos de $MSE = 103.23$ y $RMSE = 10.16$ m/s. Sin embargo, a partir de la serie temporal de la Figura 2d, observamos que cuanto más rápida es la velocidad del viento, mayores son los residuos entre los resultados. las métricas de rendimiento más bajas correspondieron al sensor de dirección del viento, que presentó el menor coeficiente de determinación ($R^2 = 0.2916$), junto con residuos elevados ($MSE = 5197.85$ y $RMSE = 72.096$ °). Tal $RMSE$ produciría errores alrededor de ± 72 ° en un espacio de $0 \leq WS < 360$. La influencia de los residuos de la dirección del viento se puede ver en los valores atípicos de la Figura 4, se aprecia la ausencia de una tendencia definida, lo cual puede atribuirse al método de adquisición de datos implementado en la EMBC. Las razones son dos. En primer lugar, el procedimiento de recopilación de datos es discreto y restringido, lo que se logra solo con un único muestreo por minuto del sensor de dirección del viento, este equipo realiza mediciones cada minuto y posteriormente calcula un promedio cada 15 minutos. Esto implica que el viento podría cambiar su dirección moviendo la paleta a una nueva posición justo antes o poco después de que se tome una lectura del sensor. En esta ocasión, es posible que el valor recopilado no represente todo el minuto de observación. Además, el uso del promedio en este tipo de variable direccional resulta poco representativo, ya que no refleja la dirección predominante. Por ello, una estrategia más adecuada sería utilizar la moda de las mediciones, registrando la dirección más frecuente durante cada intervalo de 15 minutos, lo que permitiría obtener resultados más fieles a la dinámica real del viento. La segunda razón es que el tiempo de lectura de los sensores de dirección del viento no está sincronizado entre las estaciones. Esto significa que, si los valores muestreados por las estaciones son muy diferentes, pueden representar las direcciones del viento de diferentes momentos dentro del minuto observado. Si bien existe la posibilidad de que los dos datos sean inconsistentes, no importan más que los valores atípicos observados.

Calibración de sensores meteorológicos

Los resultados de los modelos de regresión lineal aplicados para la calibración de los sensores de la EMBC se presentan en el

En el **Cuadro 3**. Las ecuaciones de calibración obtenidas muestran un comportamiento diferencial según la variable meteorológica analizada, reflejando la variabilidad en la precisión y exactitud de los sensores de bajo costo.

En términos generales, los resultados muestran que los sensores de temperatura, humedad relativa y radiación presentan un buen grado de ajuste, con pendientes cercanas a la unidad y valores de intercepto bajos, lo cual refleja un sesgo sistemático mínimo. Estos hallazgos concuerdan con lo reportado en estudios previos de calibración de estaciones de bajo costo, donde las variables asociadas a módulos digitales (como el sensor Bosch BME280) tienden a mostrar mayor estabilidad y precisión (da Silva et al., 2025).

Cuadro 3: Ecuaciones de ajuste obtenidas entre la estación de referencia (EAA) y la EMBC

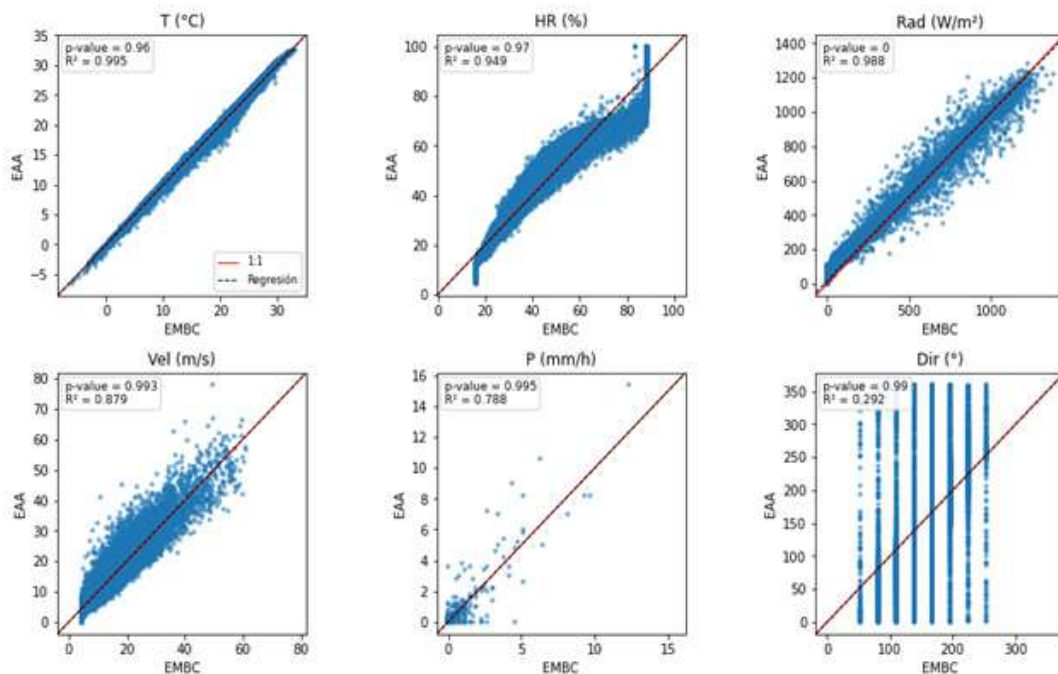
Sensor	Ecuación
Temperatura	$y = -0.1067 + 0.9735x$
Precipitación	$y = -.0006 + 0.6256x$
Humedad relativa	$y = 15.4008 + 0.7310x$
Radiación	$y = 21.1966 + 1.2616x$
Velocidad	$y = 4.3853 + 1.7701x$
Dirección	$y = 52.7220 + 0.6364$

Por otro lado, los sensores de precipitación y velocidad del viento muestran una pendiente distinta de la unidad y un sesgo más evidente en el intercepto, lo cual indica una tendencia sistemática a subestimar o sobrestimar las mediciones respecto a la estación de referencia. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado, debido a la sensibilidad de los pluviómetros de bajo costo y a las limitaciones mecánicas de los anemómetros compactos (White et al., 2007).

Finalmente, el sensor de dirección del viento presenta la menor capacidad de ajuste, con una pendiente de 0.6364 y un intercepto de 52.72, lo que evidencia una desviación considerable respecto a la referencia. Esto se explica en la sección de métricas de rendimiento.

La Figura 5 muestra los diagramas de dispersión obtenidos tras la calibración de los sensores de la EMBC con las ecuaciones de ajuste, en comparación con la estación de referencia EAA, de acuerdo con el Cuadro 3. Los resultados evidencian un desempeño sobresaliente en las variables de temperatura ($R^2 = 0.995$), humedad relativa ($R^2 = 0.949$) y radiación global ($R^2 = 0.988$), lo que confirma que, luego de la corrección, los sensores de bajo costo reproducen de forma consistente las observaciones de la estación profesional con bajos valores de error (MSE y RMSE). En el caso de la velocidad del viento ($R^2 = 0.879$) y la precipitación ($R^2 = 0.788$), se obtuvo un ajuste moderado, atribuible a la sensibilidad de los sensores frente a intensidades bajas y a la complejidad de registrar eventos pluviales con exactitud. Por su parte, el sensor de dirección del viento mostró el menor nivel de concordancia ($R^2 = 0.292$), sin una clara tendencia

Figura 5: Diagramas de dispersión para la EMBC y la EAA calibrado con las ecuaciones de ajuste, mostrando los sensores: Temperatura del aire (T), Humedad relativa (HR), Radiación global (Rad), Velocidad del viento (Vel), Precipitación (P) y Dirección del viento (Dir).



CONCLUSIONES

Las estaciones meteorológicas constituyen una herramienta esencial para el monitoreo agroclimático y la toma de decisiones basadas en datos en sistemas agrícolas. Sin embargo, los altos costos asociados a la instrumentación profesional limitan su adopción en escenarios productivos, lo que ha impulsado la evaluación de alternativas de bajo costo como la EMBC. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que, tras la calibración con modelos de regresión lineal, la EMBC alcanzó un desempeño altamente satisfactorio en variables clave como la temperatura del aire, la humedad relativa y la radiación global ($R^2 \geq 0.94$), lo que confirma su potencial para complementar las redes de observación meteorológica a menor costo. No obstante, se identificaron limitaciones importantes en la estimación de la velocidad y dirección del viento, así como en la precipitación, donde las discrepancias se relacionan con las características intrínsecas de los sensores analógicos y con el procedimiento de muestreo de datos basado en promedios de intervalos de 15 minutos.

La aplicación de modelos de regresión lineal permitió reducir los errores sistemáticos y mejorar la concordancia con la estación de referencia (EAA), evidenciando que este enfoque es una estrategia viable para optimizar la utilidad de estaciones meteorológicas de bajo costo en contextos agrícolas y de investigación. Sin embargo, para variables de alta variabilidad temporal

como el viento y la precipitación, será necesario explorar métodos de calibración alternativos y ajustes metodológicos que permitan una mayor precisión. En conjunto, los hallazgos confirman que las estaciones de bajo costo, correctamente calibradas, representan una opción prometedora para ampliar la cobertura espacial de datos meteorológicos y fortalecer la gestión agroclimática en sistemas productivos, especialmente en regiones donde el acceso a estaciones profesionales resulta limitado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Aguas Firmes, implementado por la Cooperación Alemana para el Desarrollo Sustentable (GIZ) y promovido por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ); a la cervecera líder AB InBev, a través de Grupo Modelo y Coca-Cola Company; y al INIFAP. Gran ref. SIGI: 1234837220 y 135051364.

LITERATURA CITADA

- Abdelmoneim, A. A., Khadra, R., Elkamouh, A., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2024). Towards Affordable Precision Irrigation: An Experimental Comparison of Weather-Based and Soil Water Potential-Based Irrigation Using Low-Cost IoT-Tensiometers on Drip Irrigated Lettuce. *Sustainability (Switzerland)*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/su16010306>
- Abdinoor, J. A., Hashim, Z. K., Horváth, B., Zsebő, S., Stencinger, D., Hegedüs, G., Bede, L., Ijaz, A., & Kulmány, I. M. (2025). Performance of Low-Cost Air Temperature Sensors and Applied Calibration Techniques—A Systematic Review. *Atmosphere*, 16(7), 1–30. <https://doi.org/10.3390/atmos16070842>
- Bernardes, G. F. L. R., Ishibashi, R., Ivo, A. A. S., Rosset, V., & Kimura, B. Y. L. (2023). Prototyping low-cost automatic weather stations for natural disaster monitoring. *Digital Communications and Networks*, 9(4), 941–956. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.05.002>
- da Silva, T. A., Serrano, A. L. M., Figueiredo, E. R. C., Rocha Filho, G. P., de Mendonça, F. L. L., Meneguette, R. I., & Gonçalves, V. P. (2025). New Model for Weather Stations Integrated to Intelligent Meteorological Forecasts in Brasilia. *Sensors*, 25(11), 1–20. <https://doi.org/10.3390/s25113432>
- Dafonte, J., González, M. Á., Comesaña, E., Teijeiro, M. T., & Cancela, J. J. (2024). Soil Water Status Monitoring System with Proximal Low-Cost Sensors and LoRa Technology for Smart Water Irrigation in Woody Crops. *Sensors*, 24(24). <https://doi.org/10.3390/s24248104>
- Faid, A., Sadik, M., & Sabir, E. (2022). An Agile AI and IoT-Augmented Smart Farming: A Cost-Effective Cognitive Weather Station. *Agriculture (Switzerland)*, 12(1), 1–31. <https://doi.org/10.3390/agriculture12010035>
- Ioannou, K., Karampatzakis, D., Amanatidis, P., Aggelopoulos, V., & Karmiris, I. (2021). Low-cost automatic weather stations in the internet of things. *Information (Switzerland)*, 12(4), 1–21.

<https://doi.org/10.3390/info12040146>

- Mokhtarzadeh, H., Gorjian, S., & Minaei, S. (2025). Design, development, and evaluation of a low-cost smart solar-powered weather station for use in agricultural environments. *Results in Engineering*, 26(March), 104848. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104848>
- White, J. W., Boote, K. J., Hoogenboom, G., & Jones, P. G. (2007). Regression-based evaluation of ecophysiological models. *Agronomy Journal*, 99(2), 419–427. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0100>
- Woo, W., Richards, W., Selker, J., & Udell, C. (2023). WeatherChimes: An Open IoT Weather Station and Data Sonification System. *HardwareX*, 13, e00402. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00402>

Capítulo VI

David Vargas Cano¹, Miguel Servín Palestina²,
Jesús Antonio García Martínez¹ y Salvador González Solís²

SPEFA 1.0: Sistema de predicción fenológica para ajo (*Allium sativum* L.) basado en grados-día de desarrollo y su implementación en una aplicación web Shiny

RESUMEN

El cultivo de ajo requiere del manejo oportuno de sus etapas fenológicas para maximizar su productividad. Este estudio tuvo como objetivo desarrollar y validar un sistema de predicción fenológica basado en grados-día de desarrollo (GDD) para tres variedades de ajo en Zacatecas, México. Se optimizaron los parámetros de dos modelos de cálculo de GDD (lineal y beta) y se determinaron los umbrales fenológicos para cada variedad. Los parámetros térmicos cardinales óptimos fueron $T_{base} = 5.5^{\circ}\text{C}$ y $T_{opt} = 16.2^{\circ}\text{C}$ para ambos modelos, con $T_{max} = 31.0^{\circ}\text{C}$ (lineal) y 34.1°C (beta). El modelo beta mostró mayor precisión predictiva (RMSE: 1.44, 1.61 y 6.06 días) que el lineal (RMSE: 3.33, 1.87 y 5.5 días) para las tres variedades estudiadas. Los umbrales de GDD variaron entre variedades, requiriendo ‘Cubanos’ 1881-2196°C-día, ‘Tigres’ 2220-2377°C-día y ‘Mármol Blanco’ 2232-2381°C-día para completar su ciclo. Estos resultados se implementaron en SPEFA 1.0, una aplicación web desarrollada en R con el paquete Shiny y proporciona monitoreo fenológico del ajo, demostrando ser una herramienta robusta para la toma de decisiones agronómicas.

Palabras clave: *Allium sativum*, grados-día de desarrollo, fenología, Shiny app.

ABSTRACT

Garlic cultivation requires timely management of its phenological stages to maximize productivity. This study aimed to develop and validate a phenological prediction system based on growing degree-days (GDD) for three garlic varieties in Zacatecas, Mexico. Parameters for two GDD calculation models (linear and beta) were optimized and phenological thresholds were determined for each variety.

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.

Correos: d.v.c.cano@gmail.com, servin.miguel@inifap.gob.mx, antonio.garcia.gama@gmail.com, gonzalezsolis02.26@gmail.com

The optimal cardinal temperatures were $T_{base} = 5.5^{\circ}\text{C}$ and $T_{opt} = 16.2^{\circ}\text{C}$ for both models, with $T_{max} = 31.0^{\circ}\text{C}$ (linear) and 34.1°C (beta). The beta model showed higher predictive accuracy (RMSE: 1.44, 1.61 y 6.06 days) than the linear model (RMSE: 3.33, 1.87 y 5.5 days) for the three studied varieties. GDD thresholds varied among varieties, with ‘Cubanos’ requiring 1881-2196°C-day, ‘Tigres’ 2220-2377°C-day, and ‘Mármol Blanco’ 2232-2381°C-day to complete their cycle. These results were implemented in SPEFA 1.0, a web application developed in R with the Shiny package, which provides garlic phenological monitoring, proving to be a robust tool for agronomic decision-making.

Keywords: *Allium sativum*, growing degree-days, phenology, Shiny app.

INTRODUCCIÓN

El ajo (*Allium sativum* L.) es un cultivo de importancia económica global cuya productividad depende críticamente del manejo oportuno de sus etapas fenológicas (Brewster, 2008). La transición entre estas fases de crecimiento, particularmente el inicio de la bulbificación está sujeta a la influencia de factores ambientales clave como el fotoperíodo y la temperatura (Portela & Cavagnaro, 2005; Atif *et al.*, 2020). Los productores enfrentan desafíos en la identificación precisa de las etapas fenológicas para aplicar prácticas agronómicas oportunas, ya que en general se basan en observaciones visuales y experiencia empírica.

Los grados-día de desarrollo (GDD) representan una métrica fundamental para predecir el desarrollo de cultivos basado en acumulación térmica (McMaster & Wilhelm, 1997). Si bien los modelos lineales tradicionales son ampliamente utilizados, presentan limitaciones significativas al no capturar la respuesta no lineal del desarrollo vegetal a temperaturas que exceden la temperatura óptima (Yan & Hunt, 1999). En cultivos como el ajo, con umbrales térmicos bien definidos, se han propuesto modelos más complejos que incorporan temperaturas cardinales óptimas y máximas (Yin *et al.*, 1995; Zhou & Wang, 2018).

La brecha entre estos avances en modelización y su aplicación práctica motiva el desarrollo de SPEFA 1.0 (Sistema de Predicción de Etapa Fenológica del Ajo), una aplicación web que implementa estos avances en una herramienta accesible. Este sistema integra modelos de acumulación térmica no lineales con umbrales fenológicos optimizados para determinar automáticamente la etapa fenológica del cultivo, proporcionando a técnicos y productores una herramienta de decisión basada en evidencia científica.

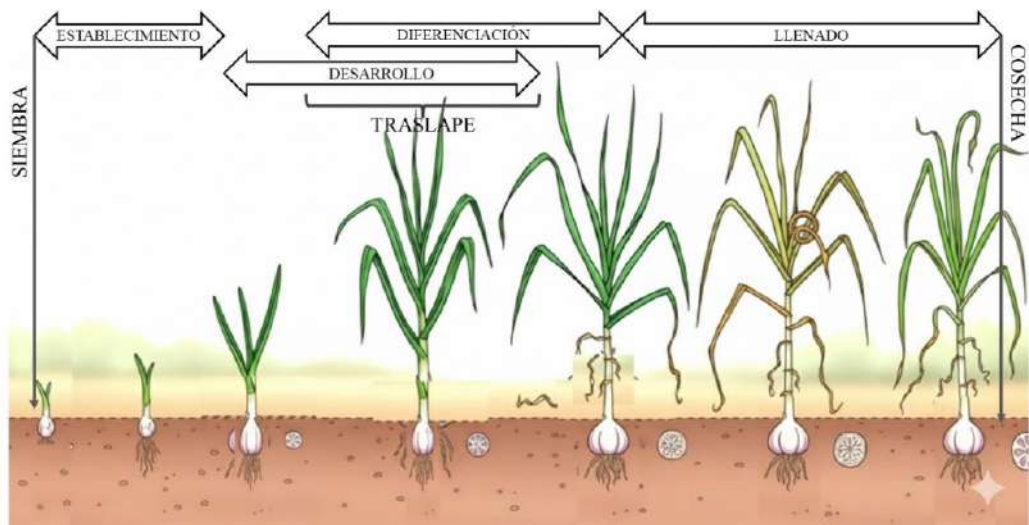
MATERIALES Y MÉTODOS

Fuentes de datos

El estudio se realizó utilizando datos de ajo (*Allium sativum* L.) cultivados en el estado de Zacatecas, México (ciclo de cultivo 2024-2025). Las variedades empleadas fueron “cubanos”, “tigre” y “mármol blanco”, cultivados en dos lotes comerciales del estado de Zacatecas. Para cada lote se registró la fecha de siembra y se realizaron muestreos semanales para determinar la etapa fenológica según la escala BBCH, adaptada de López-Bellido *et al.* (2016). Las etapas consideradas fueron las

siguientes: Establecimiento (desde la siembra hasta el 80% de emergencia), Desarrollo vegetativo (desde el establecimiento hasta el desarrollo de la última hoja), Traslape (período de coexistencia entre las etapas de desarrollo y diferenciación), Diferenciación (desde el inicio hasta la formación completa de los dientes), Llenado (llenado de los dientes) y Cosecha (Figura 1). Paralelamente, se obtuvieron datos de temperatura media diaria desde el día de siembra hasta la cosecha, de las estaciones climáticas más cercanas a los cultivos y pertenecientes a la red de estaciones del campo experimental Zacatecas (CEZAC-INIFAP)

Figura1. Etapas fenológicas del cultivo de ajo en la escala BBCH adaptado López-Bellido et al. (2016)



Modelado de los grados-día de desarrollo

Los Grados-Día de Desarrollo (Ecuación 1), es una medida acumulativa del tiempo térmico diario (DTT, por sus siglas en inglés). Los métodos varían en cómo calculan DTT, que es esencial para determinar GDD (Zhou & Wang, 2018).

$$GDD = \sum DTT \quad (1)$$

En este trabajo se evaluaron dos enfoques para el cálculo de DDT y a su vez obtener GDD.

Método Residual Lineal (Ecuación 2): Este método está basado en el método 1 de McMaster & Wilhelm (1997) que calcula los DDT como la diferencia entre la temperatura media y una temperatura base (T_{base}).

Método de Función Beta (Ecuación 3): Este método no lineal basado en el modelo propuesto por Zhou & Wang (2018), calcula el DDT en función de tres temperaturas cardinales: base (T_{base}), óptima (T_{opt}) y máxima (T_{max}).

En ambos métodos se consideró tres parámetros esenciales, temperatura base, temperatura óptima y temperatura umbral máxima. Dado que cada cultivo tiene límites biológicos superiores e inferiores de temperatura, por encima y por debajo de los cuales el cultivo deja de crecer (Major et al., 1983; Liu et al., 2020), se consideró DDT nulo para valores fuera del rango de temperatura base a temperatura umbral máxima, además se asume que la tasa de desarrollo del cultivo es máxima en la temperatura óptima.

$$DDT = \begin{cases} 0 & \text{si } T_{\text{mean}} \leq T_{\text{base}} \text{ o } T_{\text{mean}} \geq T_{\text{max}} \\ T_{\text{mean}} - T_{\text{base}} & \text{si } T_{\text{base}} < T_{\text{mean}} < T_{\text{opt}} \\ T_{\text{opt}} - T_{\text{base}} & \text{si } T_{\text{opt}} < T_{\text{mean}} < T_{\text{max}} \end{cases} \quad (1)$$

$$DDT = \begin{cases} 0 & \text{si } T_{\text{mean}} \leq T_{\text{base}} \text{ o } T_{\text{mean}} \geq T_{\text{max}} \\ (A)(B) \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{base}}} (T_{\text{opt}} - T_{\text{base}}) & \text{si } T_{\text{base}} < T_{\text{mean}} < T_{\text{max}} \end{cases} \quad (2)$$

donde T_{mean} es la temperatura promedio diaria, T_{base} es la temperatura base del ajo, T_{opt} es la temperatura óptima, T_{max} la temperatura umbral máxima, $A = \frac{T_{\text{mean}} - T_{\text{base}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{base}}}$ y $B = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{mean}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}$

Temperaturas cardinales y valores GDD

Los parámetros de ambos modelos (T_{base} , T_{opt} , T_{max}) fueron optimizados para minimizar la variabilidad en la acumulación de GDD requerida para alcanzar cada etapa fenológica principal entre los diferentes lotes de estudio. El algoritmo de optimización utilizado fue L-BFGS-B (Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno with Box constraints). Este método iterativo de quasi-Newton es particularmente eficiente para problemas con límites en los parámetros, utilizando una aproximación de memoria limitada de la matriz Hessiana para dirigir la búsqueda hacia el óptimo (Byrd et al., 1995). La función objetivo (Ecuación 4), consistió en minimizar una penalización total combinando métricas de variabilidad con pesos definidos y sometidos a restricciones físicas como biológicas para garantizar que los parámetros óptimos encontrados fueran biológicamente plausibles y consistentes con estudios previos, se restringió el espacio de búsqueda a una variación de $\pm 10\%$ alrededor de los valores iniciales teóricos.

$$\begin{aligned} \min_{\theta} F(\theta) &= \sum_{i=1}^{n_{\text{etapa}}} 0.6\sigma_i(\theta) + 0.3CV_i(\theta) + 0.1R_i(\theta) \\ 0 &\leq T_{\text{base}} < T_{\text{opt}} < T_{\text{max}} \leq 50 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.9*\theta_0 &\leq \theta \leq 1.1*\theta_0 \end{aligned} \quad (4)$$

donde: $\theta = (T_{\text{base}}, T_{\text{opt}}, T_{\text{max}})$, es el vector de parámetros óptimos, σ_i es la desviación estándar de los GDD acumulados en la etapa i , $CV_i = \sigma_i/\mu_i$ es el coeficiente de variación (media/μ_i) y $R_i = \max(\text{GDD}_i) - \min(\text{GDD}_i)$, es el rango de los GDD en la etapa i , $\theta_0 = (5, 18, 31) \text{ } ^\circ\text{C}$ como valores iniciales para T_{base} , T_{opt} , T_{max} respectivamente.

Con cada modelo y los parámetros óptimos, se calculó GDD acumulado por etapa fenológica y los días después de siembra (DDS) requeridos para alcanzar cada etapa. La selección del mejor modelo se basó en la menor penalización total y la mejor concordancia con las observaciones fenológicas.

Desarrollo e implementación del sistema Shiny

La aplicación web SPEFA 1.0 se desarrolló utilizando el paquete shiny (v1.11.1) para R (v4.5.1), implementando una arquitectura modular que integra:

1. Módulo de procesamiento de datos: Incorpora funciones para calcular GDD mediante los dos modelos implementados (lineal y beta), gestiona la acumulación térmica desde siembra, y determina la etapa fenológica actual mediante comparación con los umbrales optimizados
2. Módulo de visualización: Genera salidas gráficas interactivas que incluyen; serie temporal de acumulación de GDD superpuesta con ventanas fenológicas. diagramas de progreso por etapa fenológica e indicadores de estado (value boxes) de la etapa actual y GDD acumulado
3. Módulo de gestión de datos: Permite entrada vía archivos Excel (.xlsx, .xls) con validación de formato y estructura, además de edición in situ de los parámetros y umbrales mediante tablas interactivas

La interfaz se implementó con *shinydashboard* y *shinyWidgets*, organizada en cuatro pestañas funcionales: (1) Dashboard principal con visualizaciones, (2) Gestión de datos, (3) Configuración de umbrales, y (4) Ayuda y documentación. El procesamiento se optimizó mediante el uso de *dplyr* y *lubridate* para manipulación de datos, mientras que las visualizaciones interactivas se implementaron con *plotly* y *ggplot2*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización térmica del ciclo de cultivo

El análisis de los datos de temperatura utilizados para la optimización de los parámetros térmicos y umbrales fenológicos reveló que las condiciones térmicas fueron consistentes entre lotes para cada variedad, con medias de temperatura que oscilaron entre 15.3-16.2°C. El cuadro 1 presenta el resumen estadístico de las temperaturas medias diarias registradas durante los ciclos completos de cultivo para las tres variedades estudiadas.

Cuadro 1. Resumen estadístico de la temperatura media diaria (°C) durante el ciclo de cultivo para las tres variedades de ajo en dos lotes independientes.

Temperatura media del ciclo completo (°C)	Cubanos		Tigres		Mármol Blanco	
	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2
min	2.5	3.9	2.5	3.9	2.5	1.6
mediana	15.9	15.3	16.1	15.4	16.1	15.1
media	15.7	15.4	16.2	15.7	16.2	15.3
máxima	21.1	21.6	25.6	25.1	25.6	25.6
Ciclo (Días)	220	222	243	241	242	253

La amplitud térmica registrada (rango: 1.6-25.6°C) evidencia las condiciones semiáridas de la zona de estudio, con temperaturas mínimas cercanas a 0°C durante el establecimiento y temperaturas máximas que superaron los 25°C durante etapas reproductivas. Esta amplia variabilidad térmica justifica la necesidad de emplear modelos de acumulación de calor que consideren los límites cardinales del cultivo.

La duración del ciclo mostró diferencias entre variedades consistentes, donde ‘Cubanos’ presentó el ciclo más corto (220-222 días), seguido por ‘Tigres’ (241-243 días) y ‘Mármol Blanco’ con el ciclo más extenso (242-253 días). Estas diferencias en la duración del ciclo se reflejan posteriormente en los requerimientos totales de grados-día para cada variedad.

Parámetros óptimos

El proceso de optimización mediante el algoritmo L-BFGS-B permitió obtener para cada método un conjunto único de parámetros térmicos cardinales que minimizaron la función de penalización (Ecuación 4) para las tres variedades de ajo estudiadas (Cuadro 2). Los valores óptimos obtenidos fueron consistentes entre variedades, lo que sugiere una respuesta térmica similar en las variedades ‘Cubanos’, ‘Tigre’ y ‘Mármol blanco’ bajo las condiciones de estudio.

Cuadro 2. Parámetros térmicos cardinales óptimos para los modelos lineal y beta

Método	Temperatura base	Temperatura óptima	Temperatura máxima
Lineal	5.5	16.2	31
Beta	5.5	16.2	34.1

Los resultados de la optimización revelaron que el valor de 5.5 °C para la temperatura base y es ligeramente superior al valor teórico inicial de 5.0°C empleado por (El-Zohiri et al., 2014). Este incremento sugiere que el desarrollo fenológico del ajo en las condiciones de Zacatecas requiere una temperatura umbral ligeramente mayor para iniciar su desarrollo. Para la temperatura óptima de 16.2°C resultó ser inferior al valor teórico inicial de 18°C, indicando que la máxima tasa de desarrollo fenológico se alcanza a temperaturas más moderadas de las previamente establecidas. Este hallazgo es consistente con los resultados de Oh et al. (2015), quienes reportaron que el

crecimiento vegetativo (altura del brote, número de hojas) y el peso seco total de plantas de ajo fueron significativamente mayores a 20°C en comparación con temperaturas superiores o inferiores durante la etapa de crecimiento temprano. Además, su estudio demostró que la eficiencia fotosintética fue más alta en el rango de 15-20°C y disminuyó notablemente por encima de 25°C, lo que sugiere un estrés fisiológico a temperaturas más altas. Nuestro valor óptimo de 16.2°C, ligeramente inferior al óptimo de crecimiento reportado por estos autores. En cuanto a la temperatura umbral máxima se observó una divergencia significativa entre modelos. Para el modelo lineal, el valor se mantuvo en 31°C, mientras que para el modelo beta se incrementó a 34.1°C. Esta diferencia se le debe atribuir al proceso de optimización, principalmente para el método lineal, dado que no hubo un valor de temperatura media igual o superior a 31 °C, el valor de temperatura máxima no se vio modificada. La consistencia de los parámetros óptimos entre variedades sugiere que las diferencias en requerimientos térmicos entre ‘Cubanos’, ‘Tigre’ y ‘Mármol blanco’ se manifiestan principalmente en los umbrales de GDD por etapa fenológica más que en las temperaturas cardinales base.

Umbrales fenológicos

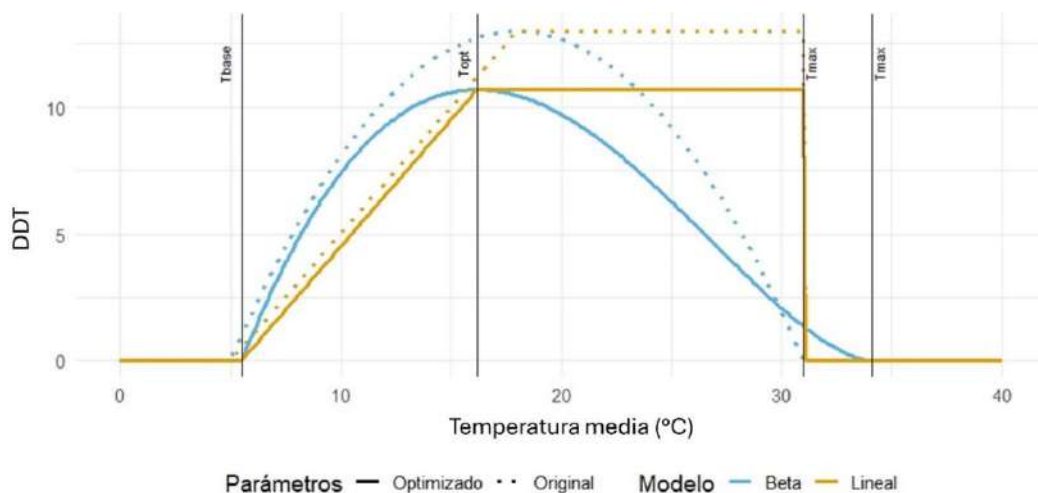
Los umbrales de GDD acumulados requeridos para la transición entre etapas fenológicas mostraron variabilidad entre variedades y entre modelos (Cuadro 3). Se observaron diferencias consistentes en la acumulación total de GDD necesaria para alcanzar la cosecha entre los modelos lineal y beta, siendo este último el que requirió una mayor acumulación térmica en todas las variedades.

Cuadro 3. Umbrales de GDD acumulados para las principales etapas fenológicas del ajo en tres variedades, calculados con los modelos lineal y beta.

Etapa Fenológica	Cubanos		Tigres		Mármol Blanco	
	Lineal	Beta	Lineal	Beta	Lineal	Beta
Establecimiento	0-200	0-203	0-220	0-220	0-221	0-220
Desarrollo	200-1311	203-1505	220-1607	220-1838	221-1708	220-1935
Diferenciación	1130-1351	1252-1561	1375-1792	1593-2028	1377-1793	1591-2026
Llenado	1351-1881	1561-2196	1792-2220	2028-2377	1793-2232	2026-2381
Cosecha	>1881	>2196	>2220	>2377	>2232	>2381
R2	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
RMSE	5.5	6.06	1.87	1.61	3.33	1.44

El modelo beta requirió mayores acumulaciones de GDD que el modelo lineal para completar el ciclo fenológico. Esta discrepancia se atribuye a que el modelo beta presenta mayores valores de DDT en el intervalo de T_{base} a T_{opt} en comparación al modelo lineal (Figura 2), lo que aumenta la eficiencia en la acumulación de grados-día durante los períodos con temperaturas subóptimas. En cuanto a variabilidad entre variedades, el ajo ‘Cubanos’ mostró los requerimientos térmicos más bajos para completar su ciclo fenológico (1881-2196°C-día), seguida por ‘Mármol Blanco’ (2232-2381°C-día) y ‘Tigres’ (2220-2377°C-día). Esta jerarquía se mantuvo consistentemente en ambos modelos, y es atribuible a la duración del ciclo de cultivo y a los valores mínimos y máximos de las temperatura media del cultivo en el ciclo completo.

Figura 2. Comparación de modelos para DDT y calcular grados-día acumulado, con parámetros iniciales (5, 18 y 31) y optimizados (5.5, 16.2 y 31 o 34.1) para temperatura base, óptima y umbral máximo respectivamente.



La validación del desempeño predictivo de los umbrales fenológicos optimizados mostró una excelente capacidad para estimar las transiciones entre etapas en las tres variedades evaluadas (Tabla 2). Ambos modelos (lineal y beta) alcanzaron coeficientes de determinación (R^2) de 0.99 para todas las variedades, indicando que los umbrales de GDD explican el 99% de la variabilidad en el avance fenológico observado en campo.

El análisis de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) reveló diferencias en la precisión de predicción entre modelos y variedades. El modelo beta mostró consistentemente menores errores de predicción en comparación con el modelo lineal, (particularmente para las variedades ‘Tigres’ (1.61 vs 1.87 días) y ‘Mármol Blanco’ (1.44 vs 3.33 días). Esta superioridad del modelo beta es especialmente notable en la variedad ‘Mármol Blanco’, donde redujo el error de predicción en más del 56% (3.33 a 1.44 días). Para la variedad ‘Cubanos’, si bien el modelo beta mostró un RMSE ligeramente mayor (6.06 días) comparado con el lineal (5.5 días), esta diferencia no es estadísticamente significativa ($p > 0.05$) y ambos modelos mantienen una precisión aceptable para fines de manejo agronómico.

Funcionalidad y desempeño del sistema SPEFA 1.0

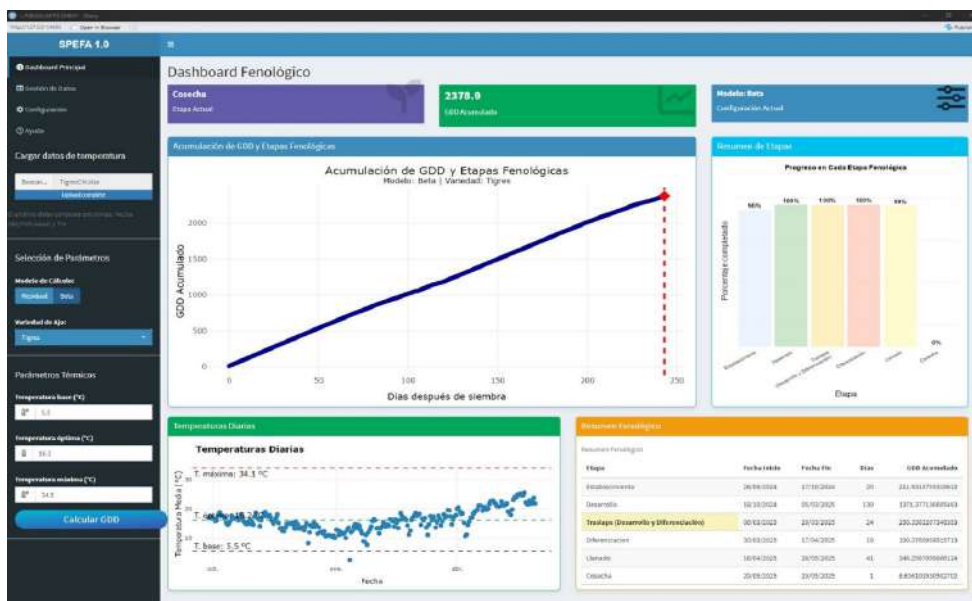
El sistema SPEFA 1.0 proporciona un desempeño robusto en la determinación de etapas fenológicas del cultivo de ajo, con una interfaz intuitiva y funcional para usuarios técnicos y productores. La aplicación implementa exitosamente los algoritmos de cálculo de GDD optimizados y los umbrales fenológicos específicos por variedad obtenidos en este estudio. El sistema ofrece cuatro módulos principales integrados en una interfaz de dashboard profesional

Módulo de la interfaz principal

Proporciona una visión integral del estado fenológico actual del cultivo, incluyendo (Figura 3):

- Value boxes indicadores con la etapa fenológica actual y GDD acumulado
- Visualización interactiva de la acumulación de GDD superpuesta con las ventanas fenológicas
- Gráfico de progreso porcentual por etapa fenológica
- Serie temporal de temperaturas diarias con umbrales térmicos
- Tabla resumen con fechas de inicio y fin de cada etapa

Figura 3. Captura de pantalla de la interfaz principal de SPEFA 1.0



Módulo de gestión de datos

El módulo de Gestión de Datos de SPEFA 1.0 fue diseñado para proporcionar transparencia total y trazabilidad sobre todo el proceso de cálculo (Figura 4). Este módulo no solo visualiza los datos de entrada (Fecha y Tm), sino que genera y presenta una tabla maestra completa que incluye:

- Datos de Entrada Originales: Fecha y Temperatura media diaria (Tm).
- Resultados de Cálculo Intermedios: GDD calculados para cada día según el modelo seleccionado.
- Resultados de Cálculo Acumulados: GDD acumulados desde la fecha de siembra.
- Resultado Final de la Predicción: La etapa fenológica asignada para cada día.

Esta tabla interactiva, ofrece funcionalidades profesionales para el usuario final como: navegación y búsqueda, ordenamiento, copia y exportación de datos en formatos universales como CSV y Excel (.xlsx). La implementación de este módulo asegura que el usuario no confíe en una “caja negra”, sino que pueda revisar, validar y extraer cada paso del cálculo. Esto es crucial para la adopción de la herramienta por parte de técnicos e investigadores, quienes requieren verificar los resultados y utilizar los datos para análisis posteriores o para la elaboración de reportes. La capacidad de exportar la tabla completa con todos los campos facilita enormemente el flujo de trabajo, permitiendo que las predicciones fenológicas generadas por SPEFA 1.0 se integren fácilmente en otros sistemas de información o documentos de planificación agronómica.

Figura 4. Captura de pantalla del módulo de gestión de datos de SPEFA 1.0

Gestión de Datos

Datos de Temperatura

Copy

CSV

Excel

Search:

	Fecha	Tm	Días_Siembra	GDD	GDD_Acum	Etapa
1	26/09/2024	16.9	0	10.66406057210016	10.66406057210016	Establecimiento
2	28/09/2024	17.8	1	10.55884789441214	21.22290846395431	Establecimiento
3	30/09/2024	16.8	2	10.67325754977040	31.89616578372679	Establecimiento
4	01/10/2024	17.1	3	10.64089543338479	42.53702220598051	Establecimiento
5	02/10/2024	16.8	4	10.68017417385446	53.2150943253791	Establecimiento
6	03/10/2024	15.8	5	10.68793488418983	63.91304107772781	Establecimiento
7	04/10/2024	16.2	6	10.7	74.61394107772781	Establecimiento
8	05/10/2024	17.8	7	10.51005543887584	85.13005543887584	Establecimiento
9	06/10/2024	16.8	8	10.22079967489105	95.35085513386689	Establecimiento
10	07/10/2024	18	9	10.40924741148789	105.76010260535478	Establecimiento

Showing 1 to 10 of 244 entries

Previous

1

2

3

4

5

...

25

Next

Export Data

Entrada Manual de Datos

Agregar Datos

Eliminar Datos

Módulo de configuración

Este módulo (Figura 5) fue diseñado específicamente para brindar máxima flexibilidad y adaptabilidad al sistema, reconociendo la diversidad de condiciones de cultivo y prácticas agronómicas existentes. Más allá de permitir simples ajustes, su arquitectura permite a investigadores, técnicos y productores definir y cargar sus propios umbrales fenológicos, basados en sus observaciones de campo específicas y conocimiento local.

Figura 5. Captura de pantalla del módulo de configuración de umbrales fenológicos de SPEFA 1.0

Configuración de Umbrales Fenológicos

Modificar Umbrales

Modelo: ☒ Residual ☐ Beta

Variedad: Cubanos

Guardar Configuración Restaurar Valores Predefinidos

Etapa	GDD_inicio	GDD_Fin
Establecimiento	0	200
Desarrollo	200	1190
Traslape	1190	1311
Diferenciación	1311	1391
Llenado	1391	1681
Cosecha	1681	

Importar/Exportar Configuración

Importar Configuración: Browse... No file selected

Exportar Configuración

Exportar configuración actual a Excel

Importar umbrales desde archivo Excel

Módulo de ayuda

Incluye información con especificaciones de la aplicación y de formato, también una breve descripción de los modelos térmicos.

Limitaciones y perspectivas

La principal limitación identificada es la dependencia de datos de temperatura de calidad. Futuras versiones del sistema podrían incorporar:

- Conexión automática con estaciones meteorológicas en tiempo real
- Integración con pronósticos climáticos para predicciones fenológicas prospectivas
- Expansión a otras variedades y regiones de cultivo
- Módulos de recomendación agronómica específicas por etapa fenológica

CONCLUSIONES

El proceso de optimización permitió determinar un único conjunto de parámetros térmicos cardinales para las tres variedades de ajo estudiadas en las condiciones de Zacatecas. Se establecieron umbrales específicos de GDD acumulados para cada transición fenológica en las variedades ‘Cubanos’, ‘Tigres’ y ‘Mármol Blanco’, donde el modelo beta demostró una mejor precisión en comparación al modelo lineal tradicional.

El sistema SPEFA 1.0 representa una herramienta valiosa para la agricultura de precisión en el cultivo de ajo, democratizando el acceso a tecnología de monitoreo fenológico basado en modelos fisiológicos robustos y validados experimentalmente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Aguas Firmes, implementado por la Cooperación Alemana para el Desarrollo

Sustentable (GIZ) y promovido por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ); a la cervecera líder AB InBev, a través de Grupo Modelo y Coca-Cola Company; y al INIFAP. Gran ref. SIGI: 1234837220 y 135051364.

LITERATURA CITADA

- Atif, M.; Amin, B.; Ghani, M.; Ali, M.; Zhang, S. & Cheng, Z. (2020). Effect of photoperiod and temperature on garlic (*Allium sativum* L.) bulbing and selected endogenous chemical factors. *Environmental and Experimental Botany* 180, 104250, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104250>
- Brewster, J. L. (2008). Onions and other vegetable alliums. 2nd ed. Wellesbourne, UK.
- Byrd, R. H., Lu, P., Nocedal, J., & Zhu, C. (1995). A limited memory algorithm for bound constrained optimization. *SIAM Journal on scientific computing*, 16(5), 1190-1208. <https://doi.org/10.1137/0916069>
- El-Zohiri, S. S. M., & Farag, A. A. (2014). Relation planting date, cultivars and growing degree-days on growth, yield and quality of garlic. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 3(4), 1169-1183.
- Liu, Y., Su, L., Wang, Q., Zhang, J., Shan, Y., & Deng, M. (2020). Comprehensive and quantitative analysis of growth characteristics of winter wheat in China based on growing degree days. *Advances in agronomy*, 159, 237-273. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.007>
- Lopez-Bellido, F. J., Lopez-Bellido, R. J., Muñoz-Romero, V., Fernandez-Garcia, P. & Lopez-Bellido, L. (2016). New phenological growth stages of garlic (*Allium sativum*). *Annals of Applied Biology* 169, 423-439.
- Major, D. J., Brown, D. M., Bootsma, A., Dupuis, G., Fairey, N. A., Grant, E. A., Green, D. G., Hamilton, R. I., Langille, J., Sonmor, L. G., Smeltzer, G. C. & White, R. P. (1983). An evaluation of the corn heat unit system for the short season growing regions across Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 63(1), 121-130. <https://doi.org/10.4141/cjps83-012>
- McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and forest meteorology*, 87(4), 291-300.
- Oh, S., Moon, K. H., & Koh, S. C. (2015). Assessment of High Temperature Impacts on Early Growth of Garlic Plant (*Allium sativum* L.) through Monitoring of Photosystem II Activities. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 33(6), 829-838. <http://dx.doi.org/10.7235/hort.2015.15078>
- Portela, J.A. and Cavagnaro, J.B. (2005). Growing phases of the white garlic (*allium sativum*) plant in relation to field temperature and day length. *Acta Hort.* 688, 239-246. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.688.32>

- Yan, W., & Hunt, L. A. (1999). An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. *Annals of Botany*, 84(5), 607–614. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.0955>
- Yin, X., Kropff, M. J., McLaren, G. & Visperas, R. M. (1995). A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 77, 1–16 (1995). [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02236-Q](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02236-Q)
- Zhou, G. and Wang, Q. (2018). A new nonlinear method for calculating growing degree days. *Scientific Reports* (2018) 8:10149. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28392-z>

Capítulo VII

Jorge Flores Velázquez^{1*}, Abraham Rojano Aguilar²,
Francisco García Herrera¹ y Aranza Hortencia Navarrete Torres¹

Simulación numérica del ambiente de una fábrica de plantas con luz artificial en una oficina para producir arúgula

RESUMEN

La tecnología para la producción de cultivos de interior es un sector en continuo desarrollo, tanto en tecnología para el uso eficiente de los recursos (energía), como diversificando el abanico de cultivos bajo esas condiciones. El objetivo de este trabajo fue simular el ambiente de una fábrica de plantas con luz artificial y natural usando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), en cultivo de Arúgula. Se construyó e instrumento una fábrica de plantas casera (H-PFAL) con luces artificiales y se complementa con luz natural. Se construyó un modelo computacional basado en CFD con el fin de simular el efecto del viento sobre la temperatura en el desarrollo del cultivo de Arúgula. Los resultados indican que, bajo las condiciones ensayadas, a pesar de velocidades de viento de 0.1-0.3 ms⁻¹, los rangos de temperatura permanecen dentro de los recomendados para los cultivos (16-28 °C). El aporte de la radiación natural (8 micromoles m²) es despreciable respecto a los requerimientos de las plantas (200 micromoles), sin embargo en este trabajo no se simuló, pero se pretende hacerlo para mejor análisis

Palabras Clave: Agricultura Urbana, Cultivo de hoja delgada, Dinámica de fluidos Computacional, gradiente térmico

ABSTRACT

The technology for the production of indoor crops is a sector in continuous development, both in technology for the efficient use of resources (energy), and diversifying the range of crops under these conditions. The objective of this work was to simulate the environment of a plant factory with artificial and natural light using Computational Fluid Dynamics (CFD), in Arugula cultivation. A homemade plant factory (H-PFAL) was built and implemented with artificial lighting, complemented by natural light. A CFD-based computational model was constructed to simulate the effect of wind on temperature and the development of arugula crops. The results indicate

^{1*} Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Ctra. Mex-Tex. Km 36.5. 56264. Texcoco Edo. de México. jorgelv@colpos.mx; fragarhe@gmail.com; aranza.navarrete07@gmail.com

² Universidad Autónoma Chapingo. Ctra. Mex-Tex. Km 36.5. 56230. Texcoco Edo. de México. abrojano@hotmail.com

that, under the tested conditions, despite wind speeds of 0.1-0.3 ms⁻¹, the temperature ranges remain within those recommended for crops (16-28 °C). The contribution of natural radiation (8 micromoles m²) is negligible compared to the requirements of the plants (200 micromoles), however, it was not simulated in this work, but it is intended to do so for better analysis.

Keywords: Urban Agriculture, Thin-leaf Crops, Computational Fluid Dynamics, Thermal Gradient.

INTRODUCCIÓN

La concepción de una fábrica de plantas con luz artificial casera o de oficina (H-PFAL) está basado en la idea de un biosistema que permite la producción de alimentos de manera controlada y sostenible, apoyada en técnicas para el aporte controlado de requerimientos de iluminación, nutrición y climáticas por las plantas (Contreras-Avilés., 2021). El control climático dentro de una H-PFAL, es más exigente que en sistemas convencionales de producción de interior, siendo la variable lumínica la de mayores impactos sobre las plantas. Por lo que comprender los requisitos específicos de la especie vegetal a cultivar hace la diferencia en el éxito de este biosistema (Mohammad et al., 2025). Las fábricas de plantas han demostrado ser una alternativa ante la actual crisis hídrica-alimentaria en zonas áridas y regiones urbanas (Esfandi et al, 2024). El control climático genera consumos energético mayores que el de la agricultura convencional lo que ha limitado el pleno desarrollo (Wenyi et al., 2025).

La agricultura de producción tradicional enfrenta desafíos en la sostenibilidad, debido a factores climáticos y de erosión del suelo, y con frecuencia son buscadas alternativas de producción de hortalizas, principalmente de porte bajo y con requerimientos previamente estudiados en otros sistemas de producción que permitieran tener una base para tomar decisiones en el manejo climático y lumínico a usar en las HPFAL (Álvarez-Chávez et., 2024). En ese sentido la arúgula también conocida como rúcula (*Eruca sativa*) es una verdura de hoja verde, que pertenece a la familia Brassicaceae, con una popularidad creciente por su sabor picante característico y sus compuestos benéficos (vitamina C, carotenoides, glucosinolatos, fenólicos) (Bonasia et al., 2017).

En términos de desarrollo urbano, han sido diversas las propuestas que han logrado pasar del prototipo a la implantación de biosistemas probando así su efectividad (Kozai, 2018), no solo como biosistema en sí, sino el énfasis en el uso eficiente de recursos como el agua (Parada et al., 2021) y la energía (Graamans et al., 2020) en sistemas integrados en las azoteas, (Integrate Roof toof greenhouse -RTG-, Fabricas de plantas con luz artificial -PFAL- y en general en la agricultura urbana (Karpe et al., 2025) atendiendo factores de espacio, uso eficiente de recursos y manejo (Flores-Velazquez, 2024).

La rúcula es un cultivo crecimiento rápido (20 a 30 días después de la germinación), y que por su sabor picante y fresco se ha convertido en un ingrediente gourmet popular en países como Portugal, Marruecos e Italia. De tal forma que la calidad es un elemento muy importante a cuidar su producción. Se ha encontrado que CE de entre 1.5 a 1.8 dSm⁻¹, y la producción en NFT producen mejor calidad visual y sabor más atractivo para los consumidores (Yang et al., 2021).

Gruda (2009), menciona que la producción de cultivos hortícolas en medios sin suelo como el caso de las HPFAL, es un sistema respetuoso con el ambiente sin embargo no garantiza la alta calidad, siendo de vital importancia cumplir con las demandas climáticas, hídricas y nutricionales del cultivo. Un alto rendimiento no tiene implícita la calidad por lo cual es necesario buscar el equilibrio entre ambas partes.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una herramienta que permite simular y analizar visual y gráficamente el entorno de cultivos en interior. Con la modelación ambiental se logran evaluar variables como la temperatura y humedad relativa y el impacto que tienen en el crecimiento de las plantas. Incluso se podría modelar y vigilar la programación y uso de elementos de control climático como ventiladores y humidificadores dentro de esos biosistemas con una mayor eficiencia (Pérez-Vega et al., 2021). La versatilidad, facilidad y precisión que ofrece CFD, ha causado que en el ámbito de la ingeniería sea una herramienta cada vez más socorrida, siendo utilizada regularmente para solucionar problemas ambientales y de control climático en instalaciones agrícolas varias, donde se ha logrado comprender con éxito fenómenos de transferencia de masa, calor y energía (Alves-Damasceno et al., 2011).

En este trabajo, se presenta una simulación CFD para el biosistema de una H-PFAL donde se desarrolló el cultivo de arúgula, implementando un sistema de iluminación híbrido que combinó luz natural y artificial. A través de este modelo, se busca entender cómo las condiciones ambientales, incluyendo el efecto del viento, influyen en la temperatura, humedad relativa y otros factores críticos para el desarrollo óptimo de la Arúgula.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio experimental

El experimento se desarrolló en las instalaciones del Posgrado de Postgraduados, en Montecillos Estado de México. Se construyó una minifábrica de plantas con luces artificiales conformada por 4 niveles, los dos primeros niveles (1 y 2) de abajo hacia arriba para el cultivo de Arúgula (*Eruca vesicaria*) y los dos niveles más altos (3 y 4) para el cultivo de lechuga variedad mantequilla (*Lactuca sativa* var. capitata). Con una capacidad instalada para cultivar 40 cempellones de arúgula y 16 plantas de lechuga.

El módulo se conformó con un exoesqueleto de acero cromado de 0.60x0.45x2.20 m (ancho x fondo x alto) con estantes verticales con separación de 0.42m, sobre los cuales se colocaron canaletas para hidroponía de 0.05x0.84x0.75 m con perforaciones a cada 0.125m a lo largo de la canaleta; en los niveles para el cultivo de arúgula se colocaron 4 canaletas distribuidas a cada 0.125m, mientras que los niveles de lechuga se conforman por 3 canaletas de 0.75m separadas a 0.14m. Las canaletas se colocaron a nivel y se interconectaron con accesorios (codos y tes) al final de cada nivel con una tubería de salida de PVC hidráulico de 1" de diámetro cuya trayectoria llega al tanque de almacenamiento con capacidad de 55L donde se localiza la solución nutritiva. El volumen de aire de la minifábrica de plantas es de 0.8m³ (Figura 1).

Figura 1. Mini Fábrica de Plantas con Luz Artificial en oficina.



El abastecimiento de la solución nutritiva se hace con un sistema NFT (Nutrient Film Technique) mediante una red de distribución que inicia en la bomba ubicada en el tanque de solución en la parte baja del módulo, hacia la parte más alta del módulo pasando por cada una de las canaletas, abasteciendo la solución mediante un tubin para riego localizado en cada canaleta, cuya longitud aumenta de nivel superior al inferior lo que permite disipar la ganancia de carga (energía) que se genera la trayectoria de la tubería de distribución al bajar de nivel. La tubería del sistema de distribución sube 0.30m al final de la última canaleta del primer nivel para gastar la carga de energía remanente al finalizar el trayecto de la tubería, si excede esta longitud, la solución se reintegra al tanque, esto ayuda a sacar el aire que se queda atorado en la tubería, mejorando con esto la salida continua del líquido en los tubines individuales de cada canaleta. Se selecciona una bomba con capacidad de 2500 a 3500 l/h, y carga a vencer hasta 2.8 m con un consumo eléctrico de 55W, la cual fue controlada por un temporizador digital de 20 eventos que garantizan la recirculación de la solución nutritiva programada de manera automática para encender la bomba cada 55 minutos con una duración de 17 minutos.

En cada nivel se colocaron 3 lámparas LED para crecimiento de cultivos marca Barrina de 24 W cada una, 0.60m de longitud con una separación de 0.17m entre ellas. Se determinó la altura adecuada de las lámparas con apoyo de un sensor Quantum Apogee MQ- 610 para medir el flujo de fotones (PPFD) lo que permitió ajustar dos tratamientos de luz por cultivo: el tratamiento uno (T1) con un promedio de 170 $\text{Mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y el tratamiento dos (T2) con un promedio de 220 $\text{Mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Se colocó un temporizador para prender y apagar las lámparas de manera automática, definiendo un fotoperiodo (Luz-Oscuridad-Luz-Oscuridad) de 5-6-7-6 horas, con la idea de no impactar en las actividades que se realizan en la oficina.

La solución nutritiva utilizada fue la propuesta por Hoagland y Arnon (1950), que contiene nitrógeno en dos formas: 14 mM de nitrato (N-NO_3^-) y 1 mM de amonio (N-NH_4^+). Además, contiene 1 mM de fósforo (P), 6 mM de potasio (K), 4 mM de calcio (Ca), 2 mM de magnesio (Mg) y 2 mM de azufre (S). Se emplearon las siguientes fuentes fertilizantes: nitrato de amonio (NH_4NO_3), nitrato de potasio (KNO_3), nitrato de calcio [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$], nitrato de magnesio [$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$], sulfato de magnesio (MgSO_4) y ácido bórico (H_3BO_3). Durante el ciclo de cultivo se mantuvo la solución con una concentración de 1.4 – 3.0 dS.

El cultivo de arúgula se germinó durante 21 días en invernadero, usando espuma fenólica y perlita como sustrato, después de este tiempo se trasplanto a la mini PFAL con un desarrollo vegetativo de 19-21 días; la lechuga se desarrolló en el invernadero durante 28 días con el mismo sustrato, y se desarrolló su ciclo de cultivo en 28 días después de su trasplante a la mini PFAL.

Sistema de monitoreo ambiental

Para el control climático se implementó un sistema de monitoreo basado en sensores tipo Arduino. Se colocaron sensores de temperatura y humedad dos en forma vertical en los noveles 1 y 3 para el seguimiento de esas variables a nivel de la planta y uno mas en el centro de la oficina para el seguimiento de las condiciones ambientales de la misma.

Se implementó un sistema de medición de variables en el lenguaje de programación Arduino (plataforma de código abierto en hardware y software), desarrollando dos circuitos electrónicos para el monitoreo; el primero para la medición de variables ambientales: Temperatura del aire (T_a), Humedad Relativa (HR) y Concentración de CO_2 (CO_2), usando para ello un sistema de Internet de la cosas (IoT) conectado a la plataforma ThingSpeak para la recopilación de las lecturas de los sensores y su visualización en tiempo real y el segundo para la medición de variables de la solución nutritiva: pH, Conductividad Eléctrica (CE), Oxígeno Disuelto (OD), Temperatura de la Solución (T_s). Así mismo, un sistema de visualización y respaldo de la información en una computadora de escritorio, mediante un programa para Windows programado en Delphi®, que interacciona con Arduino y almacena la información en el disco duro de la computadora de escritorio.

El monitoreo de variables se realizó de manera continua durante el Ciclo vegetativo de los cultivos desarrollados en los módulos HPFAL tomando información en intervalos de tiempo de 1 minuto. La visualización grafica de las variables de manera continua permitieron detectar errores en la medición de los sensores y corregir los problemas presentados también en tiempo real, en caso de mal funcionamiento o falta de conexión de los sensores.

Construcción del modelo numérico.

El flujo de trabajo de ANSYS-Fluent

El proceso de construcción del modelo computacional, está compuesto por una serie de pasos o etapas que deben seguir un orden e igual de importantes. Lograr un modelo numérico validado y capaz de reproducir el proceso físico que se desea a optimizar, es fundamental realizar los siguientes

pasos que en su conjunto aportan certeza y precisión en el proceso de simulación computacional. Cada etapa está diseñada para generar un modelo apto para su configuración y análisis del problema.

El flujo de trabajo de ANSYS-Fluent

El proceso de construcción del modelo computacional, está compuesto por una serie de pasos o etapas que deben seguir un orden e igual de importantes. Lograr un modelo numérico validado y capaz de reproducir el proceso físico que se desea a optimizar, es fundamental realizar los siguientes pasos que en su conjunto aportan certeza y precisión en el proceso de simulación computacional. Cada etapa está diseñada para generar un modelo apto para su configuración y análisis del problema.

Construcción de la geometría (Modulo Geometry)

El punto inicial es la construcción de una geometría a partir del prototipo; en este caso será la el ambiente de la H-PFAL. Se inicia con generar el dominio computacional que integra la geometría del modelo donde se llevara a cabo el proceso de simulación. Este paso incluye la definición precisa de las dimensiones y características del modelo, lo cual es esencial para la adecuada simulación de los fenómenos físicos involucrados. La geometría es la base para colocar las condiciones de frontera.

Generación de la malla (Modulo Meshing)

Una vez establecida la geometría, se realiza el proceso de discretización del modelo. Este paso, conocido como generación del mallado, divide el dominio en un numero finito de elementos de forma regular donde el simulador llevara a cabo el cálculo de las propiedades fluidas, lo que permite la solución numérica de las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema. Es crucial asegurar un mallado óptimo para garantizar la convergencia y precisión en los resultados (Figura 2).

Configuración del simulador (Modulo Fluent)

En esta fase, se configuran los parámetros bajo los cuales se llevará a cabo el cálculo. Esto incluye la selección de modelos físicos, la definición de las condiciones de contorno, y la especificación de las propiedades del material y fluido involucrado. La correcta parametrización es clave para la ejecución exitosa de la simulación. Mediante la configuración se establecen los requintos para alcanzar una solución en las evacuaciones de N-S.

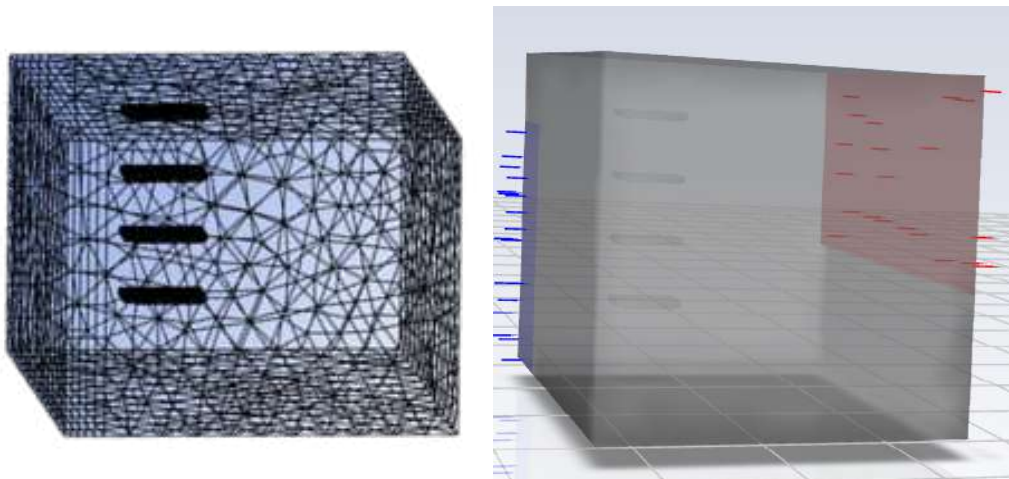
Postproceso

Finalmente, en esta etapa, se visualizan los resultados obtenidos de la simulación. Estos incluyen gráficos, contornos y otros elementos de análisis que permiten interpretar el comportamiento del sistema simulado. Es aquí donde se realiza una evaluación crítica de los resultados y su comparación con datos teóricos o experimentales, en caso de que se disponga de ellos.

Se utilizó el programa Anasys Fluent 2024 en su versión gratuita para estudiantes, para modelar la dinámica de fluidos dentro de la H-PFAL, para lo cual se desarrolló una geometría simplificada con el módulo Space Clean, que posteriormente se ligó al módulo mesh para nombrar las fronteras, así como el método de mallado. Se utilizaron 10553 elementos, con un tamaño de

elemento de 0.029699 m, para una calidad de mallado con Aspect ratio mínimo 1.1598 y máximo 10.2110, y para Orthogonal quality mínimo 0.2998 y máximo 0.9939

Figura 2. Vista de mallado y prototipo de HPFAL simulado en CFD



Una vez que la malla fue de buena calidad de acuerdo a los parámetros antes mencionados, se configuraron las características físicas del modelo en Fluent, donde se utilizó el modelo K-épsilon para la resolución de las ecuaciones de masa, momento y energía como se muestra en la ecuación 1.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} + \sum_{j=1} \frac{\partial}{\partial X_j} (U_j \phi) = \sum_{j=1} \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\tau_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial X_j} \right) + S_{\phi} \quad (1)$$

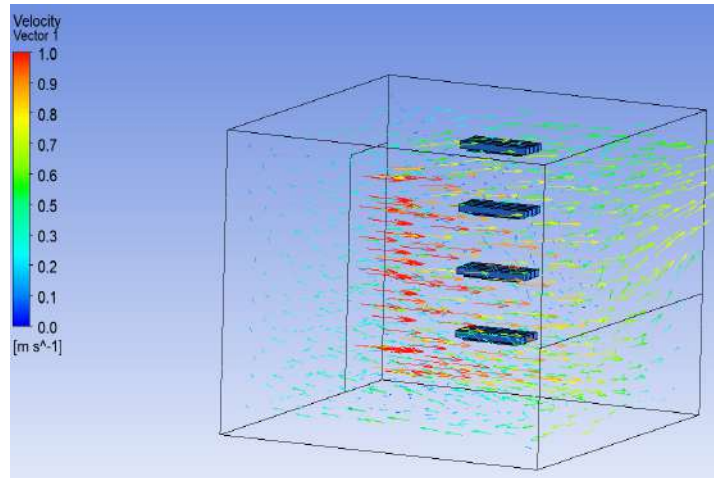
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 3 muestra el ambiente simulado de la oficina en su totalidad, son representados los vectores de velocidad de viento (m s⁻¹) diferenciados por magnitud y sentido. Se probaron diversos escenarios, el que se muestra en la figura 3 consiste en una entrada de aire por la puerta y la salida por la ventana superior en la pared opuesta. Cabe señalar que la puerta da a un pasillo interior en el edificio, por lo que realmente las velocidades del viento oscilan entre 0.1 y 1 m s⁻¹, y hacia la ventana de salida se comunica directamente al medio ambiente por lo que en este caso la ventana hace las veces de extractor al generar un efecto Venturi.

Los vectores de entrada indican velocidades de 1 ms⁻¹ sin embargo una vez que ingresan esa velocidad disminuye hasta valores de 0.2 ms⁻¹. Resalta que las mayores áreas de exposición son en la dirección de la fábrica de plantas lo cual favorece el intercambio de aire y en consecuencia, se infiere las condiciones medioambientales. Aun cuando en este trabajo solo se muestran los vectores de velocidad (Figura 3) y distribución espacial de temperaturas (Figura 4), con base a relaciones climáticas expuestas en investigaciones como los de Graamans et al. (2020) y recientemente Wenyi et al., (2025), donde analizan los consumos energéticos de las fábricas de plantas en ambientes

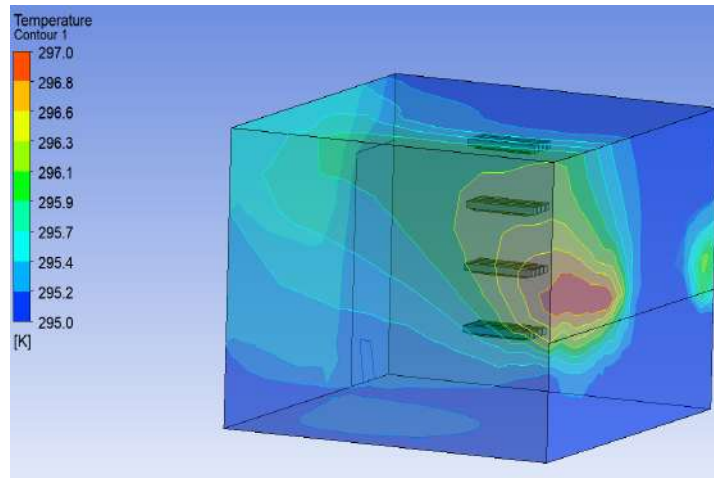
urbanos y su dependencia de las condiciones climáticas locales, se puede plantear hipótesis que también se beneficia la humedad relativa y en consecuencia el déficit de presión de vapor.

Figura 3. Vectores de velocidad dentro de la HPFAL



En cuanto a la temperatura, la figura 4 presenta el comportamiento térmico ambiental de la oficina con los detalles de la fábrica de plantas. Resalta la “bolsa” de calor en el centro de la fábrica de plantas en si en el eremos opuesto de la entrada del aire; lo anterior tiene sentido y coincide con trabajos realizados como el del Lim et al. (2014), donde el consumo de momento en la zona de cultivo, provoca la caída de presión lo cual reduce la velocidad del viento y en consecuencia aumenta la temperatura.

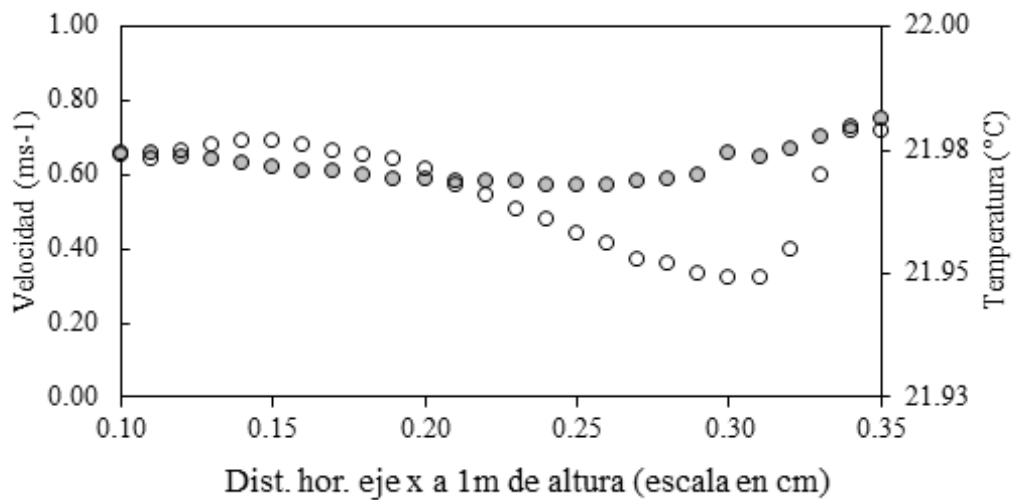
Figura 4. Contornos de temperatura en la HPFAL



Es conveniente resaltar que el ambiente es el de una oficina, aun cuando se observa un punto rojo, el gradiente de temperatura oscila los 2K que en términos de la producción del cultivo,

no repercute en diferencias fisiológicas, siendo un factor favorable en zonas urbanas (Kozai, 2018; Esfandi et al., 2024) ya que los promedios de temperatura dentro de la oficina permanecen en rango y próximos al óptimo fisiológico (Figura 5). La figura 5 muestra el perfil de una línea de corriente con la variación de la rapidez del viento (ms^{-1}) y su consecuente temperatura $^{\circ}\text{C}$. La rapidez del viento tiene 0.2 ms^{-1} de variación entre la entrada y salida del aire cruzando el cultivo, sin embargo lo que se destaca es la estabilidad térmica en la zona del cultivo, pues esta permanece estable con una variación menor a $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 5. Temperatura $^{\circ}\text{C}$ (●) y Velocidad del viento ms^{-1} (○) en la HPFAL.



CONCLUSIONES

En el sector agricultura protegida, la dinámica de fluidos computacional (CFD) ha probado su uso y ventajas con representaciones fidedignas de procesos físicos donde se involucran fluidos en movimiento; en este trabajo se usa CFD con modelos y submodelos probados principalmente en invernaderos para simular la dinámica ambiental de una fábrica de plantas de interior. Derivado de los resultados obtenidos, las conclusiones son que con el modelo de turbulencia y balances de momento y energía ha sido posible simular y observar con mayor detalle los vectores de viento, rapidez y dirección y su consecuente impacto en los gradientes de temperatura. Por lo que se considera que se alcanzó el objetivo. Bajo las condiciones ensayadas se obtuvo una representación gráfica sobre la dinámica del viento y temperatura en el interior de una oficina donde se cultiva Arúgula en una fábrica de plantas con luces artificiales. Los detalles de la dinámica ambiental permiten inferir que en dichas condiciones el manejo del ambiente puede quedar exento de un control climático riguroso, al ser estables los rangos de temperatura. Queda claro que obtener un modelo que integre balance de masa y radiación de las luces artificiales sería ideal, por lo que se plantea realizar estos ajustes en futuros trabajos.

LITERATURA CITADA

ANSYS Fluent. [2025], Recuperado de: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

Alves Damasceno, Flávio, da Costa Baêta, Fernando, Arêdes Martins, Marcio, Osorio Saraz, Jairo Alexander, & Ferreira Tinoco, Ilda de Fátima. (2011). Computational fluid dynamics (CFD) and it's use for analysis of gas distribution inside animal production facilities: a literature review. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 14(2), 83-93. Retrieved July 26, 2025

Contreras-Avilés, Willy. (2021). Fábrica de plantas con iluminación artificial para el cultivo y preservación sostenible de hierbas medicinales. *Revista Prisma Tecnológico*. 11. 1-10. 10.33412/pri.v11.1.2522

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262011000200009&lng=en&tlng=.

Bonasia, Lazzizera Corrado, Conversa Giulia. (2017) Nutritional, Biophysical and Physiological Characteristics of Wild Rocket Genotypes as Affected by Soilless Cultivation System, Salinity Level of Nutrient Solution and Growing Period. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 8. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2017.00300>. DOI=10.3389/fpls.2017.00300. ISSN=1664-462X

Esfandi, S., Tayebi, S., Byrne, J., Taminiau, J., Giyahchi, G., & Alavi, S. A. Smart Cities and Urban Energy Planning: An Advanced Review of Promises and Challenges. *Smart Cities*, 7(1), 414-444. 2024

<https://doi.org/10.3390/smartcities7010016>

Flores Velazquez, J. 2024. Critical Requirements to Implementing Vertical Farming Technologies. The Challenge to Reduce Cost. in Al-Kodmany, K., Ng, A.K., Tablada, A., & Kole, C. (Eds.). (2024). *The Vertical Farm: Scientific Advances and Technological Developments* (1st ed.). CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/b23309>

Gruda, N. (2009). Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables?. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 82, 141-147. <https://doi.org/10.18452/9433>

Graamans L., Martin Tenpierik, Andy van den Dobbelsteen, Cecilia Stanghellini. 2020. Plant factories: Reducing energy demand at high internal heat loads through façade design, *Applied Energy*, 262, , 114544,

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114544>

Karpe M., Jeremias Lachman, Lili Wang, Leo F.M. Marcelis, Ep Heuvelink. 2025. Potential for

urban agriculture: Expert insights on sustainable development goals and future challenges, *Sustainable Production and Consumption*, 57, 16-34,

<https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.05.001>

Kozai, T. Plant factories with artificial lighting (PFALs): Benefits, problems, and challenges. En *Smart Plant Factory* (pp. 15–29). Springer. 2018

https://doi.org/10.1007/978-981-13-1065-2_2

Mohammad Hossein Amirshakari, Mohammad Fakhroleslam. (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*, Volume 11, 100901, ISSN 2772-3755, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100901>.

Lim, T.-G., & Kim, Y. H. (2014). Analysis of Airflow Pattern in Plant Factory with Different Inlet and Outlet Locations using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Biosystems Engineering*, 39(4), 310–317. <https://doi.org/10.5307/JBE.2014.39.4.310>

Parada F., Xavier Gabarrell, Martí Rufi-Salís, Verónica Arcas-Pilz, Pere Muñoz, Gara Villalba. 2021. Optimizing irrigation in urban agriculture for tomato crops in rooftop greenhouses, *Science of The Total Environment*, 794, 148689, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148689>

Pérez-Vega, Cuauhtémoc, Ramírez-Arias, José Armando, López-Cruz, Irineo L., Arteaga-Ramírez, Ramón, & Cervantes-Osornio, Rocío. (2021). Modelación mediante dinámica de fluidos computacional 3D de temperatura y humedad en un invernadero con humidificación. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 13(1), 16-33. Epub 13 de junio de 2022. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2020.10.060>

Sara R Jaeger. (2024) Vertical farming (plant factory with artificial lighting) and its produce: consumer insights, *Current Opinion in Food Science*, Volume 56, 101145, ISSN 2214-7993, <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101145>.

Wenyi Cai, Kunlang Bu, Lingyan Zha, Jingjin Zhang, Dayi Lai, Hua Bao. (2025). Energy consumption of plant factory with artificial light: Challenges and opportunities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 210, 115235, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115235>.

Yang, T., Samarakoon, U., Altland, J. y Ling, P. (2021). Fotosíntesis, producción de biomasa, calidad nutricional y propiedades fitoquímicas relacionadas con el sabor de la rúcula hidropónica (*Eruca sativa* Mill.) «estándar» bajo diferentes conductividades eléctricas de la solución nutritiva. *Agronomía*, 11 (7), 1340. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071340>

Capítulo VIII

Daybelis Fernández Valdés¹, Adolfo López Liévano²,
Dayvis Fernández Valdés¹ y María Victoria Gómez Águila³

Análisis transitorio del mecanismo de cargador frontal de una retroexcavadora mediante elementos finitos

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla una metodología para la evaluación del mecanismo de cargador frontal de una retroexcavadora, considerada como equipo de maquinaria agrícola y de construcción utilizado en labores de movimiento y preparación de suelos. El análisis se realizó mediante simulación transitoria utilizando el método del elemento finito en el software ANSYS. Para ello, se modeló geométricamente el conjunto estructural, compuesto por el cucharón, los brazos principales y los elementos de enlace, empleando como material el acero ASTM A572 Grado 50. Posteriormente se realizó el mallado del modelo, condiciones de fronteras y cargas dinámicas que representan el funcionamiento real del equipo durante 5 s. El análisis permitió identificar la evolución de los esfuerzos de von Mises, localizando las zonas más críticas del mecanismo. Finalmente se aplicó la técnica de submodelado en dichas regiones, con el fin de obtener una mayor precisión en la estimación de los esfuerzos. Los resultados obtenidos muestran que los brazos principales constituyen los elementos más solicitados durante la operación, lo que confirma la validez de la metodología propuesta para el estudio de maquinaria agrícola bajo condiciones dinámicas.

Palabras clave: retroexcavadora, análisis transitorio, elementos finitos.

ABSTRACT

This work develops a methodology for evaluating the front loader mechanism of a backhoe, considered as part of agricultural and construction machinery used in soil movement and land preparation tasks. The analysis was carried out through transient simulation using the finite element method in ANSYS. For this purpose, the structural assembly, consisting of the bucket,

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Acayucan, Carretera Costera del Golfo km. 216.4, Agrícola Michapa, Acayucan 96100, Veracruz, México. daybelis.fv@itsacayucan.edu.mx, dayvis.vl@itsacayucan.edu.mx

² Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería, Campus Coatzacoalcos, Av. Universidad Veracruzana km. 7.5, Santa Isabel, Coatzacoalcos 96538, Veracruz, México. adolopez@uv.mx

³ Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Edo México, CP 56230. México. mgomez@chapingo.mx

the main arms, and the linkage elements, was geometrically modeled, employing ASTM A572 Grade 50 steel as the material. The model was subsequently meshed, and boundary conditions and dynamic loads representing the actual operation of the equipment over a 5-second period were applied. The analysis enabled the identification of the evolution of von Mises stresses, highlighting the most critical regions of the mechanism. Finally, a submodeling technique was applied in these regions to achieve greater accuracy in stress estimation. The results show that the main arms are the most highly stressed elements during operation, which confirms the validity of the proposed methodology for the study of agricultural machinery under dynamic conditions.

Keywords: backhoe, transient analysis, finite elements

INTRODUCCIÓN

La mecanización agrícola moderna depende en gran medida del uso de maquinaria robusta y eficientes para labores de preparación de suelos, cosecha, transporte y manejo de subproductos agrícolas. Entre los equipos más versátiles se encuentra la retroexcavadora-cargadora (Thombarer, 2021; Tewari y Chahuan, 2020). Desde el punto de vista estructural, esta máquina se conforma por tres secciones principales: el cargador delantero, el implemento trasero y la cabina de operación. El conjunto frontal, considerado uno de los elementos esenciales está integrado por el cucharón, los brazos de elevación, los cilindros hidráulicos y el sistema de acople que permite su movimiento. En el ámbito agrícola, este accesorio resulta de gran utilidad, ya que permite cargar y transportar tierra o abono, nivelar superficies, limpiar caminos rurales y desazolver canales, lo que incrementa la eficiencia en diversas labores del campo.

Estas condiciones de operación exponen a los equipos a cargas dinámicas variables que pueden generar esfuerzos críticos y acelerar la aparición de fallas estructurales (Hiermaier, 2007; Vorob'ev y Vorob'eva, 2024). En este contexto el análisis estructural transitorio mediante el método de elemento finito (MEF) se presenta como una herramienta clave para evaluar de manera más realista el desempeño de la maquinaria bajo escenarios de servicios representativos (Flores et al., 2010; Filla y Palmberg, 2003).

Diversos estudios han demostrado el alcance del método del elemento finito en el análisis y diseño de implementos agrícolas. Por ejemplo, Nasemozadat et al., 2022 aplicaron FEM en un arado de reja y vertedera, evaluando zonas críticas de esfuerzos. Hashaam et al. (2023) realizaron un análisis tridimensional de cucharas de cultivador de puás y su interacción con distintos tipos de suelos, identificando las zonas de altos esfuerzos y sensibles a grietas; mientras que Sahay y Srivastava (2017) evaluaron y optimizaron diferentes geometrías de dientes de cucharón de excavadora, mejorando la distribución de esfuerzos y el factor de seguridad. Por otro lado, Sun et al. (2023) analizaron mediante simulación numérica el desempeño de un cucharón de excavadora, identificando las regiones de mayor concentración de esfuerzos y proponiendo criterios de diseño para mejorar su durabilidad bajo cargas variables. De manera similar, Jaison y Ramesh Kumar (2016) diseñaron un sistema desmontable de retroexcavadora y cargador para tractor agrícola mediante modelado CAD y FEM, demostrando la viabilidad estructural del implemento sin necesidad de fabricar prototipos,

de manera análoga al enfoque intuitivo en la interfaz para retroexcavadora hidráulica desarrollado por Yoon y Manurung (2010). Sin embargo, a pesar de estos avances, aún no se ha establecido una metodología específica que permita abordar de manera integral los análisis transitorios en este tipo de implementos.

En este contexto, el presente trabajo propone una metodología sistemática basada en un análisis transitorio por elementos finitos para evaluar retroexcavadoras, lo cual puede servir como base para futuros estudios de otros implementos agrícolas o de construcción, ofreciendo un marco replicable que integra la ingeniería mecánica con las ciencias agronómicas para optimizar el diseño y mejorar la seguridad y eficiencia de la maquinaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Geometría del mecanismo de carga frontal

El análisis transitorio tridimensional del mecanismo de cargador frontal se realizó mediante el programa comercial ANSYS, con una duración de 5 s. Para la simulación se consideró únicamente la geometría del conjunto, integrada por el cucharón o pala, los brazos principales, los brazos de inversión de movimiento, las bielas del cucharón y los pernos de conexión.

Los cilindros hidráulicos que accionan el mecanismo no fueron modelados explícitamente; en su lugar se implementaron conexiones tipo *joint* que permiten reproducir el movimiento del sistema, tal como se describe a continuación.

Definiciones de conexiones (*joints*)

El modelo incluyó un conjunto de uniones tipo Revolute, General y Fixed, las cuales reproducen la cinemática del sistema (Figura 1). Las conexiones definidas en el lado izquierdo se repiten de manera simétrica en el lado derecho del mecanismo:

- **Joint 1 (General):** articula la unión de las *bielas* con el *cucharón*, restringiendo las traslaciones en los tres ejes (X, Y, Z) y permitiendo rotaciones libres (RX, RY, RZ).
- **Joint 2 (General):** conecta el *brazo principal* con el *cucharón*, con la misma configuración de grados de libertad que el Joint 1.
- **Joint 3 (Revolute):** vincula el *brazo de inversión* con la *biela del cucharón*, permitiendo únicamente la rotación alrededor de un eje definido, como una bisagra.
- **Joint 4 (Revolute):** conecta el *brazo principal* con el *brazo de inversión*, representando otra articulación pivotante de un solo eje.
- **Joint 5 (General):** corresponde a la unión del *brazo de inversión* con el *perno de unión*, configurado como general para permitir flexibilidad en los grados de libertad asociados a su montaje.
- **Joint 6 (Fixed):** conecta el *perno de unión 1* con el *brazo principal 1*, restringiendo los

seis grados de libertad para impedir movimiento relativo. Esta condición representa el anclaje rígido del perno al bastidor, equivalente al montaje real del mecanismo cargador en la retroexcavadora.

Las uniones *Revolute* se emplearon en las conexiones con geometría de bisagra definida, donde un único eje domina el movimiento. En contraste, las uniones *General* se aplicaron en enlaces más complejos, donde no era apropiado restringir el comportamiento a un solo eje, lo que permitió un mayor control sobre los grados de libertad y una representación más realista de la cinemática. Finalmente, la unión *Fixed* aseguró el anclaje del mecanismo al marco, proporcionando la referencia estructural del sistema.

Figura 1. Conexiones entre los elementos del mecanismo de cargador frontal



Estimación de la carga en el cucharón frontal

Para estimar la carga aplicada sobre el mecanismo cargador se consideró un cucharón con volumen nominal de $V_{\text{cucharón}}=0.76\text{m}^3$, de acuerdo con el manual técnico de Caterpillar (2015). El material contenido se asumió como tierra suelta con peso unitario $\gamma_{\text{tierra}}=17\text{kN/m}^3$, valor tomado de literatura estándar de geotecnia (Das, 2010).

La conversión de peso unitario a densidad a granel se realizó mediante la relación obteniéndose:

$$\rho_{\text{tierra}} = \frac{\gamma_{\text{tierra}}}{g} = \frac{17,000 \text{ N/m}^3}{9.81 \text{ m/s}^2} \approx 1,733 \text{ kg/m}^3 \quad (1)$$

Con este valor, la masa del material que llena completamente el cucharón es:

$$m_{\text{cargar}} = \rho_{\text{tierra}} V_{\text{cucharón}} = \left(1,700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0.76 \text{ m}^3) \approx 1,317 \text{ kg} \quad (2)$$

Posteriormente, el peso del material se calculó como:

$$W_{\text{max}} = m_{\text{cargar}} g = (1,292 \text{ kg}) (9.81 \text{ m/s}^2) = 12.920 \text{ kN} \quad (3)$$

Condiciones de carga y de frontera

Análisis transitorio

En este estudio, se empleó un análisis estructural de estado transitorio, debido a que el movimiento del mecanismo cargador frontal ocurre de manera dependiente del tiempo, a través de un giro progresivo de las articulaciones, que hace que el cucharón produzca un movimiento de “levantamiento” de la carga, lo que presupone que pueda haber variaciones de esfuerzos. Este enfoque permite capturar la evolución de los esfuerzos y deformaciones a lo largo del ciclo de operación, además de representar de forma más realista la interacción cinemática entre los distintos eslabones del sistema. Por otra parte, un análisis estático únicamente mostraría estados finales de carga, sin reflejar adecuadamente la transmisión progresiva de esfuerzos durante el movimiento. En cambio, el análisis transitorio se fundamenta en la ecuación general del equilibrio dinámico:

$$\underset{F_{\text{inercia}}}{[M]\{\ddot{u}\}} + \underset{F_{\text{amortiguamiento}}}{[C]\{\dot{u}\}} + \underset{F_{\text{rigidez}}}{[K(u)]\{u\}} = \underset{F_{\text{aplicada}}}{\{F(t)\}} \quad (4)$$

donde:

- $[M]$ es la matriz de masa, asociada a los efectos de inercia,
- $[C]$ es la matriz de amortiguamiento,
- $[K(u)]$ es la matriz de rigidez dependiente de los desplazamientos,
- $\{u\}, \{\dot{u}\}, \{\ddot{u}\}$ representan desplazamientos, velocidades y aceleraciones nodales,
- $\{F(t)\}$ corresponde al vector de cargas externas dependientes del tiempo.

Condiciones de carga

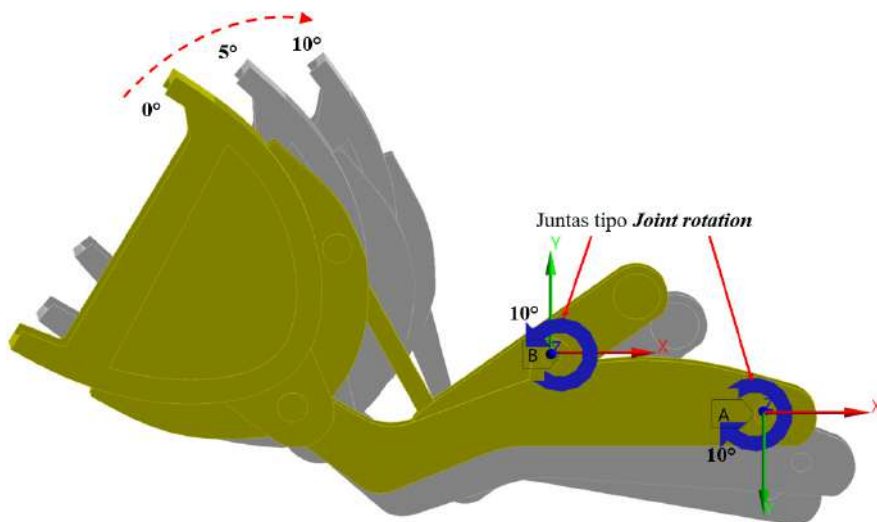
La carga principal sobre el mecanismo se representó mediante un Point Mass de 1317 kg, aplicado en la zona central del cucharón a través de un *Remote Attachment*. Este valor corresponde a la masa de tierra suelta que llena el volumen nominal del cucharón, calculada a partir de un peso unitario de $\gamma=17 \text{ kN/m}^3$ (Das, 2010) y un volumen de 0.76 m^3 de acuerdo con el manual técnico de Caterpillar (2015). Al activar la gravedad estándar en ANSYS, la masa puntual generó automáticamente una carga equivalente de peso de aproximadamente 12.9 kN, transmitida al mecanismo mediante las

uniones previamente definidas. Esta configuración reproduce de manera simplificada pero realista el efecto del material cargado.

Condiciones de frontera y prescripción del giro

En la figura 2 se muestra la aplicación de las juntas de rotación (Joint rotation) en los puntos de unión A y B, correspondientes a las articulaciones entre los brazos principales y los brazos de inversión. El movimiento se prescribió como un giro progresivo en el eje Z, desde 0° hasta 10° durante un intervalo de 5 segundos, representando la acción equivalente a la que ejercen los cilindros hidráulicos en la retroexcavadora real. Con esta estrategia se reproduce de manera simplificada el movimiento de volteo del cucharón, garantizando que los esfuerzos y deformaciones se transmitan a través de la cinemática definida por las uniones.

Figura 2. Cinemática del mecanismo: prescripción de giro mediante juntas de rotación



Propiedades mecánicas del mecanismo de cargador frontal

El material con el que se fabrica el cucharón frontal corresponde a aceros de alta resistencia. De acuerdo con el manual Cat® Hydraulic Excavator Buckets: 311–390 Hydraulic Excavators (GEHQ2201-07-15) (Caterpillar Inc., 2015), están fabricados en acero microaleado de alta resistencia, templado y revenido, con un esfuerzo de cedencia mínimo de 90,000 psi (≈ 620 MPa).

De manera complementaria, otras fuentes industriales señalan la utilización de aceros estructurales como el ASTM A572 Grado 50, con un límite elástico mínimo de 50,000 psi (≈ 345 MPa), en componentes donde se requiere un balance entre resistencia, facilidad de fabricación y soldabilidad (Gold Forging, 2025).

En términos de propiedades elásticas, tanto el acero microaleado de alta resistencia, templado y revenido como el ASTM A572 Gr.50 presentan valores típicos de módulo de Young $E \approx$

200–210 GPa y coeficiente de Poisson $\nu \approx 0.29–0.30$, consistentes con los aceros estructurales de alta resistencia reportados en la literatura.

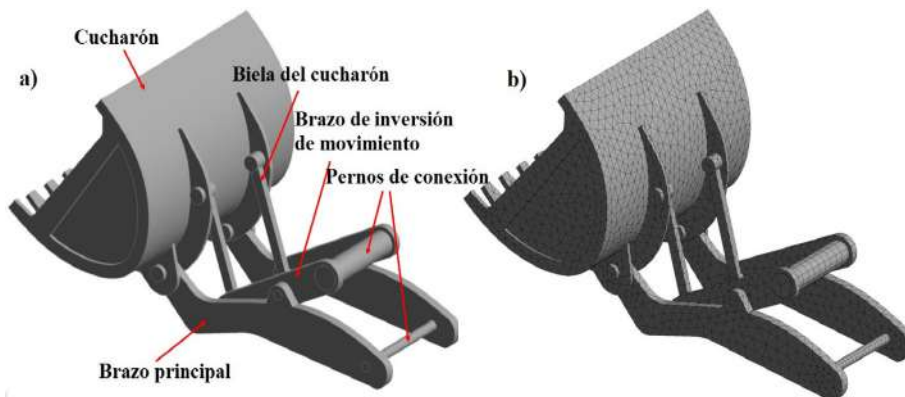
En el presente trabajo se empleó el esfuerzo de cedencia de 345 MPa, módulo de elasticidad de 200 GPa y coeficiente de Poisson de 0.3, tomados del acero estructural ASTM A572 Grado 50, mencionado anteriormente, para el cucharón frontal y el resto de los componentes.

Estrategia de mallado y submodelado

El ensamble completo se analizó inicialmente con una malla básica (poco refinada), con el objetivo de acelerar el cálculo preliminar e identificar las zonas críticas con mayores concentraciones de esfuerzos. Para ello, se utilizó un tamaño global de elemento de 100 mm, generando un total de 5122 nodos en una malla compuesta por elementos tetraédricos (ver Figura 3 b).

Una vez sean identificadas dichas zonas, se procede a aplicar la técnica de submodelado, que consiste en extraer únicamente la porción de la geometría de interés y analizarla de manera independiente con una malla refinada. Este procedimiento permite obtener resultados más precisos en menor tiempo, evitando la necesidad de refinar desde el inicio el sistema completo, que llamaremos modelo global.

Figura 3. Modelo global. Geometría (a) y malla (b)

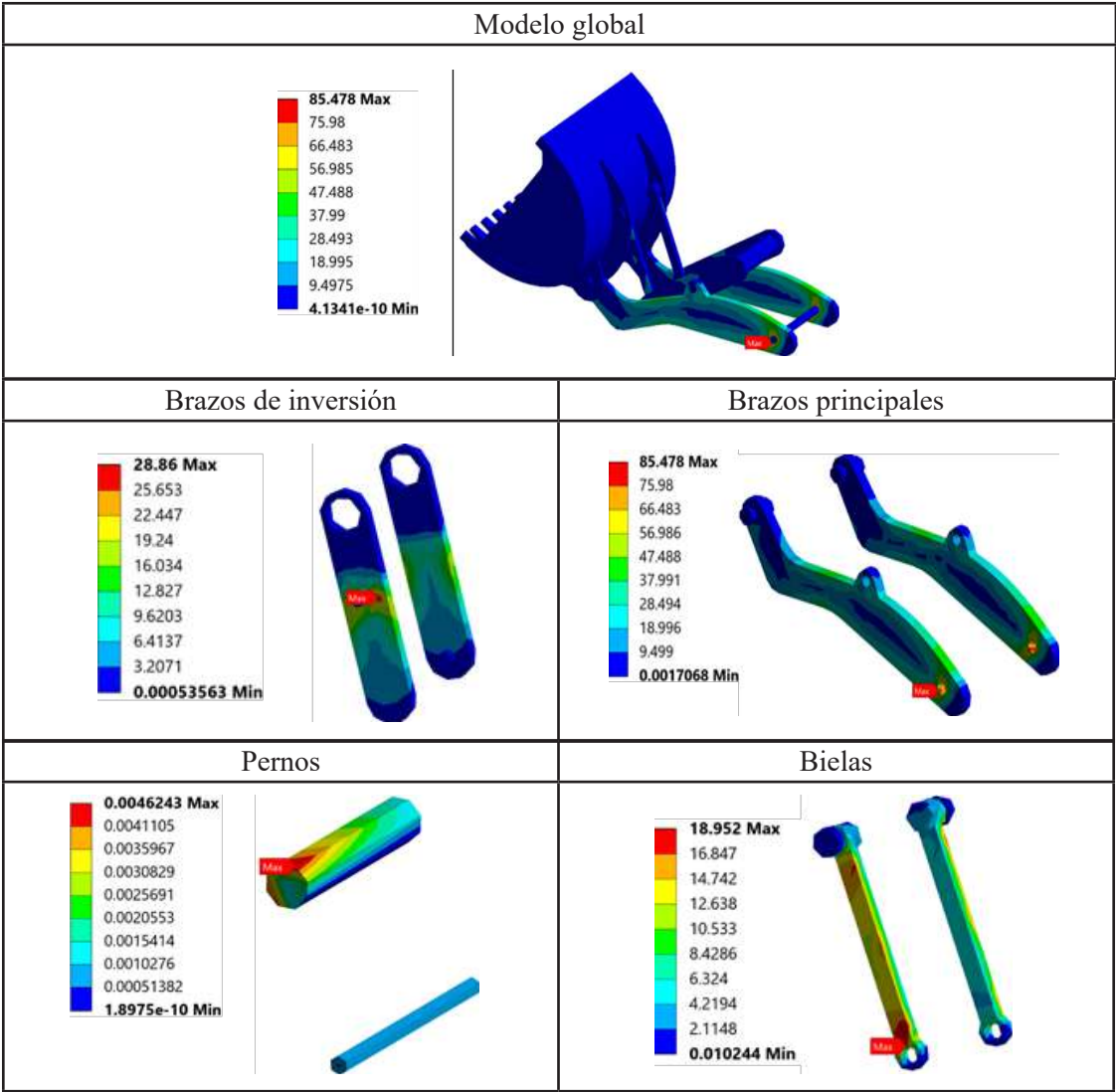


RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 4 se muestra la distribución de los esfuerzos de von Mises a un tiempo de 5 s en el mecanismo del cargador frontal y en sus principales componentes. Se observa que la mayor concentración de esfuerzo se localiza en el brazo principal derecho en la zona de acople con el perno de conexión, alcanzando un valor máximo de 85.478 MPa, mientras que el resto de la estructura muestra niveles de esfuerzos por debajo de los 30 MPa. Cabe señalar que, por la simetría del modelo, así como de las condiciones de frontera y de carga, los esfuerzos deberían ser iguales en ambos lados. Sin embargo, al emplear una malla básica y no ordenada, se generan diferencias numéricas en la distribución de esfuerzos, que no responden a la física real del problema, lo que plantea la necesidad de mejorar la malla.

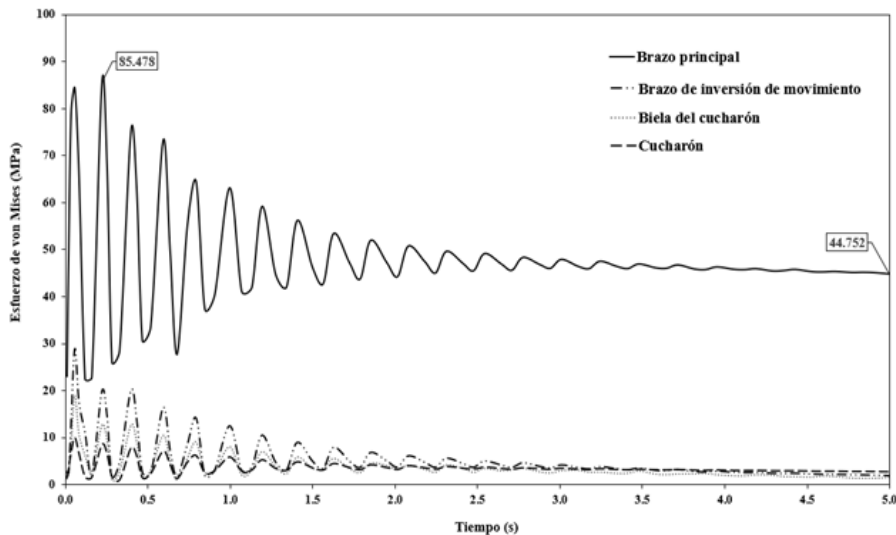
Estos resultados indican que, bajo las condiciones transitorias analizadas, los esfuerzos equivalentes se mantienen muy por debajo del límite elástico del acero empleado (345 MPa); sin embargo, debido a la pobreza de la malla, y la no simetría de los esfuerzos máximos, explicado anteriormente, se procedió a realizar un submodelado con la finalidad de encontrar el valor de esfuerzos más exactos y precisos.

Figura 4. Distribución de los esfuerzos equivalentes (von Mises) en los componentes del mecanismo de cargador frontal



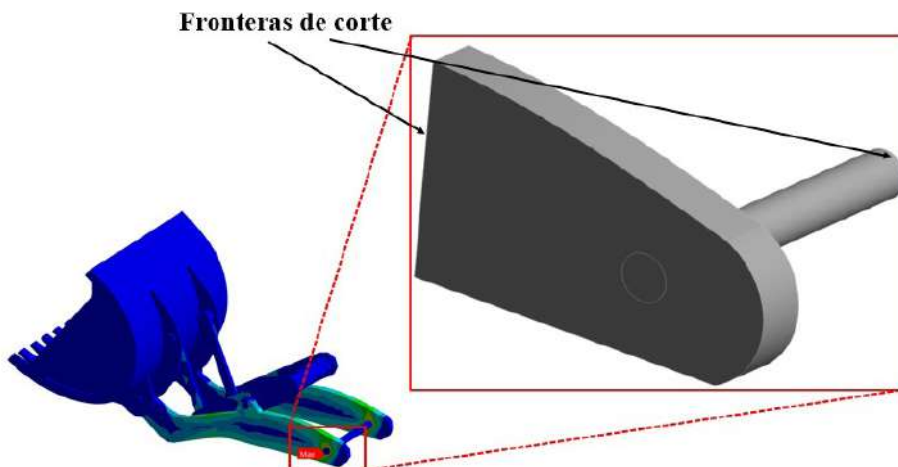
En la gráfica de la figura 5 se relaciona el comportamiento del esfuerzo contra el tiempo, y resalta que el mayor esfuerzo de von Mises se presenta en la conexión del perno de unión con el brazo principal, con un valor máximo de 85.47 MPa en el segundo 0.22, mientras que al final del intervalo de la simulación (5 s) el esfuerzo se reduce hasta estabilizarse en torno a los 44.75 MPa. Este comportamiento evidencia que los picos iniciales de esfuerzo se deben al impacto dinámico generado por la aplicación súbita de la carga que aplican los cilindros hidráulicos, representados aquí por las rotaciones de 10 grados, lo que provoca oscilaciones más pronunciada en los primeros instantes del movimiento. Dichas oscilaciones corresponden a la respuesta vibratoria natural del sistema estructural, donde la energía de entrada es mayor y se produce un ajuste dinámico entre los componentes. Con el transcurso del tiempo, la disipación de energía y la redistribución de cargas permiten que las vibraciones se amortigüen progresivamente, hasta alcanzar un régimen estable con menores variaciones de esfuerzo. Este resultado confirma que el brazo principal constituye el elemento crítico del mecanismo, al concentrar los mayores niveles de esfuerzos durante la operación transitoria, mientras que los demás componentes experimentan esfuerzos significativamente menores y de rápida estabilización.

Figura 5. Evolución temporal del esfuerzo de von Mises en el cargador frontal de una retroexcavadora



En la figura 6 se presenta el submodelado realizado sobre el mecanismo de cargador frontal de la retroexcavadora, con el objetivo de tener una mayor precisión en la zona crítica previamente identificada. El submodelo se definió de modo que sus fronteras de corte quedaran lo suficientemente alejadas de las concentraciones de esfuerzos, con el fin de evitar falsos picos numéricos. Adicionalmente, se incluyó una unión fija, *Fixed Joint*, en la unión entre el perno de conexión y el brazo principal. Esta restricción fija los seis grados de libertad del perno respecto al brazo principal, manteniendo la misma condición definida previamente en el modelo global, al mismo tiempo, captura con mayor detalle los esfuerzos en la zona crítica.

Figura 6. Submodelado del mecanismo de cargador frontal de la retroexcavadora



Análisis de convergencia del submodelo

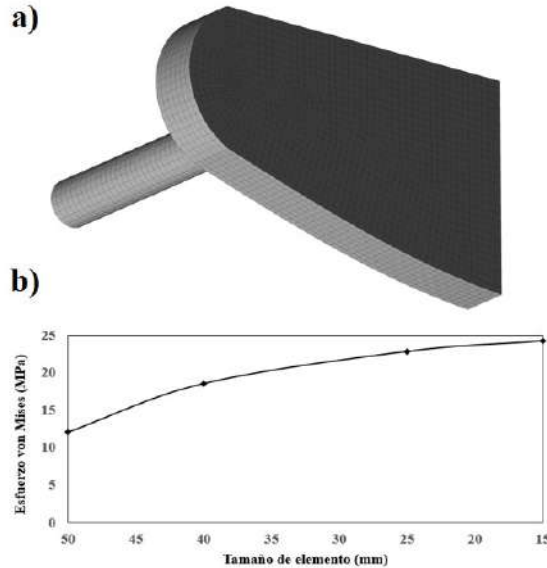
Para verificar la independencia de la solución respecto a la malla se realizó un análisis de convergencia aplicando como carga los desplazamientos importados (*Imported Cut Boundary Constraint*) desde el modelo global hacia el submodelo. Se analizaron cuatro tamaños de elemento: 50, 40, 25 y 15 mm, con los correspondientes números de nodos y registrando los esfuerzos máximos equivalentes de von Mises, mostrados en el cuadro 1.

Los resultados muestran que con un mallado de 50 mm el esfuerzo calculado fue de 12 MPa, aumentando progresivamente conforme se refinó la malla hasta alcanzar 24.18 MPa con el tamaño de 15 mm. Este valor puede considerarse como suficientemente refinado para el submodelo, dado que el error entre los dos últimos refinamientos cae por debajo del 6 %, cumpliendo un criterio aceptable de convergencia. En la gráfica (figura 7b) se muestra claramente que, a medida que el tamaño del elemento disminuye (mallado más fino) el esfuerzo calculado tiende a estabilizarse, lo cual indica que el modelo alcanza una solución convergente para tamaños de elemento menores. Este comportamiento valida la precisión del submodelado y justifica el refinamiento de la malla mostrado en la figura 7a.

Cuadro 1. Resultados del análisis de convergencia

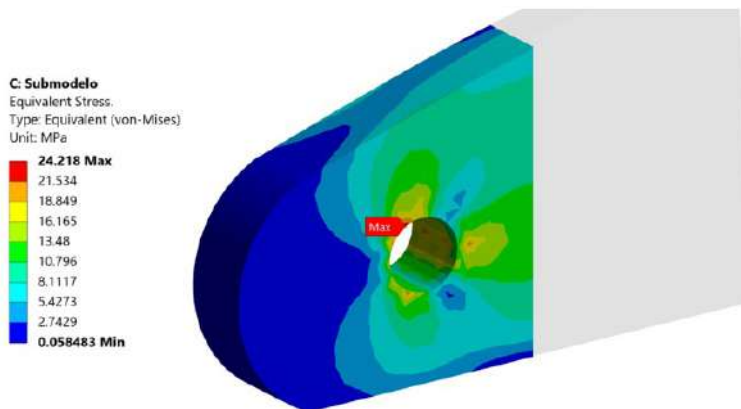
Tamaño de elemento (mm)	Número de nodos	Esfuerzo von Mises (MPa)	Error (%)
50	1878	12	35.14
40	3556	18.5	18.86
25	12775	22.8	5.71
15	53772	24.18	

Figura 7. a) Malla refinada del submodelado y b) análisis de convergencia



En la figura 8 se muestran los resultados del esfuerzo equivalente de von Mises, donde se aprecia que el valor máximo disminuye de 85.478 MPa en el modelo global a 24. 218 MPa en el submodelo. Este resultado evidencia que la concentración inicial estaba asociada principalmente a un mallado poco refinado y confirma que los resultados estimados en la unión analizada son menores, lo que representa una condición estructural más favorable. Además, evidencia la relevancia de emplear la técnica de submodelado con un mallado adecuadamente refinado, ya que ello permite representar con mayor precisión la distribución de esfuerzos en zonas críticas y evitar sobrestimaciones que podrían conducir a incertidumbre en la toma de decisiones.

Figura 8. Distribución de los esfuerzos de von Mises en el submodelado



Tiempo de solución y eficiencia computacional

El cuadro 2 muestra la comparación entre el modelo global (malla de 100 mm) y el submodelo refinado (malla de 15 mm). Aunque el submodelo contiene un número mayor de nodos (53,772 frente a 5,122 del modelo global), su tiempo de solución fue considerablemente menor (1 h 39 min) en contraste con el estimado para el modelo global (4 h 57 min). Esta diferencia se debe a que en el submodelo no se evalúan conexiones, la gravedad, la masa puntual ni las rotaciones prescritas, sino únicamente la respuesta local de la zona de interés. De esta manera el submodelado concentró el refinamiento en las regiones críticas y redujo el costo computacional en aproximadamente una tercera parte, manteniendo la precisión en la evaluación de esfuerzos.

Cuadro 2. Número de nodos vs tiempos de solución entre el modelo global y el submode

Modelo	Nº de nodos	Tiempo
Global (malla 100 mm)	5,122	4 h 57 min
Submodelo (malla 15 mm)	53,772	1 h 39 min

CONCLUSIONES

1. El uso de mallado global y submodelado resultó eficiente, ya que permitió reducir el costo computacional en casi una tercera parte, aun cuando el submodelo empleó más elementos en la malla. Además, el análisis de convergencia validó la precisión de los resultados en las zonas críticas, garantizando su confiabilidad sin comprometer la exactitud global del modelo.
2. La metodología propuesta constituye una herramienta útil de evaluación y diseño en la maquinaria agrícola, y puede replicarse en otros mecanismos articulados donde los elementos hidráulicos se sustituyan por condiciones cinemáticas equivalentes.
3. Los resultados mostraron que los esfuerzos de von Mises permanecen por debajo del límite de cedencia del acero empleado (345 MPa), confirmando la seguridad en operación; además, el análisis transitorio permitió identificar la transmisión gradual de cargas, aspecto que no habría sido posible con un análisis estático.
4. Los resultados obtenidos pueden servir como base para validaciones experimentales futuras y como punto de partida para la optimización del diseño de maquinaria en escenarios de carga más severos que conducen a la falla estructural.

LITERATURA CITADA

- Caterpillar Inc. (2015). *Cat® Hydraulic Excavator Buckets: 311–390 Hydraulic Excavators* (GEHQ2201-07-15). Recuperado de <https://www.cat.com>
- Das, B. M. (2010). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (6.^a ed.). Cengage Learning.
- Filla, R., & Palmberg, J.-O. (2003). Using dynamic simulation in the development of construction machinery. En *Proceedings of the Eighth Scandinavian International Conference on Fluid*

Power (Vol. 1, pp. 651–667).

- Flores Moreno, R., Martínez Rodríguez, A., Pacheco Sánchez, G. V., Reyes de la Cruz, V. L., & Dávila García, A. I. (2010). Análisis de neumático por elementos finitos con vistas a la determinación de coeficientes de cargas dinámicas en estructuras de máquinas agrícolas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(4), 10–16.
- Gold Forging. (s. f.). *What Are Excavator Buckets Made Of?* Consultado el 18 de agosto de 2025, de <https://www.goldforging.com/What-Are-Excavator-Buckets-Made-Of-id42643596.html>
- Hashaam, M., Waqar Akram, M., Ahmad, M., Akram, M. Z., Faheem, M., Maqsood, M., & Aleem, M. (2023). 3D finite element analysis of tine cultivator and soil deformation. *Research in Agricultural Engineering*, 69(3), 107–117. <https://doi.org/10.17221/58/2022-RAE>
- Hiermaier, S. J. (2007). Failure models for dynamic loading conditions. En *Structures under crash and impact*. Springer, Boston, MA.
- Jaison, R., & Ramesh Kumar, R. (2016). Design and analysis of detachable type backhoe and loader. *International Journal of Research in Advanced Technology (IJORAT)*, 1(9), 1–6.
- Nazemosadat, S. M. R., Ghanbarian, D., Naderi-Boldaji, M., & Nematollahi, M. A. (2022). Structural analysis of a mounted moldboard plow using the finite element simulation method. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 20(2), e0204. <https://doi.org/10.5424/sjar/2022202-18157>
- Sahay, S., & Srivastava, S. K. (2017). FE analysis and optimization of excavator bucket teeth. En *Proceedings of the International Conference on Advances in Mechanical Engineering* (pp. 267–272). Springer.
- Sun, Y., Wang, Y., Wang, L., Li, C., Tang, L., Wang, D., Ma, R., Xue, Z., Wei, X., Cui, M., Chong, H., & Xu, W. (2023). Digging performance and stress characteristic of the excavator bucket. *Applied Sciences*, 13(20), 11507. <https://doi.org/10.3390/app132011507>
- Tewari, S., & Chauhan, P. S. (2020). Modelling, FE analysis and optimization of the components of backhoe: A review study. *International Journal of Engineering Development and Research (IJEDR)*, 8(1), 278–284.
- Thombarer, A. V., et al. (2021). Shape optimization of an excavator bucket with the help of ANSYS software. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(3).
- Vorob'ev, I. A., & Vorob'eva, L. A. (2024). Assessment of durability of steels and alloys under dynamic loading. *Russian Engineering Research*, 44(1), 39–41.
- Yoon, J., & Manurung, A. (2010). Development of an intuitive user interface for a hydraulic backhoe. *Automation in Construction*, 19(6), 779–790. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.04.002>

Capítulo IX

Dayvis Fernández Valdés¹, Arturo Ocampo Ramírez²,
María Victoria Gómez Águila³ y Daybelis Fernández Valdés⁴

Análisis numérico del efecto del daño por impacto en frutos de guayaba

RESUMEN

La evaluación del daño por impacto en frutos de guayaba mediante elementos finitos constituye una herramienta poderosa que busca predecir los daños mecánicos que puede sufrir el fruto durante su manejo postcosecha. Durante el recorrido por las líneas de manipulación se generan daños mecánicos que son prácticamente inevitables hasta cierto punto, pero su reducción es la clave para garantizar la calidad, vida útil y valor económico del fruto, a través de estudios que permitan ofrecer las pautas para disponer de una manipulación que minimicen los daños. El objetivo de este estudio consiste en evaluar el comportamiento del fruto de la guayaba maduro ante daños por impacto en las líneas de manipulación mediante elementos finitos. Para este estudio se determinaron y asignaron las propiedades físicas y mecánicas al modelo, se calculó la velocidad de caída del fruto y se creó el modelo geométrico de la guayaba madura. Se simuló un escenario de impacto en líneas de manipulación sobre una superficie de acero con una caída desde una altura de 14 cm. Los resultados muestran cómo se comportan los esfuerzos en el fruto de la guayaba maduro ante impacto. El análisis por elementos finito permitió conocer el comportamiento del fruto evitando depender solo de pruebas experimentales y promoviendo la aplicación de técnicas matemáticas de modelación en la agricultura.

Palabras clave: guayaba, impacto, elementos finitos

ABSTRACT

The evaluation of impact damage in guava fruits using finite element analysis constitutes a powerful

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Acayucan, Carretera Costera del Golfo km. 216.4, Agrícola Michapa, Acayucan 96100, Veracruz, México. dayvis.vl@itsacayucan.edu.mx

² Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería, Campus Coatzacoalcos, Av. Universidad Veracruzana km. 7.5, Santa Isabel, Coatzacoalcos 96538, Veracruz, México. arocampo@uv.mx.com

³ Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Edo México, CP 56230. México. mgomez@chapingo.mx

⁴ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Acayucan, Carretera Costera del Golfo km. 216.4, Agrícola Michapa, Acayucan 96100, Veracruz, México. daybelis.fv@itsacayucan.edu.mx

tool aimed at predicting the mechanical damage that the fruit may suffer during postharvest handling. Along the handling lines, mechanical damage is generated that is practically inevitable to some extent, but its reduction is key to ensuring the quality, shelf life, and economic value of the fruit, through studies that provide guidelines for handling practices that minimize damage. The objective of this study is to evaluate the behavior of ripe guava fruit under impact damage in handling lines using finite element analysis. For this study, the physical and mechanical properties were determined and assigned to the model, the fruit's falling velocity was calculated, and the geometric model of the ripe guava was created. An impact scenario was simulated in handling lines on a steel surface with a drop from a height of 14 cm. The results show how stresses behave in the ripe guava fruit under impact. The finite element analysis made it possible to understand the fruit's behavior without relying solely on experimental tests and encouraged the application of mathematical modeling techniques in agriculture.

Keywords: guava, impact, finite elements

INTRODUCCIÓN

El manejo postcosecha de las frutas sigue siendo un reto en la actualidad, debido a los daños que se producen durante los procesos de clasificación, empaque y transporte. Durante la manipulación del fruto se presentan diversas situaciones que ponen en riesgo su seguridad y calidad (Fernando *et al.*, 2019). La compresión (Fernández *et al.*, 2012), vibración y el impacto son las fuerzas más comunes que causan daños mecánicos en las frutas durante la postcosecha (Opara y Pathare, 2014; Golombek y Blanke, 2022).

La guayaba es un fruto que a nivel mundial durante el manejo postcosecha en la mayoría de los casos al igual que otros productos agrícolas sufre daños mecánicos (Fernández *et al.*, 2014), incluyendo los provocados por cargas de impacto (Martínez *et al.*, 2017), ya sea durante su recolección, líneas de clasificación y empaque o el transporte a los diferentes puntos de venta o exportación (Monzón *et al.*, 2019). Los daños mecánicos ocasionados por impacto en frutas varían en función de las características de las superficies en contacto. En las líneas de manipulación los impactos se producen sobre las superficies de las máquinas, las cuales presentan diferentes materiales (acero, amortiguadores de golpes, entre otros). Las características de dichos materiales influyen notablemente en la aparición de magulladuras (García, 2000). Los daños por golpes inicialmente no son visibles, pero pueden estropear la apariencia y varios parámetros fisicoquímicos, disminuyendo la calidad y el peso, provocando a su vez pérdidas económicas considerables (Martínez, 2003). Se estima según estudios reportados (Kader, 2002; Wills y Golding, 2016) que la pérdida de producto por daño mecánico es de 12% de la producción total. Por lo tanto, lograr la reducción del daño mecánico durante la manipulación de la fruta constituye una tarea importante.

Para inferir cambios postcosecha en los productos agrícolas, se utilizan técnicas matemáticas como el análisis estadístico y la modelización, incluyendo métodos como el de elementos finitos (MEF) (Sadrnia *et al.*, 2008), el cual ha evolucionado en un corto periodo en comparación con otros procedimientos de análisis. La simulación permite solucionar sistemas complejos de ingeniería, trayendo como consecuencia que los análisis numéricos y en especial el Método del Elemento

Finito tengan un gran auge en la actualidad (Fernández *et al.*, 2013). Su impacto ha sido tal que ha revolucionado la forma de diseñar en la actualidad (Silvestre, 1998). Diversos estudios (Kabas *et al.*, 2008; Jamal *et al.*, 2005) han demostrado la efectividad de dicho método numérico en el campo de la Ingeniería Agrícola (Rashvand *et al.*, 2022; Ahmadi *et al.*, 2016). De manera tal que el objetivo de este trabajo consiste en conocer el comportamiento del fruto de la guayaba ante el daño por impacto producido en líneas de manipulación comercial mediante la simulación por elementos finitos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluó el fruto de la guayaba (*Psidium guajava* L.), variedad enana roja madura, con el propósito de conocer su comportamiento ante daños mecánicos causados por impacto producto de caída libre durante el manejo postcosecha. La selección de los frutos de guayaba y la determinación del número de muestras se realizó según lo planteado en Fernández *et al.*, 2012.

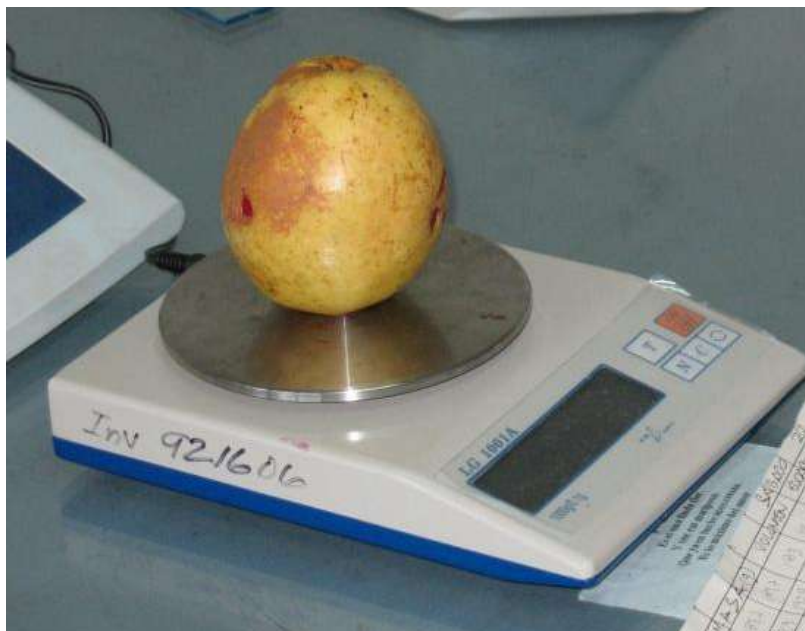
Determinación de las propiedades físicas y mecánicas del fruto de la guayaba

Para la simulación del fruto de la guayaba en elementos finitos ante daños por impacto resulta indispensable la determinación de propiedades físicas (talla, masa y densidad) y mecánicas (Módulo de Young y relación de Poisson), (Fernández *et al.*, 2012; Fernández *et al.*, 2013; Monson *et al.*, 2019).

Masa

Se obtuvo la masa colocando la fruta sobre la balanza electrónica modelo LG-1001^a (figura 1). Se realizaron 3 veces las mediciones para obtener el valor promedio.

Figura 1. Medición de la masa de la fruta en balanza electrónica (Yirat, 2009)



Densidad

La densidad del fruto se obtuvo mediante la ecuación 1 que expresa la relación entre la masa y el volumen de líquido que desplaza la fruta al ser sumergido totalmente en un recipiente (Principio de Arquímedes).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

donde:

ρ : Densidad del fruto (g/cm³)

m: Masa del fruto, (g);

v: Volumen de la fruta, (cm³)

El límite de elasticidad en frutas es el punto hasta el cual el tejido puede deformarse de manera reversible, al retirar la carga vuelve a su forma original. Después de dicho punto cualquier deformación será permanente y se producen daños visibles como magulladuras, ablandamiento o colapso celular. Este límite se determina mediante ensayos de compresión (Monson *et al.*, 2019). El esfuerzo se determinó mediante la ecuación 2.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

donde:

σ : Esfuerzo (MPa);

F: Fuerza aplicada (N);

A: Área de contacto (m²)

Módulo de Elasticidad

El Módulo de Young o Módulo de elasticidad (ecuación 3) es la pendiente de la región lineal de la curva esfuerzo-deformación y se obtiene antes de que el tejido sufra deformación plástica.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{FL_0}{A \Delta L} \quad (3)$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad (MPa),

F: Fuerza máxima a la compresión antes de romper el fruto (N),

L_0 : diámetro longitudinal inicial (mm),

ΔL : Deformación del diámetro longitudinal (mm),

A : Área de contacto (mm²),

σ : Esfuerzo,

ϵ : Deformación unitaria.

Para la obtención de dicho módulo se realizaron primero cálculos básicos como la determinación del esfuerzo (ecuación 2) y se determinó la deformación unitaria ϵ .

Relación de Poisson

Otra propiedad mecánica necesaria para el análisis por elementos finitos y no menos importante es la relación de Poisson, que describe como se deforma el fruto en direcciones perpendiculares a la dirección en la que se aplica el esfuerzo y se determinó mediante la ecuación 4:

$$\mu = - \frac{\frac{\Delta D}{D_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} \quad (4)$$

Donde:

μ : Coeficiente de Poisson aparente, (adimensional);

D_0 : Diámetro transversal inicial, (mm);

ΔD : Deformación del diámetro transversal, (mm).

Metodología para determinar el daño por impacto en frutos de guayaba mediante elementos finitos.

Para la evaluación del fruto de la guayaba ante impacto por caída libre en elementos finitos se consideró el escenario de líneas de manipulación (clasificación y empaque), debido a que las líneas de manipulación comerciales son uno de los puntos de la cadena comercial donde la fruta puede sufrir daños por impacto. Regularmente, los daños se producen en los puntos de transferencia de la línea (puntos donde la fruta es transferida de un elemento de la cadena a otro) (García, 2000). Por lo que resulta de gran importancia conocer cómo se comporta el fruto de la guayaba maduro (figura 2) durante su manipulación con el fin de disminuir al máximo posible los daños mediante mejoras en el manejo postcosecha.

Figura 2. Fruto de guayaba maduro



Un parámetro importante para dicha simulación es la velocidad de caída del fruto sobre la superficie de acero la cual se obtuvo mediante la ecuación 5:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

Donde:

v : Velocidad de final de caída, (m/s);

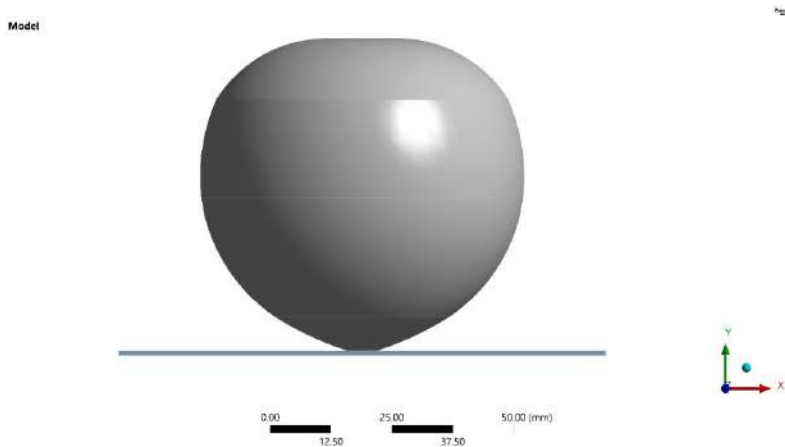
g : Gravedad, (m/s²);

h : Altura, (m).

Obtención del modelo digital del fruto de guayaba maduro

Se confeccionó la geometría digital del fruto de guayaba en el software Ansys a través de SpaceClaim (figura 3), considerándose las dimensiones del diámetro longitudinal y transversal del fruto en su estado maduro (cuadro 1).

Figura 3. Modelo digital del fruto de guayaba maduro



Cuadro 1. Dimensiones del fruto de guayaba maduro

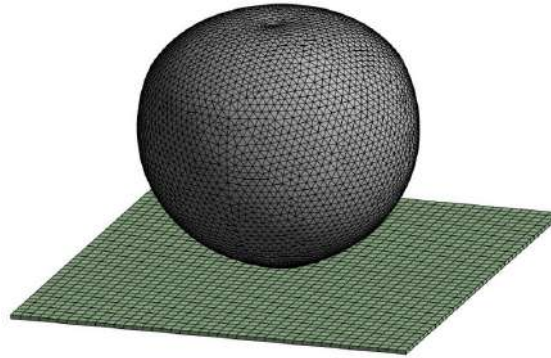
Fruto	Dimensiones	
	Diámetro Longitudinal (mm)	Diámetro Transversal (mm)
Guayaba variedad Enana Roja (madura)	72.24	70

Generación del mallado del fruto de guayaba maduro

El análisis numérico se realizó mediante el software ANSYS LS-Dyna 2025 R2. Una vez confeccionada la geometría se procedió al mallado del fruto (figura 4). La malla está compuesta

por 42108 elementos. Los elementos son Solid 164 de 8 nodos con integración reducida. Este tipo de elemento se usa para simular el comportamiento dinámico no lineal de objetos bajo cargas de impacto. La generación de una malla con la calidad requerida es uno de los pasos más importantes en la simulación, ya que la misma debe ser capaz de resolver el problema en estudio con una alta precisión.

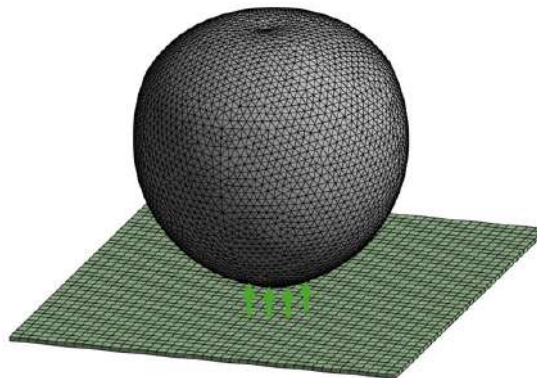
Figura 4. Mallado del fruto de guayaba maduro



Condiciones de frontera

Los frutos de guayaba se dejaron caer desde una altura de 14 cm (García, 2000) sobre una superficie de acero (Amstrong *et al.*, 1995). De esta forma se modeló como el fruto es transferido de un elemento a otro de la cadena de manipulación y cae sobre una superficie de acero, tomando como referencia estudios experimentales realizados por García, 2000. Se restringieron en la base todos los grados de libertad (figura 5) y la velocidad asumida se obtuvo de la ecuación 5. La base donde impacta el fruto de guayaba se modeló como un acero, con módulo de Young de 200GPa, relación de Poisson de 0.3 y densidad de 7850 Kg/m³. El fruto de la guayaba se modeló con un modelo plástico bilineal, para un esfuerzo de cedencia de 0.15 MPa y una tangente plástica de 0.05MPa.

Figura 5. Restricciones del modelo



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

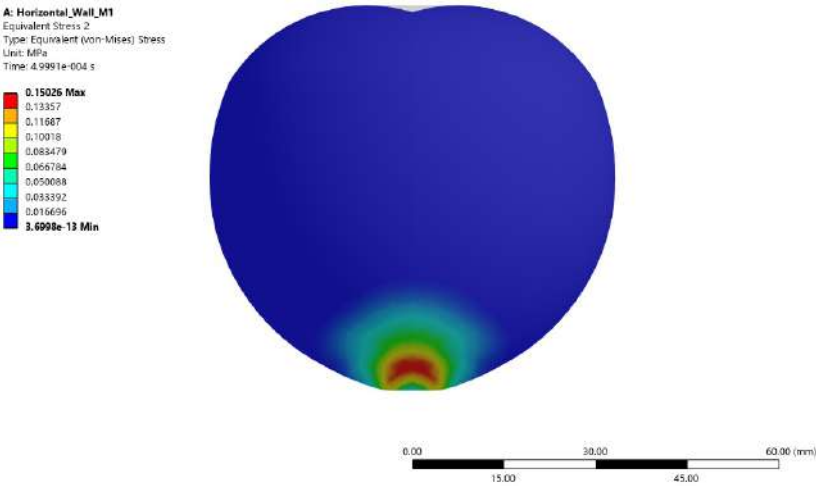
Las propiedades necesarias obtenidas para la simulación del fruto de la guayaba maduro ante impacto en líneas de manipulación se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Propiedades del fruto de guayaba maduro para la simulación

Fruto	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson	Altura de caída (cm)	Velocidad de caída (m/s)
Guayaba variedad Enana Roja (madura)	1063	1.78	0.45	14	1.7

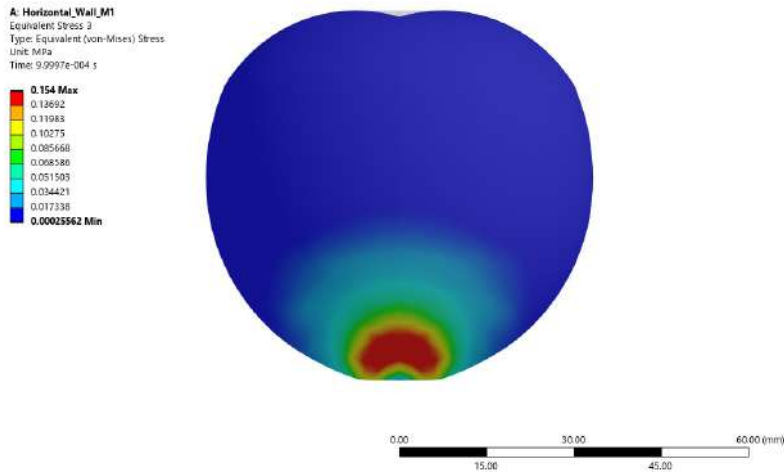
El análisis numérico mediante elementos finitos permitió conocer los esfuerzos que sufre el fruto de la guayaba maduro al impactar contra la superficie de acero. Estos resultados preliminares encontrados mediante este análisis podrían ser de gran utilidad para realizar mejoras en los diferentes puntos de las líneas de manipulación comercial y con ello disminuir los daños postcosecha del fruto. En la figura 6 se muestra el comportamiento del fruto al momento del impacto con la superficie de acero, obteniéndose un esfuerzo máximo de 0.15 MPa a los 5×10^{-4} s.

Figura 6. Esfuerzos de von Mises en el fruto de guayaba maduro a los 5×10^{-4} s



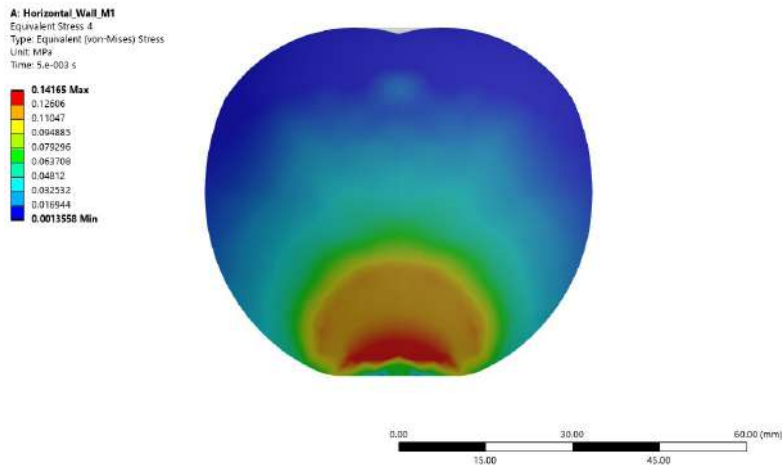
A los 9.9997×10^{-4} s el esfuerzo máximo del fruto de guayaba maduro presentó un valor de 0.154 MPa (figura 7), observándose un ligero aumento del esfuerzo para este segundo de tiempo y superando el esfuerzo de cedencia del fruto, por lo que se puede decir que se genera en cierta medida daño permanente en el fruto, constituyendo esto un punto de partida importante para mejorar el manejo postcosecha.

Figura 7. Esfuerzos de von Mises en el fruto de guayaba maduro a los 9.9997×10^{-4} s



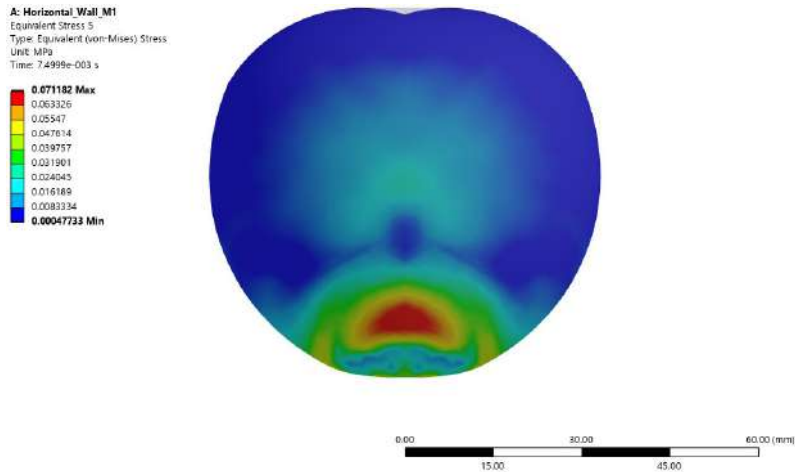
En la figura 8 se puede observar como a los 5×10^{-3} s comienza a disminuir ligeramente el esfuerzo máximo, obteniéndose un máximo de 0.14MPa.

Figura 8. Esfuerzos de von Mises en el fruto de guayaba maduro a los 5×10^{-3} s



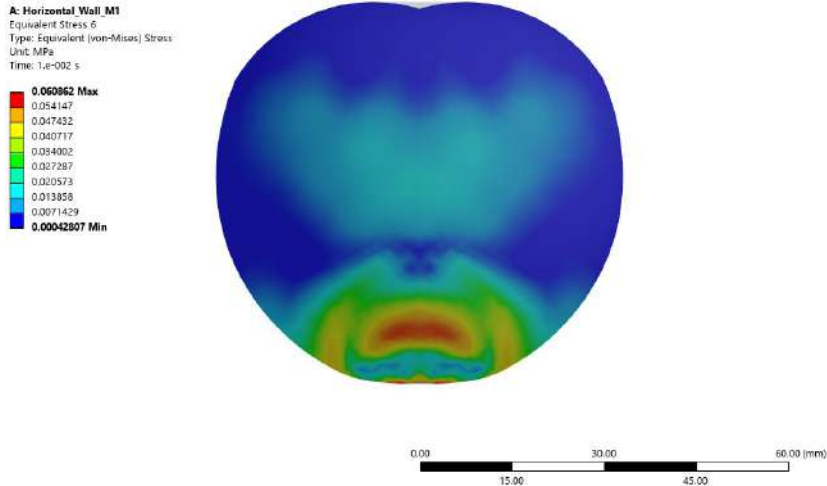
Con el paso del tiempo de impacto, los esfuerzos en el fruto de guayaba van disminuyendo, mostrando un comportamiento similar a estudios previos reportados en la literatura (Celik *et al.*, 2011). El fruto presentó un esfuerzo máximo de 0.071MPa a los 7.5×10^{-3} s, obteniéndose para este segundo de tiempo una disminución considerable ya del esfuerzo como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Esfuerzos de von Mises en el fruto de guayaba maduro a los 7.5×10^{-3} s.



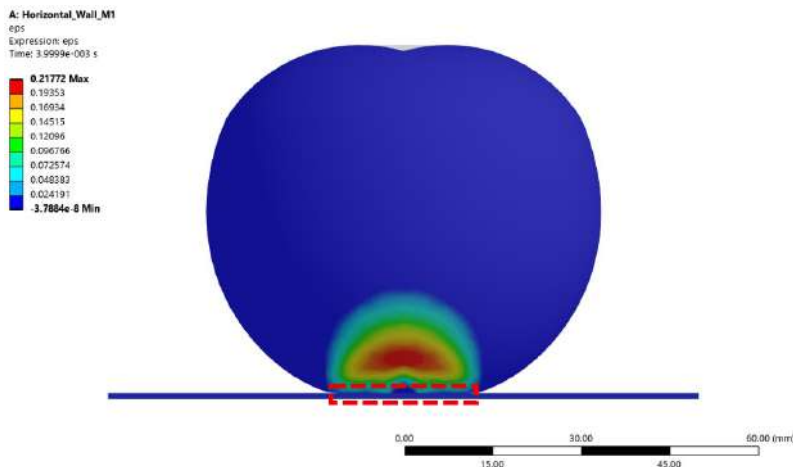
El fruto de la guayaba maduro siguió manteniendo un descenso del esfuerzo con el paso del tiempo como se observa en la figura 10, describiendo el comportamiento de rebote, donde para 1×10^{-2} s el esfuerzo máximo obtenido fue de 0.06MPa.

Figura 10. Esfuerzos de von Mises en el fruto de guayaba maduro a los 1×10^{-2} s.



El área de contacto máximo al impactar el fruto de guayaba maduro con la superficie de acero fue de 1963 mm^2 , y se produce a los 4×10^{-3} s, (figura 11), siendo esta área propensa a la aparición con los días de la posible magulladura por impacto en la fruta.

Figura 11. Área de contacto máximo al impactar el fruto con la superficie de acero.



CONCLUSIONES

Se creó un modelo digital del fruto de la guayaba variedad enana roja maduro en elemento finitos y se analizó numéricamente como un modelo plástico bilineal, ante un escenario de impacto por caída libre sobre una superficie de acero, típica de líneas de manipulación.

Los esfuerzos máximos exceden el esfuerzo de cedencia a los 9.9997×10^{-4} s, obteniéndose un esfuerzo máximo de von mises de 0.154MPa para dicho instante de tiempo. El área de contacto máximo del fruto con el acero fue de 1963mm².

Con el paso del tiempo los esfuerzos máximos presentes en el fruto ante el impacto al que fue sometido disminuyen, mostrando un comportamiento consistente con estudios previos reportados para frutas.

El método del elemento finito resultó ser una herramienta matemática altamente viable para predecir el comportamiento del fruto de la guayaba variedad enana roja madura ante daños por impacto sobre superficie de acero para líneas de manipulación comercial, evitando depender de pruebas experimentales.

LITERATURA CITADA

- Ahmadi E., Barikloo H., Kashfi M. (2016). Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers. Computer and Electronics in Agriculture. 121: 1–11.
- Armstrong P. R., Brown G. K. and Timm E. J. (1995). Cushioning choices can avoid produce bruising during handling. Harvest and Postharvest Technologies for Fresh Fruits and Vegetables. ASAE Publication. pp.183 -90.

- Celik H. K., Rennie A. E., Akinci I. (2011). Deformation behavior simulation of an apple under drop case by finite element method. *Journal of Food Engineering*. 104: 293-298.
- Fernández D., García A., Hernández A., Monzón L. L. (2012). Evaluación del daño mecánico producido por cargas de compresión estáticas en guayaba (*psidium guajabal*) variedad enana roja EEA-123. *Científica*. 15(2): 91-98.
- Fernández D., Hernández L. H., Beltrán J. A., Ocampo A., Fernández D. (2014) Evaluación numérico-experimental de los esfuerzos principales en la corteza del fruto de la guayaba (*psidium guajava* L) variedad enana roja. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 23(1): 60-67.
- Fernández D., Ocampo A., García A., Hernández A., Fernández D., Ayala J. F. (2013). Análisis numérico de la resistencia mecánica del fruto de la guayaba en diversos estados de maduración. *Científica*. 17(4): 171-180.
- Fernando I., Fei J., Stanley R., Enshaei H., Eyles A. (2019). Quality deterioration of bananas in the post-harvest supply chain—An empirical study. *Modern Supply Chain Research. Applications*. 1(2): 135–154.
- García F. J. (2000). Desarrollo de dispositivos mecánicos para minimizar daños y medir la firmeza en líneas de manipulación de frutas. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Madrid, España.
- Golombek S. D., Blanke M. M. (2022). Orchard management strategies to reduce bruises on apples in India: A review. *Vegetos*. 35: 1-8.
- Jamal N., Ying Y., Wang J., Rao X., Yu Ch. (2005). Firmness evaluation of melon using its vibration characteristic and finite element analysis. *Journal of Zhejiang University Science*. 6(6): 483–490.
- Kabas O., Celik H. K., Ozmerzi A., Akinci İ. (2008). Drop test simulation of a sample tomato with finite element method. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 88: 1537-1541.
- Kader A. A. (2002) *Postharvest Technology of Horticultural Crops*, Inst. University of California, Oakland, USA. p 535.
- Martínez C. M. (2003). *Fundamentos del manejo y tratamiento postcosecha de productos agrícolas*. Ed. Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba, p.257.
- Martínez H., Pérez A., Venegas M., Valle S. (2017). Propiedades físico-mecánicas y simulación por computadora del daño por impacto en guayaba (*Psidium guajava* L.). *Acta agrícola y pecuaria*. Chapingo. 3 (1): 14-23.
- Monzón L. L., García A., Plata A., Martínez A., Rangel L., Hernández, A. (2019). Simulation of Response to Impact on Guava (*Psidiumguajava* L), using the Finite Element Method. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(4): 5-18.
- Opara U. L., Pathare P. B. (2014). Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural

produce—A review. *Postharvest Biol. Technol.* 91: 9–24.

Rashvand M., Altieri G., Genovese F., Li Z., Di Renzo G. C. (2022). Numerical simulation as a tool for predicting mechanical damage in fresh fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 187 (1):11875.

Sadrunia H., Rajabipour A., Jafari A., Javadi A., Mostofi Y., Kafashan J., Dintwa E., De Baerdemaeker J. (2008). Internal bruising prediction in watermelon compression using nonlinear models. *Journal of Food Engineering*. 86: 272-280.

Silvestre P.P. (1998). *Elemento finito para ingeniería eléctrica*. Edit. Noriega, Ed. primera, p. 236.

Wills R and Golding J. (2016). *An introduction to the physiology and handling of fruits and vegetables*, Ed. CABI, Sydney, Australia, p. 304.

Yirat M., García A., Hernández A., Calderín A., Camacho N. (2009). Evaluación de la calidad de la guayaba, variedad enana roja EEA-1-23, durante el almacenamiento a temperatura ambiente. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 18(2):70-73.

Capítulo X

Rogelio Ernesto García Chávez¹ y David Hebert Del Valle Paniagua¹

Sistema de bajo costo basado en LAN para aplicaciones de monitoreo y riego agrícola

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control de riego agrícola basado en el microcontrolador ESP32. El sistema opera en una red de área local y permite la adquisición de variables físicas como temperatura, humedad relativa, intensidad lumínica y nivel de sonido, mediante sensores de bajo costo. La información recolectada se visualiza en tiempo real a través de una interfaz web accesible desde cualquier dispositivo conectado a la red local. Además, el sistema permite el control de dos bombas de riego mediante elementos de la interfaz. El desarrollo se estructuró a partir de requerimientos funcionales y no funcionales, así como diagramas UML, y se implementó utilizando la plataforma Arduino. Se diseñó un algoritmo que integra la lectura de sensores, el almacenamiento de datos en memoria local (SPIFFS) y la interacción con el usuario a través de un servidor HTTP embebido en el ESP32. Los resultados obtenidos muestran que el sistema cumple con los objetivos planteados, ofreciendo una solución funcional y replicable para entornos agrícolas educativos y/o de pequeña escala.

Palabras clave: agricultura inteligente, ESP32, sistemas embebidos, tecnología educativa

ABSTRACT

This work presents the design and implementation of an agricultural irrigation monitoring and control system based on the ESP32 microcontroller. The system operates within a local area network and enables the acquisition of physical variables such as temperature, relative humidity, light intensity, and sound level using low-cost sensors. The collected data is displayed in real time through a web interface accessible from any device connected to the local network. Additionally, the system allows control of two irrigation pumps through interface elements. The development was structured based on functional and non-functional requirements, as well as UML diagrams, and was implemented using the Arduino platform. An algorithm was designed to integrate sensor

¹ Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Posgrado en Socioeconomía, Estadística e Informática-Cómputo Aplicado. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mexico. C. P. 56264.
Correo: garcia.rogelio@colpos.mx; dhvallep@colpos.mx

readings, data storage in local memory (SPIFFS), and user interaction via an embedded HTTP server on the ESP32. The results obtained show that the system meets the defined objectives, offering a functional and replicable solution for educational and/or small-scale agricultural environments.

Keywords: Smart agriculture, ESP32, embedded systems, educational technology

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico ha tenido un crecimiento acelerado en este milenio, impactando de manera significativa el diseño y la implementación de dispositivos electrónicos. En particular, la disciplina del cómputo ha sido beneficiada por los notables avances en la tecnología de estado sólido, lo que ha permitido la creación de dispositivos cada vez más compactos, eficientes y versátiles. Uno de los pilares de esta evolución ha sido el desarrollo de chips programables de propósito general, que han transformado la forma en que se diseñan soluciones electrónicas (Méndez & Zúñiga, 2024).

Inicialmente, los dispositivos lógicos programables (PLD, por sus siglas en inglés) ofrecieron una alternativa flexible a los circuitos integrados de función fija, permitiendo a los diseñadores implementar lógica personalizada mediante los lenguajes descriptores de hardware. Esta tecnología sentó las bases para el surgimiento de los FPGA (Field Programmable Gate Arrays), que permitieron la implementación de sistemas digitales complejos con alto grado de paralelismo y rendimiento. Los FPGA se convirtieron en una herramienta esencial en aplicaciones de múltiples dominios (Rojas, Franco & Pateti, 2009). No obstante, los conocimientos requeridos para su uso y altos costos limitaron su adopción en proyectos más accesibles, como lo son los académicos-didácticos. De manera paralela, los microcontroladores comenzaron a ganar terreno como soluciones más simples y económicas para tareas de monitoreo, automatización y control. Los microcontroladores PIC, desarrollados por la empresa Microchip Technology, marcaron un antes y un después en este campo, al ofrecer una arquitectura eficiente, bajo consumo energético y facilidad de programación con el uso de lenguajes de alto nivel (como C/C++). Su uso se extendió rápidamente en aplicaciones educativas, industriales y domésticas, consolidando su posición como una herramienta clave en el diseño de sistemas embebidos (Díaz Ronceros, 2020).

La llegada de plataformas como Arduino revolucionó aún más el panorama al facilitar la programación de microcontroladores. Arduino simplificó el proceso de desarrollo mediante un lenguaje y un entorno de programación amigables, además de contar con una comunidad activa y colaborativa. Esta plataforma permitió que profesionales, académicos y estudiantes pudieran crear prototipos funcionales sin necesidad de conocimientos avanzados en diseño digital y/o programación (Castelo Barreno, Aguilar Quevedo & Guale Tomalá, 2024). En ese mismo sentido, a finales de 2016, la creación del microcontrolador ESP32 representó una nueva alternativa de tarjeta de desarrollo que integra capacidades avanzadas de procesamiento, almacenamiento, puertos de entrada/salida de propósito general, bajo consumo energético y conectividad inalámbrica (Wi-Fi y Bluetooth). Desarrollado por Espressif Systems, el ESP32 permite el desarrollo de soluciones de bajo costo utilizando entornos de desarrollo integrados como Arduino y MicroPython (Vera Vera & Vera Vera, 2023).

Actualmente, el ESP32 es ampliamente utilizado en distintos ámbitos, entre ellos el sector agrícola. Las actividades de la agricultura y la ganadería se han visto beneficiadas de manera significativa por el uso del ESP32. Específicamente, este dispositivo se ha aplicado como solución de bajo costo en estaciones meteorológicas, monitoreo y control de sistemas de riego y cultivo, gemelos digitales para invernaderos inteligentes, robots para siembra y análisis de emisiones de gases en ganado rumiante (Abd AL-Nabi et al., 2024; Morchid et al., 2025; Alvarado et al., 2024; Dida et al., 2025; Komatineni et al., 2024; Bua et al., 2025).

De esta manera, inspirados en las aplicaciones presentadas en la literatura y motivados por la democratización del desarrollo tecnológico, el objetivo de este trabajo se centra en el diseño de un sistema de bajo costo basado en una red de área local para aplicaciones de monitoreo y riego agrícola. El sistema utiliza el microcontrolador ESP32 como servidor, permitiendo el acceso mediante un cliente HTTP (navegador web) para realizar el monitoreo en tiempo real de variables físicas como temperatura ambiente, humedad relativa, nivel de sonido e intensidad lumínica. Además, permite la activación y desactivación de dos bombas para el riego.

Se espera que este desarrollo sirva como base para futuras investigaciones orientadas a la adquisición y procesamiento de datos físicos mediante dispositivos de bajo costo, contribuyendo así al fortalecimiento del sector educativo.

Lo que resta del trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección de **Materiales y Métodos** se describe la metodología empleada para el desarrollo del sistema propuesto. Se presentan los requisitos funcionales y no funcionales del sistema, así como su análisis y diseño, basado en diagramas UML. En el apartado de **Resultados y Discusión** se muestra el funcionamiento final del sistema desarrollado. Finalmente, en el apartado de **Conclusiones**, se ofrecen los comentarios finales del presente documento y se proponen líneas de trabajo futuras que podrían derivarse del desarrollo aquí presentado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para asegurar la calidad en el desarrollo del software, es fundamental establecer y delimitar los requisitos mínimos que debe cumplir un sistema. En este sentido, el desarrollo de la propuesta presentada se derivó del análisis de matrices de requerimientos funcionales y no funcionales, formuladas con base en las necesidades específicas de un entorno de invernadero. Estas matrices fueron diseñadas considerando la viabilidad de implementar soluciones utilizando herramientas de bajo costo, sin comprometer la funcionalidad ni la eficiencia del sistema.

La identificación clara de estos requerimientos permitió orientar el diseño y la implementación del sistema, asegurando que respondiera adecuadamente a las condiciones reales del entorno agrícola y facilitando su posible adopción en contextos educativos y de investigación. A continuación, se presentan dos cuadros donde se exhiben las matrices de requerimientos funcionales y no funcionales que guiaron el desarrollo del sistema.

Cuadro 1. Matriz de requerimientos funcionales del sistema

ID	Requerimiento Funcional	Descripción
RF01	Lectura de sensores	El sistema debe leer temperatura, humedad, sonido e intensidad de luz mediante sensores conectados al ESP32.
RF02	Visualización en tiempo real	Los datos de los sensores deben mostrarse en tiempo real a través de una interfaz web accesible desde un navegador.
RF03	Control de bombas	El sistema debe permitir encender y apagar dos bombas de riego desde la interfaz web.
RF04	Registro de datos	El sistema debe guardar periódicamente las lecturas de los sensores en un archivo de texto en la memoria SPIFFS.
RF05	Descarga de registros	El usuario debe poder descargar el archivo de lecturas desde la interfaz web.
RF06	Servidor web	El ESP32 debe funcionar como servidor HTTP para atender las solicitudes del cliente (navegador).
RF07	Sincronización horaria	El sistema debe obtener la hora actual desde servidores NTP para registrar lecturas con marca de tiempo.

Cuadro 2. Matriz de requerimientos no funcionales del sistema

ID	Requerimiento No Funcional	Descripción
RNF01	Bajo costo	El sistema debe estar compuesto por componentes accesibles económicamente, como sensores básicos y el ESP32.
RNF02	Accesibilidad	La interfaz web debe ser accesible desde cualquier dispositivo con navegador y conexión a la red local.
RNF03	Usabilidad	La interfaz debe ser intuitiva, con botones claros para el control de bombas y visualización de datos.
RNF04	Persistencia de datos	Los datos deben almacenarse de forma persistente en la memoria del ESP32 para su posterior análisis.
RNF05	Escalabilidad	El sistema debe permitir la incorporación de más sensores o actuadores en el futuro sin rediseño completo.
RNF06	Robustez	El sistema debe manejar errores como fallos en la conexión Wi-Fi o problemas al acceder a archivos.
RNF07	Bajo consumo energético	El sistema debe operar con eficiencia energética para ser viable en entornos agrícolas remotos.

Con base en los requerimientos previamente establecidos, se elaboró un diagrama de casos de uso con el propósito de representar las posibles interacciones entre el usuario y el sistema de monitoreo y control agrícola basado en ESP32. Este diagrama permite identificar de manera visual las funcionalidades principales que el sistema debe ofrecer desde la perspectiva del usuario. Asimismo, se desarrolló un diagrama de componentes, el cual proporciona una visión estructural del sistema, mostrando los distintos módulos que lo conforman, tales como el servidor web, los sensores físicos, los actuadores (bombas de riego), el sistema de almacenamiento de datos y el cliente HTTP. Este tipo de diagramas facilita la comprensión de la arquitectura del sistema y su integración funcional.

Ambos diagramas fueron diseñados utilizando el Lenguaje Unificado de Modelado (UML), una herramienta ampliamente reconocida en el desarrollo de software por su capacidad para representar, interpretar y analizar sistemas complejos de manera visual. Según Ramírez Jiménez et al. (2024), UML es un estándar internacional que permite mantener una comunicación efectiva entre los actores involucrados en el desarrollo de sistemas, además de fomentar el pensamiento computacional y la abstracción de ideas

Figura 1. Diagrama de casos de uso del sistema

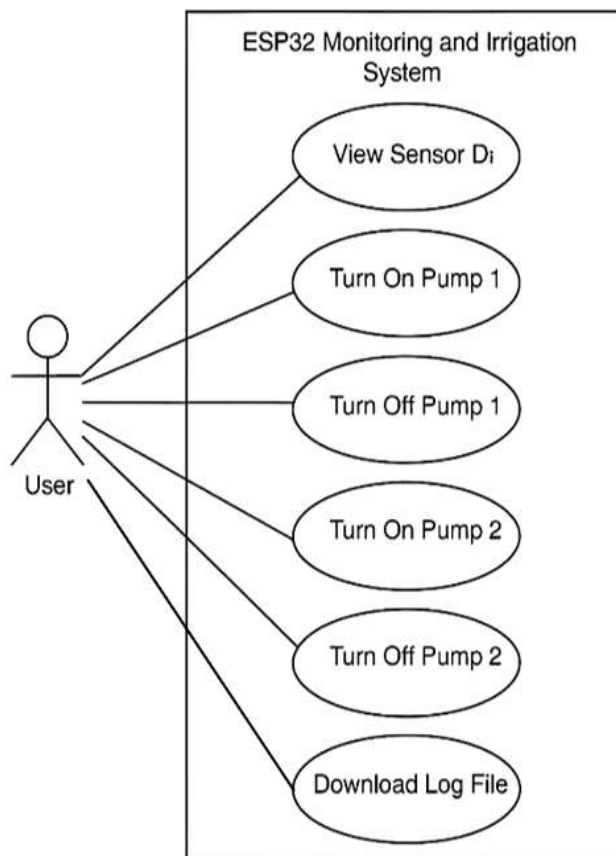
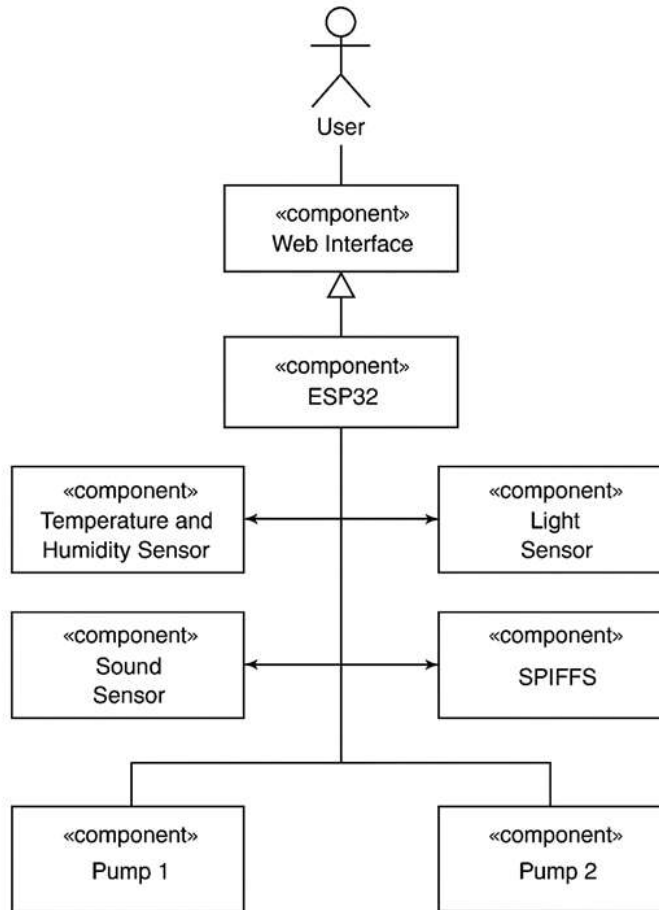


Figura 2. Diagrama de componentes del sistema



Como parte final del diseño del sistema, y tomando como base los requerimientos definidos y los diagramas UML elaborados, se propuso un algoritmo estructurado que permite llevar a cabo la implementación del sistema de monitoreo y control agrícola. Este algoritmo tiene como objetivo guiar el flujo lógico de operaciones, desde la inicialización de sensores y la conexión a la red Wi-Fi, hasta la lectura de variables físicas, el almacenamiento de datos y el control de actuadores. El uso de algoritmos en el desarrollo de sistemas embebidos es fundamental, ya que permite traducir los requerimientos funcionales en acciones concretas que pueden ser implementadas en código. Según Pressman (2010), el diseño algorítmico es una etapa clave en la ingeniería de software, ya que proporciona una base sólida para la codificación eficiente y el mantenimiento del sistema.

A continuación, se presenta el algoritmo propuesto, el cual fue diseñado para cumplir con los objetivos funcionales del sistema y facilitar su implementación en entornos reales.

Inicio

1. *Inicializar comunicación serial.*
2. *Inicializar sensores (Sensor de temp y humedad, sensor de sonido, sensor de luz).*
3. *Montar sistema de archivos SPIFFS.*
4. *Conectarse a red Wi-Fi con SSID y contraseña.*
5. *Configurar sincronización horaria mediante NTP.*
6. *Definir pines de salida para bombas de riego.*
7. *Configurar servidor web con rutas:*
 - */root para interfaz principal.*
 - */datos para enviar datos de sensores en formato JSON.*
 - */descargar para descargar archivo de lecturas.*
 - */encenderBomba1, /apagarBomba1, /encenderBomba2, /apagarBomba2 para control de bombas.*

Bucle principal

8. *Atender solicitudes del cliente web.*
9. *Cada minuto:*
 - *Leer temperatura, humedad, sonido, luz.*
 - *Leer estado de bombas.*
 - *Obtener hora actual.*
 - *Formatear datos.*
 - *Guardar datos en archivo de texto.*

Fin

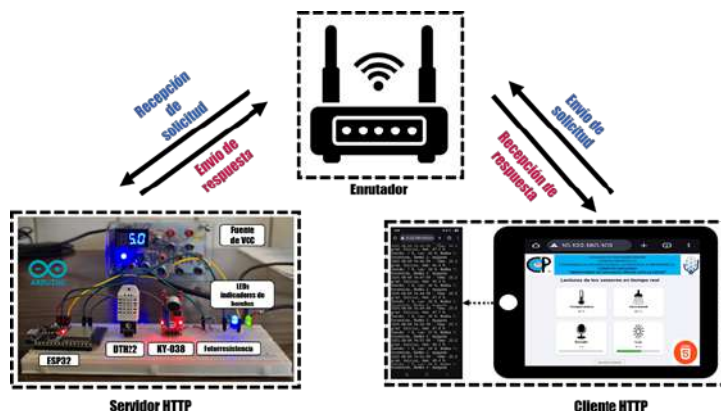
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se describe la implementación del sistema de control y monitoreo previamente diseñado. Para ello, se utilizó un microcontrolador ESP32, y la programación del algoritmo se llevó a cabo mediante la plataforma Arduino IDE. El sistema está compuesto por los siguientes elementos:

- Un sensor DHT22, conectado al GPIO 13, utilizado para la medición de temperatura y humedad.
- Un sensor KY-038, conectado al GPIO 34, empleado para detectar niveles de sonido en el ambiente.
- Una fotoresistencia, conectada al GPIO 32, utilizada para medir la intensidad de luz.
- Dos LEDs, conectados a los GPIOs 12 y 14, que representan el estado de activación o desactivación de las bombas de riego.

El sistema opera dentro de una red local, permitiendo el acceso a una interfaz web desde un navegador mediante un cliente HTTP. A través de esta interfaz, la cual fue hecha en HTML5, es posible visualizar en tiempo real las lecturas de los sensores y controlar el estado de los actuadores. La figura siguiente muestra la arquitectura general del sistema.

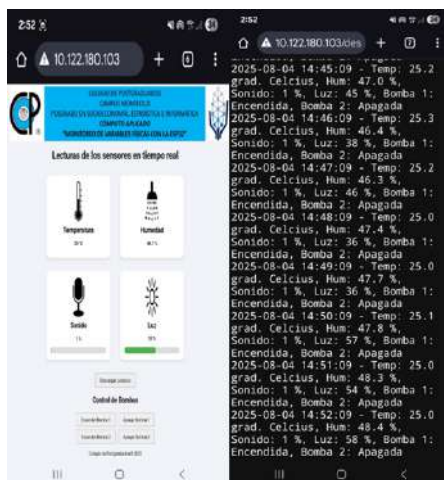
Figura 3. Arquitectura general del sistema de monitoreo y control de riego



Cabe mencionar que las lecturas generadas por cada uno de los sensores integrados en el sistema pueden visualizarse desde cualquier dispositivo con acceso a la red local, ya sea una computadora, tableta o teléfono móvil. Esto es posible debido a que la aplicación se ejecuta directamente en el microcontrolador ESP32, el cual actúa como servidor web. Para acceder a la interfaz de usuario, únicamente es necesario ingresar en un navegador la dirección IP asignada al ESP32 por el enrutador. El navegador cumple la función de cliente HTTP, permitiendo la visualización en tiempo real de las variables físicas monitoreadas (temperatura, humedad, sonido e intensidad de luz), así como el control de los actuadores.

En la figura siguiente se muestra la interfaz gráfica del sistema desarrollado, donde se representan los datos obtenidos por los sensores y los controles disponibles para la activación o desactivación de las bombas de riego.

Figura 4. Interfaz gráfica desarrollada y archivo con información de las lecturas realizadas



Los resultados obtenidos durante la implementación del sistema permitieron verificar el funcionamiento de los módulos de adquisición de datos, visualización en tiempo real y control de actuadores. Las lecturas de temperatura, humedad, sonido e intensidad de luz fueron registradas correctamente y mostradas en la interfaz web, accesible desde distintos dispositivos conectados a la red local. Asimismo, el control de las bombas de riego mediante comandos HTTP se ejecutó conforme a lo previsto, lo que evidencia la integración funcional entre los sensores, actuadores y el servidor embebido en el ESP32. Estos resultados indican que el sistema cumple con los requerimientos definidos para aplicaciones de monitoreo y control en entornos agrícolas educativos y de pequeña escala.

CONCLUSIONES

El presente trabajo abordó el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control de riego agrícola basado en el microcontrolador ESP32. El sistema permite la adquisición de variables físicas como temperatura, humedad, intensidad lumínica y nivel de sonido, así como el control de dos bombas de riego mediante una interfaz web accesible desde cualquier dispositivo conectado a la red local. La integración de sensores y actuadores, junto con el uso de tecnologías de bajo costo y código abierto, permitió cumplir con los requerimientos funcionales establecidos. La arquitectura propuesta permite su adaptación a diferentes contextos educativos y experimentales. El uso del ESP32 como servidor web embebido, junto con el almacenamiento local de datos mediante SPIFFS, proporciona una solución autónoma que no depende de servicios externos, lo cual resulta pertinente en escenarios donde la conectividad a internet es limitada.

Como línea de trabajo futura, se plantea la incorporación de funcionalidades adicionales como el envío de alertas por correo electrónico o mensajes SMS ante condiciones críticas en las variables monitoreadas. Asimismo, se considera la posibilidad de integrar conectividad a plataformas en la nube para el análisis remoto de datos históricos. Otra dirección posible consiste en la implementación de algoritmos de control automático, con el fin de optimizar el uso del agua en sistemas de riego. Finalmente, se propone la validación del sistema en condiciones reales de campo, así como su adaptación para el monitoreo de otros parámetros relevantes en la agricultura, como la conductividad del suelo o la calidad del aire en invernaderos.

LITERATURA CITADA

- Abd AL-Nabi, N. R., Mayyahi, L. A. K., Majeed, A. S., Abdulnabi, A. R., & Abdul-Rahaim, L. A. (2024). Design and implementation of a low-cost IoT smart weather station framework. *Journal of Internet Services and Information Security*, 14(2), 133–144. Recuperado de <https://jisis.org/article/2024.I2.009/71121/>
- Alvarado, A. M., Rodríguez, J. C., & Gómez, L. F. (2024). Precision farming for coffee: Real-time monitoring and control systems. *International Journal of Agricultural Technology*, 20(3), 145–158. Recuperado de http://onesearch.library.rice.edu/discovery/fulldisplay/cdi_proquest_journals_3165409684/01RICE_INST:RICE
- Bua, C., Borgianni, L., Adami, D., & Giordano, S. (2025). Reinforcement learning-driven digital

- twin for zero-delay communication in smart greenhouse robotics. *Agriculture*, 15(12), 1290. <https://doi.org/10.3390/agriculture15121290>
- Castelo Barreno, L. F., Aguilar Quevedo, J. E., & Guale Tomalá, Y. J. (2024). La tecnología educativa y su influencia en la experiencia de aprendizaje y rendimiento escolar. *Aula Virtual*, 5(12). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2665-03982024000202039
- Díaz Ronceros, E. (2020). Relevancia de la ejecución experimental de proyectos con microcontroladores en el aprendizaje de la ingeniería electrónica. *Educación*, 29(56). <https://doi.org/10.18800/educacion.202001.003>
- Dida, M. F., Shirvan, M. B., Kawaguchi, T., Garcia, S. C., & Gonzalez, L. A. (2025). Potential applications of a low-cost gas sensor to monitor enteric methane emission from ruminant animals. *Smart Agricultural Technology*, 10, 100706. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100706>
- Komatineni, B. K., Satpathy, S. K., Naik, M. A., Dwivedi, U., & Lahre, J. (2024). An unmanned rice seeder with WiFi-based mobile-control system for drudgery reduction. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100471. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100471>
- Méndez Carpio, C. R., & Zúñiga Ruilova, J. G. (2024). El ciberespacio y los dispositivos electrónicos: su repercusión en el desarrollo social. *Revista Científica*, 9(34), 382–403. <https://doi.org/10.29394/scientific.issn.2542-2987.2024.9.34.18.382-403>
- Morchid, A., Et-taibi, B., Oughannou, Z., El Alami, R., Qjidaa, H., Jamil, M. O., Boufounas, E.-M., & Abid, M. R. (2025). IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events. *Scientific African*, 27, e02527. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02527>
- Pressman, R. S. (2010). *Ingeniería de software: Un enfoque práctico* (7ª ed.). McGraw-Hill.
- Ramírez Jiménez, M. del R., Pulido Hernández, K., Rivera Orozco, C. E., Gómez Torres, N. A., Serrano Zúñiga, L., & Orozco Torres, L. M. (2024). UML: Una manera de representar, interpretar, analizar y desarrollar el pensamiento computacional. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 15(29). <https://doi.org/10.23913/ride.v15i29.2196>
- Rojas, L., Franco, Z., & Pateti, A. (2009). Diseños de circuitos electrónicos digitales utilizando la tecnología FPGA. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 13(52). Recuperado de https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212009000300008
- Vera Vera, J. B., & Vera Vera, J. R. (2023). El papel de la programación orientada a objetos en el desarrollo de software sostenible y escalable. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 27(121). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212023000400085

Capítulo XI

**Raquel Salazar Moreno¹, Irineo Lorenzo López Cruz¹,
Efrén Fitz Rodríguez¹ y Abraham Rojano Aguilar¹**

Clasificación de imágenes a través de una red neuronal convolucional

RESUMEN

Las redes neuronales convolucionales (CNN) se han aplicado con éxito en diversas áreas de la agricultura, como la identificación de enfermedades, malezas y en la clasificación de los estados de madurez de frutos. En los últimos años se han desarrollado diferentes algoritmos para la implementación de este tipo de redes que en conjunto con la visión artificial han podido resolver varios problemas en la agricultura y otras áreas. En este trabajo en particular se hace una descripción general del funcionamiento de las CNN. Se compara el desempeño de la CNN típica y la red RedNet-50, utilizando una base de datos Oxford-102 que contiene imágenes de 3 tipos de flores. Las métricas utilizadas para la evaluación de ambos modelos de CNN fueron: Precisión, Recall, F1 Score, Exactitud. De las tres flores contenidas en la base de datos, el girasol fue identificado de manera precisa en ambos modelos, el lirio y loto lo identificó de manera precisa casi en 100% la ResNet-50 mientras que la CNN típica tuvo una precisión del 90%. Los resultados mostraron la superioridad de las ResNet-50 en la precisión de la clasificación.

Palabras clave: Convolución, ReLU, Softmax, ResNet-50

ABSTRACT

Convolutional neural networks (CNNs) have been successfully applied in many agriculture areas, such as disease identification, weed detection, and the classification of fruit maturity stages. In recent years, different algorithms have been developed for the implementation of this type of network, which, together with computer vision, have been able to solve several problems in agriculture and other fields. This particular work provides a general description of how CNNs operate. It compares the performance of a typical CNN and the RedNet-50 network,

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. Correo: rsalazarm@chapingo.mx; ilopez@chapingo.mx; efitzr@chapingo.mx; abrojano@hotmail.com

using the Oxford-102 database that contains images of three types of flowers. The metrics used to evaluate both CNN models were: Accuracy, Recall, F1 Score, and Precision. Of the three flowers contained in the database, the sunflower was accurately identified in both models, the lily and lotus were identified almost 100% accurately by ResNet-50 while the typical CNN had an accuracy of 90%. The results showed the superiority of ResNet-50 in classification accuracy.

Keywords: Convolution, ReLU, Softmax, ResNet-50

INTRODUCCIÓN

Las redes neuronales convolucionales (CNN) constituyen una clase de redes neuronales profundas que se ha aplicado con éxito en de visión artificial. A diferencia de las ANN, cuyos requisitos de entrenamiento en términos de tiempo son poco prácticos en algunos problemas a gran escala, las CNN pueden aprender problemas complejos con especial rapidez gracias a la distribución de pesos y al uso de modelos más complejos, que permiten una paralelización masiva.

Las redes neuronales convolucionales pueden recibir cualquier tipo de datos como entrada, como audio, vídeo, imágenes, voz y lenguaje natural y han sido aplicadas con éxito en diversos ámbitos, como la identificación de enfermedades mediante resonancias magnéticas, la identificación de desastres mediante imágenes de teledetección y los vehículos autónomos entre otros.

En el ámbito agrícola han sido utilizadas en las áreas de detección de enfermedades de plantas y hojas, reconocimiento de plantas y cobertura del suelo. El recuento de frutos y la identificación de malezas (Kamilaris et al., 2018).

Las redes neuronales convolucionales CNN tienen grandes ventajas en la extracción de características, mostrando mejores resultados en la clasificación de imágenes. Sin embargo, el diseño de un procedimiento para el procesamiento y la selección de un método de clasificación de imágenes adecuado es un importante requisito previo a una clasificación y precisión exitosa (Lu & Weng, 2007). Las redes neuronales convolucionales CNN son poderosas para resolver tareas como el reconocimiento y clasificación de objetos, ya que extraen información de imágenes (Prasad *et al.*, 2018), como color, forma y textura.

En su investigación Gurnani *et al.*, (2017) realizaron una categorización de flores mediante redes neuronales convolucionales. Utilizaron una base de datos de flores de 102 clases de Visual Geometry Group que contiene 8189 imágenes de 102 clases flores diferentes de la Universidad de Oxford. Compararon el rendimiento de dos CNN; GoogleNet y AlexNet, usando un modelo pre entrenado con técnicas de segmentación para extraer regiones esenciales y con el conjunto de datos segmentado entrenar a la CNN, los mejores resultados los obtuvo GoogleNet.

Por otra parte, Gogul & Kumar, (2017) realizaron un sistema de reconocimiento de especies de flores utilizando redes convolucionales aplicando aprendizaje por transferencia para extraer las características de una red previamente entrenada. Observando que un enfoque por transferencia como extractor de características supera a los métodos hechos a mano, logrando una precisión entre el 92%

y el 94.8%. Xia *et al.*, (2017) utilizaron un modelo Inception-v3 con TensorFlow y aprendizaje por transferencia para clasificación de flores. Utilizaron la base de datos de la Universidad de Oxford con 102 clases además de otra de la misma universidad con 17 clases. Obteniendo una precisión del 94% y 95% respectivamente en cada base de datos. Así también, Wu *et al.*, (2018) implementaron aprendizaje por transferencia basado en modelos VGG-16, VGG-19, Inception-v3 y Resnet-50. Mostrando que el aprendizaje por transferencia puede evitar caer en óptimos locales y problemas de sobreajuste. Obteniendo mejoras en la precisión en los datos Oxford 102 y Oxford 17. Los resultados mostraron que la precisión de la clasificación de los modelos Inception-v3 por transferencia y ResNet-50 por transferencia es mayor que la de los otros modelos, obteniendo 95.88% y 96.57% de precisión respectivamente.

De igual manera, Prasad *et al.*, (2018), utilizaron la base de datos Oxford 102. Diseñaron y probaron diferentes arquitecturas de CNN, implementando la clasificación directamente en imágenes sin procesar, logrando una tasa de reconocimiento del 97.78%. Hiary *et al.*, (2018) propusieron un clasificador de aprendizaje profundo para distinguir flores en dos pasos; primero, la región de la flor se segmenta automáticamente. En segundo lugar, se construye un clasificador de CNN robusto. La detección la realizaron al encontrar el cuadro delimitador mínimo alrededor de una flor segmentada. La segmentación y la detección de la región mínima de la flor les permitieron una clasificación más precisa porque permitió que la clasificación de la CNN se centrara en la región de interés, excluyendo las regiones no discriminatorias. Evaluaron el método en tres conjuntos de datos, Oxford 17, Oxford 102 y Zoo-Nagy, obtenido 99%, 98.5% y 97.1% de precisión respectivamente.

Los autores Zhu *et al.*, (2018) emplearon un método profundo para extraer características con Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) lineal. Aplicaron dieciséis capas convolucionales, seguidas de tres capas completamente conectadas y una capa final Softmax. Además, cinco capas de agrupación máxima en una ventana de 2x2 con un paso de 2. Finalmente mencionan que el uso de capas con la función de activación ReLU proporciona un rendimiento superior para la tarea de identificación de plantas. Abu *et al.*, (2019) eligieron una red neuronal profunda (DNN) aplicada en una base de datos obtenida de ImageNet. La base de datos se basó en cinco clases de flores diferentes de tamaño fijo RGB de 224x224 pixeles obteniendo una precisión de 90.585%.

Por otra parte, Chen *et al.*, (2019) realizaron una clasificación de flores borrosas mediante CNN, aplicando un método de clasificación automático de dos pasos. Primero procesaron las imágenes clasificándolas en borrosas y no borrosas aplicando un filtro laplaciano, para después extraer las características de las imágenes claras utilizando la CNN. Las entradas eran de 100x100x3, con cuatro capas convolucionales y de agrupación para entrenamiento y clasificación. Después tres capas completamente conectadas y finalmente la función Softmax. En los resultados alcanzaron una precisión del 90.20%.

Mitrović & Milošević, (2019) aplicaron los modelos LeNet y AlexNet para clasificación de flores. En el caso de AlexNet con función Sigmoid Uniform para asignar pesos iniciales, lo cual proporcionó los mejores resultados de la clasificación. Reportaron una precisión en el rango de

70% - 95%. En su estudio Mete & Ensari, (2019) además de aplicar una red profunda CNN también utilizaron Data Augmentation. Como contribuciones el uso del aumento de imágenes para mejores resultados de rendimiento y la comparación en el rendimiento de clasificadores de aprendizaje automático como SVM, Random Forest, KNN y Multi layer Perceptron (MLP). Para el método utilizaron los conjuntos de datos Oxford 17 y Oxford 102, obteniendo la mejor precisión para Oxford 102 con SVM con un 98.5%.

Finalmente, Toğaçar *et al.*, (2020) presentaron un método híbrido que se utiliza junto con métodos de selección de características y modelos de CNN. Utilizaron los modelos de CNN AlexNet, GoogleNet, ResNet-50 y VGG-16 para extraer características, ya que estos modelos presentaron buenos resultados en las competencias The ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC). Las características obtenidas de estos modelos se combinan y las características eficientes se seleccionan con métodos de selección. La clasificación lograda por el método SVM fue del 98.91%.

Una de las motivaciones para implementar modelos de CNN en la clasificación de flores es que el aprendizaje es automático a partir de las imágenes de entrada, evitando extraer las diversas características para los clasificadores tradicionales (Prasad *et al.*, 2018). Como complemento Sultana *et al.*, 2018, en su estudio presentaron avances en la clasificación de imágenes implementando modelos de CNN de clasificación desde LeNet-5 (1998) hasta SENet (2017), mostrando que tanto GoogleNet (2014) como ResNet-50 (2015) obtuvieron las mejores precisiones.

En la actualidad se pueden tomar fotografías de las flores para utilizarlas como entradas en métodos de identificación y clasificación, sin embargo, las imágenes se capturan con diferentes variaciones en la configuración, ángulos y condiciones de iluminación (Prasad *et al.*, 2018).

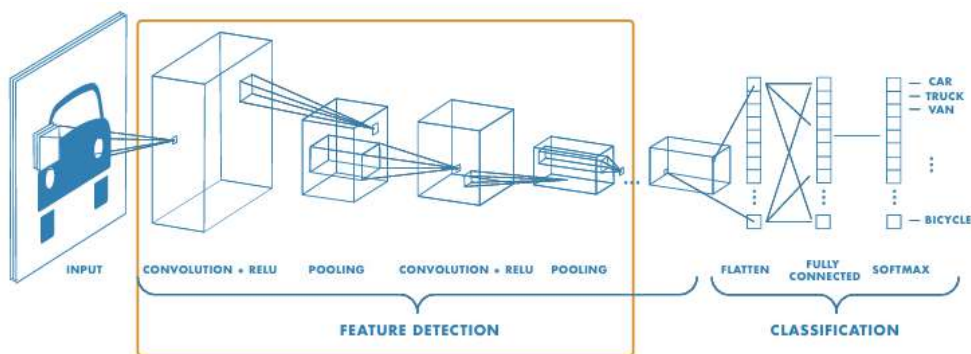
El objetivo del presente trabajo es implementar y evaluar una red neuronal convolucional CNN de arquitectura típica para la clasificación de tres categorías de flores: girasol, lirio y loto, y compararla con una red CNN resnet-50 pre entrenada.

Descripción de la Red Neuronal Convolucional

Las redes neuronales convolucionales CNN son un tipo especial de red neuronal multicapa cuya arquitectura típica se compone de bloques únicos o múltiples de capas de convolución y agrupación, después de eso, una o más capas completamente conectadas y una capa de salida como se muestra en la Figura 1.

Las CNN toman la intensidad de píxeles sin procesar de la imagen de entrada como un vector plano, con esto la CNN aprende automáticamente las características complejas. La primera capa puede detectar las características del nivel más bajo, como las esquinas y los bordes de la imagen, y las siguientes capas pueden detectar características de nivel medio como formas y texturas, para finalmente otras capas detectar características de nivel superior. Esta técnica única de construir desde características de nivel inferior a características de nivel superior en una imagen hace de las CNN útiles para procesamiento de imágenes.

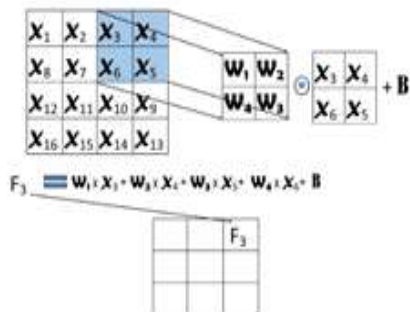
Figura 1. Diagrama general de una red neuronal convolucional



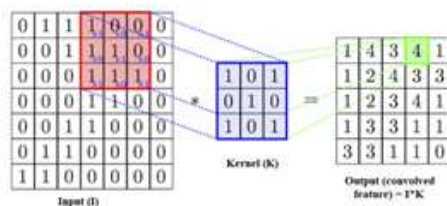
La convolución somete las imágenes de entrada a un conjunto de procesos convolucionales (filtros), cada uno de los cuales activa ciertas características de las imágenes, el filtro es una matriz de pesos la cual se multiplica elemento por elemento con la matriz de entrada y se suma el sesgo (Figura 2a). Para cada propósito en particular se utilizan diferentes filtros. El filtro se desplaza vertical y horizontalmente a lo largo de la imagen de entrada, repitiendo el mismo cálculo para cada región; es decir, convolucionando la entrada. El tamaño del paso se denomina “Stride”.

Figura 2. Operación convolución para un Kernel o filtro en particular

a



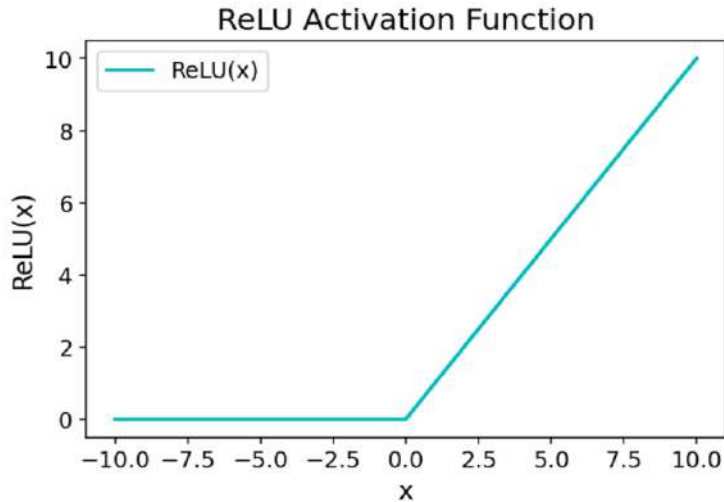
b



Existen diferentes filtros, en la Figura 2^a el filtro es de 2X2 y el stride de 1, en la 2b el filtro es de 3X3 y stride de 1, el resultado de la convolución se escribe en otra matriz.

Después de cada convolución se aplica una operación llamada unidad lineal rectificada (ReLU-Rectified Linear Unit) que permite una mayor rapidez y eficacia en el entrenamiento asignando valores negativos a cero y manteniendo valores positivos, lo cual aumenta la expresividad de las detecciones (Figura 3).

Figura 3. Rectified Linear Unit (ReLU)



La capa de agrupación (Pooling) es una operación de reducción de escala que simplifica la salida al realizar un muestreo descendente no lineal, lo que reduce la cantidad de parámetros que la red necesita conocer (Wu, 2017). Existen diferentes técnicas de agrupación, como agrupación máxima, agrupación media, agrupación promedio. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de agrupación máxima, en cada región se elige el número máximo y se forma una nueva matriz reducida.

Figura 4. Agrupación máxima con tamaño de Kernel 2

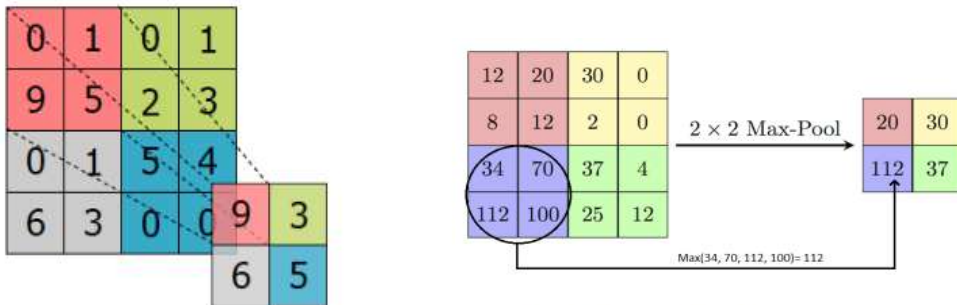


Fig. 3: Max Pooling operation

La Capa completamente conectada (Fully Connected, FC) es la última sección de una CNN (Figura 5). Esta capa toma información de todas las neuronas en la capa anterior, funciona como un perceptrón multicapa con alimentación hacia adelante (Sultana et al. 2018).

Figura 5. Perceptrón multicapa completamente conectado (FC)

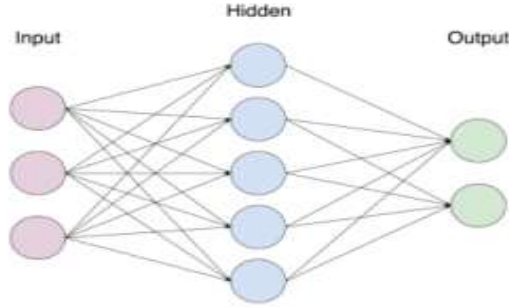


Fig. 4: Fully-connected layer

Función de pérdida Softmax

Para una tarea de clasificación de C clases en una instancia dada con la etiqueta C , la característica es $\mathbf{x}$. La probabilidad para cada clase se puede evaluar mediante:

$$p_i = \frac{\exp(\mathbf{w}_i^T \mathbf{x} + b_i)}{\sum_{j=1}^C \exp(\mathbf{w}_j^T \mathbf{x} + b_j)}, \quad (1)$$

Donde $\mathbf{w}_i$ y b_i son los pesos y sesgos para la última capa.

La función de pérdida Softmax para una característica $\mathbf{x}$ y clase C , se formula de la siguiente manera:

$$L = -\log p_c = -\log \left(\frac{\exp(\mathbf{w}_c^T \mathbf{x} + b_c)}{\sum_{j=1}^C \exp(\mathbf{w}_j^T \mathbf{x} + b_j)} \right) \quad (2)$$

(Li y Wang, 2020).

La función de pérdida se utiliza para medir que tan cerca o que tan lejos esta la respuesta con respecto a la esperada.

Descripción de ResNet-50

Las ResNets o redes residuales son un tipo de arquitectura de red neuronal convolucional profunda que fue presentada por primera vez en diciembre de 2015 por Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren y Jian Sun en MSRA (Microsoft Asia).

Una variante de las redes neuronales convolucionales son las redes residuales, más conocidas como ResNet. Este tipo de redes permite entrenar redes con una mayor profundidad, ya que su objetivo es evitar la degradación que se produce al tener una red con un número relativamente alto de capas ocultas. Es un modelo que incluye un mapeo residual que consta de bloques apilados de capas convolucionales.

En redes neuronales profundas tradicionales o simples, a medida que aumenta el número de capas, el error de entrenamiento o prueba empeora. Esto puede provocar un aprendizaje más lento e incluso la ausencia total de aprendizaje en arquitecturas muy profundas. Las ResNets resuelven este problema introduciendo conexiones de salto, también conocidas como conexiones residuales, que permiten que el gradiente omita ciertas capas de la red.

La degradación (de la precisión de entrenamiento) indica que no todos los sistemas son igualmente fáciles de optimizar. Para superar esto, se omiten bloques de convolución que existen entre dos unidades de activación Relu, alimentando el o/p del primer Relu al segundo Relu. Al agregar esta conexión residual, la red puede aprender la función residual en lugar de aprender directamente el mapeo subyacente. Esto puede conducir a un aprendizaje más eficiente y un mejor rendimiento, especialmente en arquitecturas muy profundas. Añadir una capa adicional no perjudicaría el rendimiento, ya que la regularización y los pesos se omiten. Esto garantiza que el rendimiento no disminuirá al aumentar el número de capas de 20 a 50 o de 50 a 100; simplemente se añade un bloque de identidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Base de datos

En esta investigación se utilizó la base de datos Oxford-102 creada por María-Elena Nilsback y Andrew Zisserman en el 2008 (Nilsback & Zisserman, 2008). De la base de datos mencionada se tomaron tres clases (Cuadro 1, Figura 6).

Cuadro 1. Clases seleccionadas de la base de datos Oxford-102

Clase	Tamaño de Muestra	Porcentaje
Girasol	61	15.6 %
Lirio de agua	194	49.6 %
Loto	136	34.8 %
TOTAL	391	100.0 %

Figura 6. Clases seleccionadas de la base de datos Oxford-102



Girasol



Lirio de agua



Loto

A las imágenes se les realiza un reescalado para tener el mismo tamaño, cumpliendo así también con los requerimientos de la red resnet-50 para tener un tamaño de 224x224 píxeles de entrada. También se realizó la rotación de imágenes a 90°, 180° y 270°, para finalmente contar con 200 imágenes por clase y 600 imágenes en total.

MODELO CNN

En este trabajo se utilizó un modelo de CNN típico mostrado en la Figura 1. La arquitectura de la red CNN consta de tres entradas (imageinput) que son las clases de flores ya pre procesadas con un tamaño 224x224 en RGB. Tres capas convolucionales (conv_1, conv_2 y conv_3), capas de normalización por lotes para estandarizar las entradas a una capa (batchnorm_1, batchnorm_2 y batchnorm_3). Se utilizó la función ReLU, que es la capa de unidad lineal rectificadora (relu_1, relu_2 y relu_3), y después una red completamente conectada y alimentada hacia adelante. Así también la función softmax (softmax) para calcular la distribución de probabilidades de cada clase y posteriormente la capa de clasificación (classoutput).

Figura 7. Modelo CNN para clasificación de flores



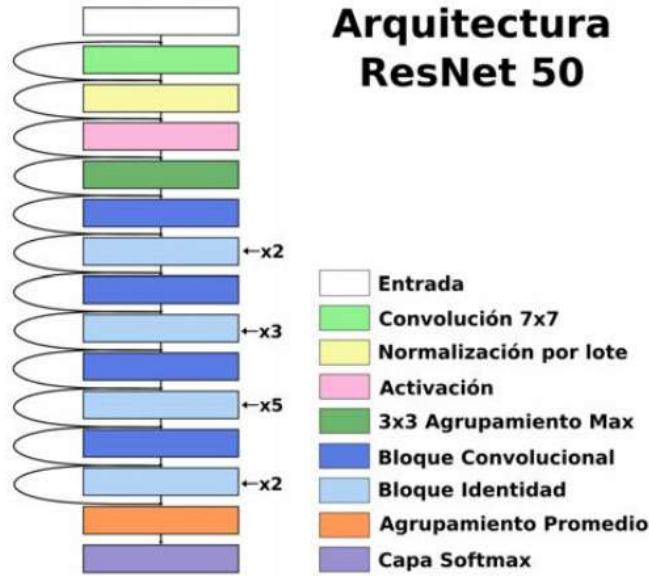
ResNet-50

La siguiente red utilizada es una red ResNet con 50 capas agrupadas en bloques residuales que se puede localizar en la documentación online de MATLAB, que es una versión previamente entrenada en más de un millón de imágenes en la base de datos de ImageNet. La red puede clasificar imágenes en 1000 clases, como resultado ha aprendido representaciones de características para una amplia gama de imágenes. En la Figura 8 se muestra la estructura general de una ResNet-50.

Los conjunto de datos de flores se ingresaron con un tamaño de 224x224 y se clasificaron en categorías utilizando una máquina de vectores de soporte lineal (SVM) multiclase entrenada con características de CNN extraídas de las imágenes.

Las capas densas son las capas completamente conectadas tradicionales de las redes neuronales artificiales. Estas capas se encuentran normalmente al final de las CNNs y se utilizan para realizar el proceso de clasificación. Las capas densas normalmente reciben como entrada el vector de características obtenido durante el proceso de extracción.

Figura 8. Arquitectura ResNet 50



Métricas de evaluación

Para la evaluación del desempeño de la identificación y clasificación de objetos del modelo de redes convolucionales se mide a través de indicadores tales como:

Precisión (precision) es la proporción de verdaderos positivos en las predicciones positivas (3):

$$\text{Precisión} = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{\text{Predichos correctamente}}{\text{Total predichos}} \quad (3)$$

La recuperación (Recall), también conocida como sensibilidad, mide la proporción de casos positivos reales que el modelo predice correctamente como positivos. Es especialmente importante cuando el costo de los falsos negativos es alto (4):

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{\text{Correctamente Clasificados}}{\text{Actual}} \quad (4)$$

En donde:

FP=falsos positivos (número de predicciones donde el clasificador predice incorrectamente la clase negativa como positiva); FN=falsos negativos (número de predicciones donde el clasificador redice incorrectamente la clase positiva como negativa), TP=verdadero positivo o true positives (número

de predicciones donde el clasificador predice correctamente la clase positiva como positiva) y TN=verdaderos negativos o true negatives (número de predicciones donde el clasificador predice correctamente la clase negativa como negativa).

F1-Score Es la media armónica de precisión y recuperación, que combina ambas métricas en un único valor que equilibra su importancia y evalúa el rendimiento de un modelo de clasificación en un conjunto de datos, especialmente cuando las clases están desequilibradas, es decir, cuando una clase aparece con mucha más frecuencia que otra.

$$F1 \text{ Score} = 2 \left(\frac{\text{Precision} * \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \right) \quad (5)$$

Tasa de clasificación correcta conocida como exactitud (Accuracy) es la proporción de identificaciones positivas verdaderas, se refiere a la capacidad del modelo para identificar y clasificar correctamente las características presentes en los datos de entrada.

$$\text{Exactitud} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (6)$$

Tasa de clasificación incorrecta (Missclassification Rate).

$$\text{Tasa de clasificación incorrecta} = \frac{FP + FN}{TP + TN + TP + FN} \quad (7)$$

(Gomez Bedoya & Castrillón, 2019).

Algunos de los resultados anteriores se pueden resumir en una Matriz de Confusión que es una tabla que describe el desempeño de un modelo de clasificación para un conjunto de datos en donde se conoce los valores de salida verdaderos.

RESULTADOS

Los dos modelos de redes fueron entrenados en una computadora con Windows 10 de 64 bits, procesador AMD Ryzen 5 4600H, con 512 GB de disco de estado sólido, 8 GB de memoria RAM, una tarjeta de video NVIDIA GTX 1650 de 4GB, utilizando el software de cómputo MATLAB R2020b.

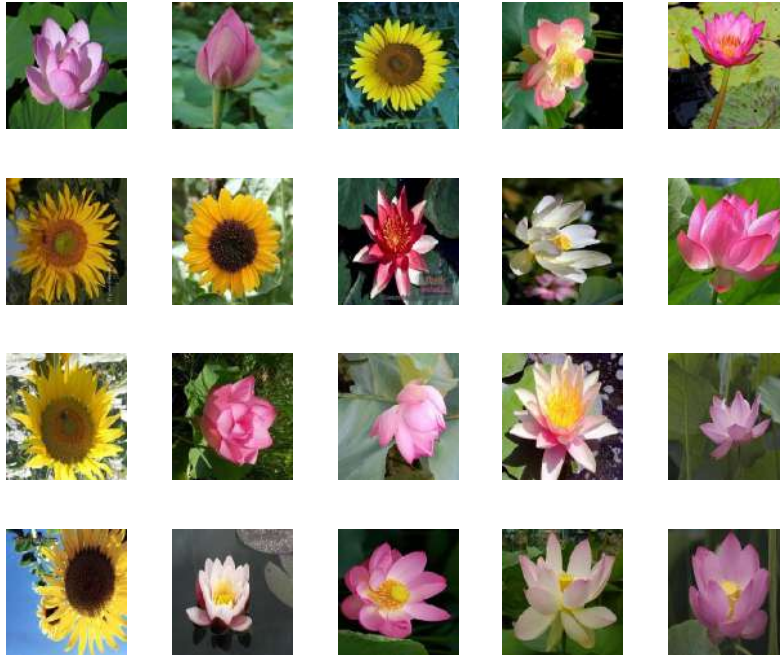
Pre procesamiento de la base de datos

Una vez realizado el preprocesamiento mencionado en la metodología a las clases seleccionadas de la base de datos Oxford-102, se tuvieron 200 imágenes por cada clase siendo 600 imágenes en total, como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Base de datos pre procesada para utilizar en las CNNs

Clase	Tamaño de Muestra	Porcentaje (%)
Girasol	200	33.33
Lirio de agua	200	33.33
Loto	200	33.33
TOTAL	600	100.00

Figura 9. Ejemplo aleatorio del conjunto de datos utilizados Oxford-102



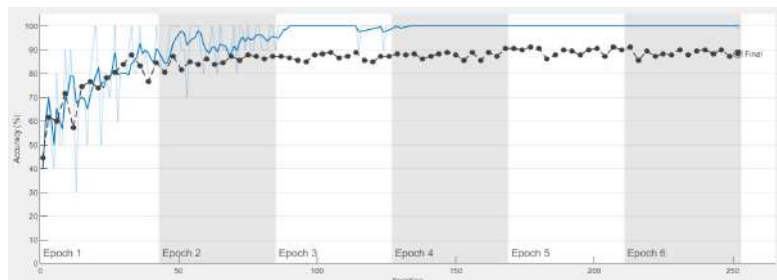
Entrenamiento

En ambos modelos se utilizó el mismo conjunto de datos, con la diferencia que en el caso de la arquitectura CNN típica para el entrenamiento y validación los datos se dividieron en 70% para entrenamiento, el cual se utiliza para el entrenamiento y aprendizaje de modelos, así como para ajustar los parámetros, y un 30% para validación, para probar el modelo en el entrenamiento, optimizar el modelo y ajustar los parámetros.

En el caso de la red ResNet-50, al ser una red previamente entrenada con 1000 mil clases, y al utilizarla en una base de datos diferente, es decir la base de datos Oxford-102, esta se dividió en entrenamiento y validación con un 30% y 70% respectivamente seleccionadas aleatoriamente.

En la Figura 10 se muestra el entrenamiento de la red CNN típica implementada. En línea azul el entrenamiento y con línea negra punteada la validación.

Figura 10. Entrenamiento y validación de la red CNN típica utilizada



Se proveyó de nuevas imágenes a la red para realizar la predicción y se generó la matriz de confusión para la red típica de CNN(Figura 10) y la ResNet-50 la cual presenta las probabilidades de cada predicción y posteriormente las normaliza en función del número de muestras en cada una de las clases.

Figura 11. Matriz de confusión de los modelos del modelo CNN,

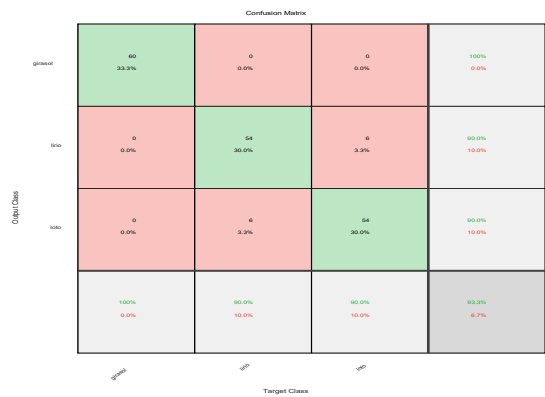


Figura 12. Matriz de confusión para el modelo ResNet-50

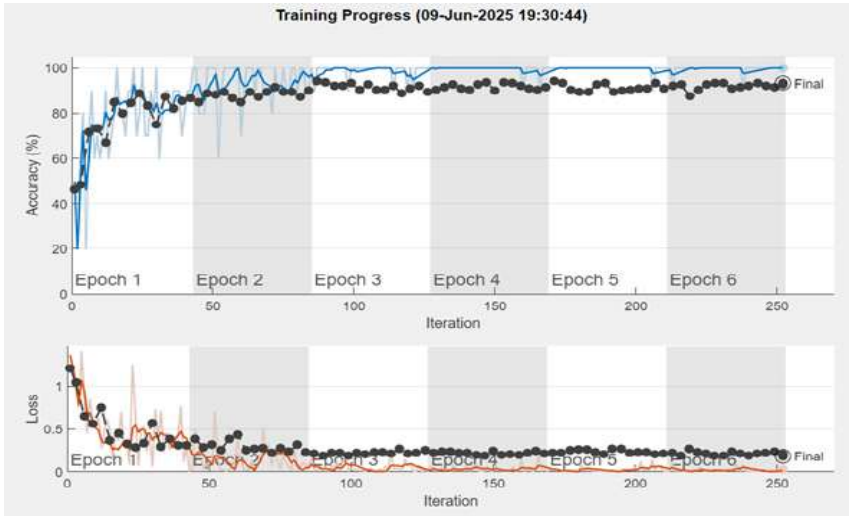


De todas las imágenes presentadas, la CNN predijo de manera correcta el 93.3% de los casos, mientras que la ResNet-50 el 98.8 %. Ambas redes detectaron el girasol sin ningún error, mientras que para el caso del lirio y loto se detectaron de manera correcta en un 90% en CNN y las ResNet-50 detectaron bien el lirio en un 99.3% y el loto en un 98.8%. El desempeño de la ResNet-50 superó a la CNN típica.

Se puede observar que, en ambos modelos, la probabilidad de predicción para la clase girasol fue mejor en comparación con las probabilidades con las clases lirio y loto, esto debido a que las flores de lirio y loto tienen un mayor parecido, en cambio los girasoles muy distintos y es evidente que en las predicciones hay cierta descompensación.

En la Figura 13 se muestra la evolución de la precisión y función de pérdida para el modelo CNN, el modelo converge en la iteración 250 con una precisión de 93% y una pérdida muy cercana a cero.

Figura 13. Precisión y función de pérdida para el modelo CNN,



En el Cuadro 3 se muestra la comparación de la CNN típica y la red ResNet-50, la tasa de clasificación correcta (Accuracy) obtenida de cada modelo y la tasa de clasificación incorrecta (Missclassification Rate). En la cual se puede notar que la precisión de la red ResNet-50 fue mayor, inclusive casi del 100%, mientras que la precisión en la red CNN típica fue del 88.3%. Dichos valores se obtienen de las siguientes fórmulas:

Cuadro 3. Tasa de clasificación correcta e incorrecta obtenida en los modelos CNN

Modelo	Accuracy (%)	Missclassification Rate (%)
CNN típica	93.3	6.7
ResNet-50	98.8	1.2

En el Cuadro 4 se presenta un resumen de la comparación de ambas redes.

Cuadro 4. Comparación de los resultados de las métricas de evaluación por clase para cada modelo

Clase	CNN típica			ResNet-50		
	Precision (%)	Recall (%)	F1 Score (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1 Score (%)
Girasol	100	96.8	98.4	100	100	100
Lirio	90.0	84.2	82.0	99.3	100	98.9
Loto	90.0	83.6	84.3	98.8	97.9	98.9

Ambos modelos generan resultados muy precisos en la identificación de girasol, el modelo ResNet-50 la precisión es mucho mejor.

En cuanto a la métrica Recall, es decir la cantidad que el modelo es capaz de identificar se observa que este es mayor en cada clase de la red ResNet-50, siendo del 100% para la clase girasol y lirio, y del 97.9% para la clase loto. Y finalmente, el valor F1 que combina las medidas de precisión y Recall, es decir, la media armónica de los dos valores es mejor en el modelo ResNet-50 en el cual la clase girasol tiene 100% y la clase lirio y loto tienen 98.9% respectivamente. En la CNN típica el valor F1 en la clase girasol es del 98.4%, en la clase lirio es del 82% y en la clase loto del 84.3%. Este valor F1 Score es una medida más avanzada del rendimiento de clasificaciones, por lo tanto, es muy importante ya que proporciona un mejor indicador de la capacidad de cada modelo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ilustró la utilidad de los modelos basados en Inteligencia Artificial utilizando un conjuntos de datos públicos de imágenes de flores. Los resulta dos mostraron que los modelos de clasificación basados en IA son capaces de obtener altas tasas de aciertos en la identificación.

La clasificación de especies de flores es una tarea complicada. Los métodos tradicionales han sido eficaces, sin embargo, en años recientes uno de los enfoques preferidos para lograr mejores resultados son los modelos de aprendizaje profundo. Estos métodos pueden extraer características directamente de los datos de entrada a diferencia de métodos tradicionales.

De acuerdo a las métricas con las que se evaluaron los dos modelos de CNN, la red ResNet-50, mostró su superioridad en comparación a la CNN típica, resaltando que la implementación de una red previamente entrenada mejora considerablemente la clasificación.

LITERATURA CITADA

Kamilaris, A.; Prenafeta-Boldú, F.X. (2018). A Review of the Use of Convolutional Neural Networks in Agriculture. J. Agric. Sci. Technol. 156, 312–322. [CrossRef]

Chen, C., Yan, Q., Li, M., & Tong, J. (2019). Classification of Blurred Flowers Using Convolutional

- Neural Networks. In Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Deep Learning Technologies (pp. 71-74).
- Gogul, I., & Kumar, V. S. (2017). Flower species recognition system using convolution neural networks and transfer learning. In 2017 fourth international conference on signal processing, communication and networking (ICSCN) (pp. 1-6). IEEE.
- Gurnani, A., Mavani, V., Gajjar, V., & Khandhediya, Y. (2017). Flower categorization using deep convolutional neural networks. arXiv preprint arXiv:1708.03763.
- Hiary, H., Saadeh, H., Saadeh, M., & Yaqub, M. (2018). Flower classification using deep convolutional neural networks. IET Computer Vision, 12(6), 855-862.
- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. International journal of Remote sensing, 28(5), 823-870.
- Li, X., & Wang, W. (2020). Learning discriminative features via weights-biased softmax loss. Pattern Recognition, 107. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2020.107405>
- Mete, B. R., & Ensari, T. (2019). Flower Classification with Deep CNN and Machine Learning Algorithms. In 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) (pp. 1-5). IEEE.
- Mitrović, K., & Milošević, D. (2019). Flower classification with convolutional neural networks. In 2019 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC) (pp. 845-850). IEEE.
- Nilsback, M. E., & Zisserman, A. (2008). Automated flower classification over a large number of classes. In 2008 Sixth Indian Conference on Computer Vision, Graphics & Image Processing (pp. 722-729). IEEE.
- Prasad, M. V. D., Lakshamma, B. J., Chandana, A. H., Komali, K., Manoja, M. V. N., Kumar, P. R., & Kiran, P. S. (2018). An efficient classification of flower images with convolutional neural networks. International Journal of Engineering & Technology, 7(1.1), 384-391.
- Sultana, F., Sufian, A., & Dutta, P. (2018). Advancements in image classification using convolutional neural network. In 2018 Fourth International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN) (pp. 122-129). IEEE.
- Toğaçar, M., Ergen, B., & Cömert, Z. (2020). Classification of flower species by using features extracted from the intersection of feature selection methods in convolutional neural network models. Measurement, 158, 107703.
- Wu, Y., Qin, X., Pan, Y., & Yuan, C. (2018). Convolution neural network-based transfer learning for classification of flowers. In 2018 IEEE 3rd international conference on signal and image processing (ICSIP) (pp. 562-566). IEEE.

- Wu, J. (2017). Introduction to convolutional neural networks. National Key Lab for Novel Software Technology. Nanjing University. China, 5(23), 495.
- Xia, X., Xu, C., & Nan, B. (2017). Inception-v3 for flower classification. In 2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC) (pp. 783-787). IEEE.
- Zhu, H., Liu, Q., Qi, Y., Huang, X., Jiang, F., & Zhang, S. (2018). Plant identification based on very deep convolutional neural networks. *Multimedia Tools and Applications*, 77(22), 29779-29797.
- Campos, L.J.A., Vega, L. I.F., Beltrán, G.G., López, A.J.R., Yee, R.A. (2023). La Inteligencia artificial como apoyo en la identificación de especies de plantas. *Komputer Sapiens*, 15(2).

Capítulo XII

Ángel Hernández Facundo¹, Jorge Víctor Prado Hernández²
y Mauricio Carrillo García³

Evaluación de ecuación unidimensional de Boussinesq para el diseño de drenes subterráneos parcelarios

RESUMEN

El diseño de sistemas de drenaje agrícola subterráneo requiere modelos matemáticos que describan con precisión el perfil de la carga hidráulica sobre los drenes bajo diferentes configuraciones de diseño y tipos de suelo. En este trabajo se evaluó la ecuación unidimensional de Boussinesq en régimen transitorio, utilizada para el diseño de drenes subterráneos, mediante modelos físicos en laboratorio. El primer experimento se desarrolló en un perfil heterogéneo arcilloso compuesto por dos estratos, mientras que en una segunda prueba se empleó un perfil homogéneo de suelo arenoso. Las conductividades hidráulicas se obtuvieron mediante el programa SPAW, y la porosidad drenable se calculó a partir de las humedades a capacidad de campo y saturación. Los resultados mostraron que, en el suelo arcilloso, el modelo presentó un ajuste sobresaliente con valores de $RMSE = 0.037$ m, $r = 0.982$ y $NSE = 0.94$, lo que evidencia su alta capacidad predictiva en condiciones de baja permeabilidad. En contraste, en el suelo arenoso se alcanzó un ajuste aceptable ($RMSE = 0.060$ m, $r = 0.943$, $NSE = 0.74$), aunque con menor precisión debido a la rápida respuesta del nivel freático en medios de alta transmisividad. En conjunto, los resultados confirman que la ecuación de Boussinesq constituye una herramienta confiable para el diseño de drenajes agrícolas, con mayor robustez en suelos de textura fina, pero con necesidad de parametrización más cuidadosa en suelos arenosos, lo que aporta evidencia experimental relevante para el diseño de drenajes en condiciones contrastantes en México.

Palabras clave: Drenaje subterráneo, modelos físicos experimentales, evaluación matemática, suelo arcilloso, suelo arenoso.

ABSTRACT

The design of subsurface agricultural drainage systems requires mathematical models that accurately

¹ Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del agua. ² Departamento de Suelos. ³ Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, Estado de México.
Correo: al21130301@chapingo.mx; jpradoh@chapingo.mx; mcarrillog@chapingo.mx

describe the hydraulic head profile toward drains under different design configurations and soil types. In this study, the one-dimensional Boussinesq equation in a transient regime, commonly used for the design of subsurface drains, was evaluated through laboratory physical models. The first experiment was conducted on a heterogeneous clay profile composed of two strata, while the second test used a homogeneous sandy soil profile. Hydraulic conductivities were obtained using the SPAW program, and drainable porosity was calculated from the difference between field capacity and saturation moisture contents. The results showed that, in clay soil, the model presented an outstanding fit with values of $RMSE = 0.037$ m, $R^2 = 0.982$, and $NSE = 0.94$, demonstrating its high predictive capacity under low-permeability conditions. In contrast, in sandy soil, an acceptable fit was achieved ($RMSE = 0.060$ m, $R^2 = 0.943$, $NSE = 0.74$), although with lower accuracy due to the rapid response of the water table in high-transmissivity media. Overall, the results confirm that the Boussinesq equation is a reliable tool for the design of agricultural drainage systems, showing greater robustness in fine-textured soils but requiring more careful parameterization in sandy soils, thus providing relevant experimental evidence for drainage design under contrasting conditions in Mexico.

Keywords: Subsurface drainage, experimental physical models, mathematical evaluation, clay soil, sandy soil.

INTRODUCCIÓN

Incrementar la productividad agrícola no solo consiste en optimizar el uso del agua disponible, sino también en recuperar suelos agrícolas afectados por anegamiento y salinización, que cada año reducen la superficie productiva en distritos y unidades de riego. En regiones del trópico húmedo y en zonas irrigadas del centro del país, la saturación prolongada del suelo y la acumulación de sales han limitado el potencial agrícola y amenazan la seguridad alimentaria. Frente a este panorama, el drenaje agrícola subterráneo se reconoce como una práctica fundamental para controlar el nivel freático, mejorar la aireación del suelo y reducir la salinidad (Hornbuckle et al., 2007; Darzi-Naftchally et al., 2014; Ritzema, 2006).

El diseño de sistemas de drenaje subterráneo depende en gran medida de modelos matemáticos que describen el movimiento del agua subterránea, con el fin de garantizar una profundidad óptima del nivel freático que permita el adecuado desarrollo de los cultivos. Tradicionalmente, las ecuaciones de régimen permanente han sido ampliamente utilizadas debido a su simplicidad y bajos requerimientos de datos (Ernst, 1974; Skaggs & van Schilfgaarde, 1999). Sin embargo, sus supuestos de recarga constante y nivel freático estable en el tiempo no representan adecuadamente las condiciones reales en sistemas de riego o en regiones con alta variabilidad climática, lo que puede conducir a diseños poco eficientes o sobredimensionados (Ritzema, 2006; Namuche-Vargas et al., 2020). En tales contextos, las ecuaciones de régimen transitorio ofrecen una mejor aproximación, ya que permiten modelar la evolución temporal del drenaje y de la lámina freática bajo diferentes escenarios de recarga (Singh et al., 2021; Mehdinejadiani et al., 2013).

Dentro de este marco, la ecuación unidimensional de Boussinesq constituye un modelo clásico para describir el flujo subterráneo no estacionario hacia drenes paralelos (Boussinesq, 1904;

Kirkham, 1958). Su utilidad radica en que proporciona una base analítica para representar la dinámica del nivel freático en condiciones de drenaje transitorio.

No obstante, la mayoría de los estudios experimentales se han realizado en suelos arcillosos o en estratos homogéneos de baja conductividad hidráulica (Zavala et al., 2012; Darzi-Naftchally et al., 2014; Oyarce et al., 2017), mientras que las aplicaciones en suelos de textura ligera, como los arenosos, han sido menos frecuentes, pese a que en ellos la alta permeabilidad y la rápida respuesta hidráulica generan condiciones de drenaje distintas (Ramos et al., 2015; Saxton & Rawls, 2006).

Diversos estudios han ampliado la aplicabilidad del modelo. Fuentes et al. (2009) y Chávez et al. (2011) reportan que la incorporación de un coeficiente de almacenamiento variable y la porosidad drenable permite representar con mayor precisión la retención de agua y la profundidad acumulada de drenaje en condiciones de laboratorio y simulación numérica. Duarte et al. (2001) demostraron que la formulación Boussinesq–Glover se ajusta mejor a configuraciones con drenes sobre capas impermeables. Zimmer et al. (2023) y Trejo & Saucedo Rojas (2022) validaron el modelo en campo, mostrando que con una calibración adecuada es posible predecir caudales drenados con una eficiencia Kling–Gupta superior a 0.5 en suelos limosos. Asimismo, esquemas implícitos y modelos de tipo Hele–Shaw (Tzimopoulos & Terzidis, 1975; Ram & Chauhan, 1987; Guitjens & Luthin, 1965) han mostrado buen ajuste en condiciones de pendiente suave, aunque tienden a sobreestimar el espaciamiento de drenes en pendientes mayores al 30%. En experimentos de laboratorio, Gupta et al. (1994) evidenciaron que la consideración de porosidad drenable variable puede reducir el error de predicción en más del 70%. De igual manera, simulaciones computacionales (Skaggs, 1991) subrayan la necesidad de corregir el efecto de flujo radial cerca de los drenes.

En conjunto, estas investigaciones respaldan que la ecuación unidimensional de Boussinesq, con una parametrización cuidadosa particularmente del coeficiente de almacenamiento y la porosidad drenable, constituye un marco robusto para modelar el comportamiento del drenaje agrícola subterráneo en condiciones contrastantes, tanto en medios homogéneos y altamente permeables (suelos arenosos) como en configuraciones heterogéneas y de baja conductividad (suelos arcillosos).

En este estudio se plantea la evaluación experimental de la ecuación de Boussinesq en régimen transitorio mediante la construcción de modelos físicos en laboratorio. El primer experimento se realizó en 2021 con un perfil arcilloso compuesto por dos estratos, mientras que un segundo experimento se efectuó en 2025 en un perfil homogéneo de suelo arenoso representativo de las áreas agrícolas de Huactzingo, Tlaxcala, México. El objetivo es analizar la capacidad predictiva de la ecuación frente a mediciones experimentales del nivel freático en dos condiciones de suelo contrastantes y discutir su aplicabilidad en el diseño de sistemas de drenaje agrícola. Este enfoque aporta evidencia experimental que contribuye a mejorar el diseño de sistemas de drenaje en zonas agrícolas mexicanas, donde la variabilidad climática, la heterogeneidad edáfica y las presiones derivadas de la seguridad alimentaria demandan la validación de modelos matemáticos adaptados a condiciones locales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo físico experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en el Campo Experimental Tlapeaxco del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), ubicado en el municipio de Texcoco, Estado de México. Se realizaron dos modelos físicos experimentales en distintos periodos. El primer experimento, desarrollado en 2021, consistió en un perfil arcilloso estratificado y fue descrito previamente en el 10° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas (Hernández-Facundo y Prado-Hernández, 2021), donde se evaluó la ecuación de régimen permanente de Mishra y Singh (2007). En el presente trabajo se retoma como antecedente metodológico y no se describe nuevamente en detalle.

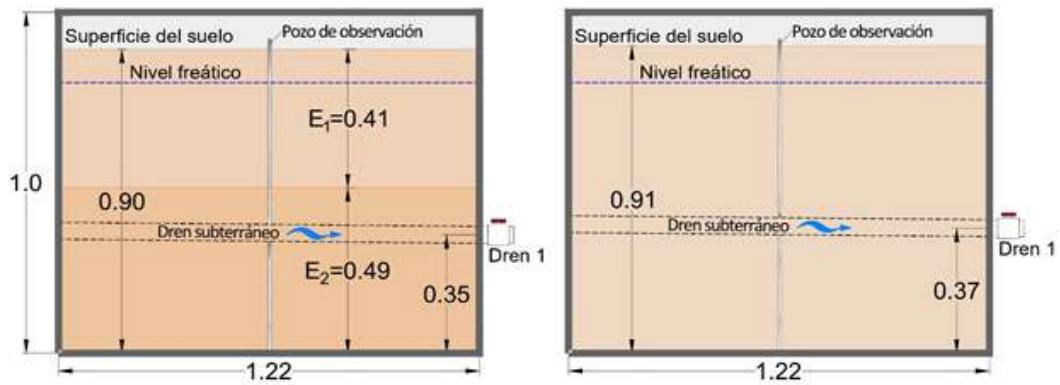
El segundo experimento, realizado en 2025 se utilizó un suelo de textura arenosa, recolectado en una parcela agrícola del municipio de San Juan Huactzingo, Tlaxcala, México, a una profundidad de 20 cm, procurando mantener las propiedades físicas representativas del horizonte superficial (Figura 1). La selección de este suelo se basó en su homogeneidad estructural, alta permeabilidad y baja capacidad de retención hídrica, características que permiten un flujo subterráneo uniforme y contrastan con las condiciones del suelo arcilloso evaluado previamente.

Figura 1. Extracción de suelo arenoso en áreas agrícolas de Huactzingo, Tlaxcala, México.



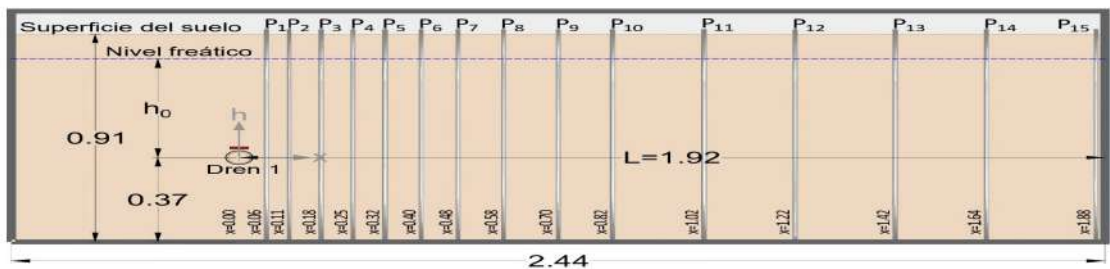
En términos generales, el modelo físico experimental representó el proceso de drenaje agrícola subterráneo bajo dos configuraciones de suelo: uno homogéneo (Figura 2b) y otro heterogéneo (Figura 2a). El montaje incluyó un contenedor con suelo, un sistema de saturación y drenaje, así como dispositivos de medición de la carga hidráulica, lo que permitió registrar la variación espacio-temporal de la carga hidráulica (h) en condiciones controladas de laboratorio, lo que facilitó la validación experimental de la ecuación de Boussinesq en ambos escenarios de textura.

Figura 2. Vista lateral de diseño experimental: a) suelo heterogéneo con un estrato franco (E1) y otro Franco arcilloso (E2) y b) suelo homogéneo arenoso.



En el perfil de suelo arcilloso, las mediciones de la carga hidráulica se realizaron mediante siete pozos de observación (P) ubicados a lo largo del eje longitudinal del contenedor, a distancias de 0.04, 0.21, 0.47, 0.70, 0.93, 1.19 y 1.36 m a partir del dren izquierdo (Dren 1). En el caso del suelo arenoso, se emplearon 15 pozos de observación localizados a distancias de 0.06, 0.11, 0.18, 0.25, 0.32, 0.40, 0.48, 0.58, 0.70, 0.82, 1.02, 1.22, 1.42, 1.64 y 1.88 m a partir del dren izquierdo (Dren 1) (Figura 3). Los drenes subterráneos, de 52 mm de diámetro nominal, se instalaron con una pendiente del 1%, cumpliendo con las especificaciones de superficie de drenaje recomendadas por la FAO (2002).

Figura 3. Vista frontal del modelo experimental para un suelo homogéneo con suelo arenoso.



Los experimentos consistieron en saturar el perfil de suelo hasta alcanzar una altura inicial de carga (h_0) y, posteriormente, abrir el dren correspondiente para iniciar el proceso de vaciado. En el suelo arcilloso, la carga inicial fue de 0.48 m, con un periodo de observación de 90 minutos, registrando datos cada 10 minutos. En el suelo arenoso, la carga inicial fue de 0.47 m, con un tiempo total de observación de 45 minutos, registrando datos cada 5 minutos. En ambos casos se obtuvo la evolución completa del nivel freático durante el proceso de drenaje. Para representar una separación entre drenes de 3.84 m, se asumió simetría en el perfil experimental, de manera que los datos medidos desde el dren hasta $L/2$ permiten caracterizar todo el perfil.

Parámetros hidráulicos del suelo

La conductividad hidráulica saturada (K) se estimó mediante funciones de pedotransferencia implementadas en el software SPAW (Soil-Plant-Air-Water), desarrollado por el USDA Agricultural Research Service, el cual permite calcular propiedades hidráulicas del suelo a partir de los porcentajes de arena, limo y arcilla obtenidos en laboratorio (Saxton & Willey, 2005). La porosidad efectiva (n) se determinó como la diferencia entre el contenido volumétrico de agua a saturación (θ_s) y el correspondiente a la capacidad de campo (θ_{cc}), representando el volumen de poros que contribuyen efectivamente al flujo de agua en el suelo (Cuadro 1 y 2).

Cuadro 1. Características físicas del suelo arcilloso.

Estrato	Espesor (m)	Textura	(%)	(%)	Da (g cm ⁻³)	K _{Estimada} (m día ⁻¹)	n (adimensional)
E1	0.49	Franca	37.25	57.51	1.22	0.2160	0.2026
E2	0.41	Franca-arcillosa	31.87	46.76	1.46	0.3161	0.1489

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 2. Características físicas del suelo arenoso.

Estrato	Espesor (m)	Textura	(%)	(%)	Da (g cm ⁻³)	K _{Estimada} (m día ⁻¹)	n (adimensional)
E1	0.91	arenosa	8.45	16.43	1.54	3.1865	0.0798

Fuente: Elaboración propia.

Modelo de Boussinesq unidimensional

El descenso del flujo subterráneo hacia los drenes se simuló mediante la ecuación unidimensional de Boussinesq, en su forma linealizada para condiciones transitorias (Boussinesq, 1904; Bear, 1972). Este modelo describe la dinámica del agua en medios porosos saturados, simplificando la influencia de la zona no saturada a través del parámetro de porosidad efectiva (Bouwer, 1978; Kirkham & Powers, 1972). En condiciones de recarga vertical uniforme y simetría respecto al plano medio entre drenes, la ecuación diferencial se expresa como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{n} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right) \right) - \frac{K}{nL} (h - h_d) \quad (1)$$

Donde $h(x, t)$ es la carga hidráulica (m), K conductividad hidráulica (m/d), n porosidad efectiva (adimensional), r es la coordenada radial desde el dren (m), L es el espaciamiento entre drenes (m), h_d es la carga hidráulica considerando el diámetro del dren (m) y t tiempo (d).

Este planteamiento ha servido de base para numerosos desarrollos teóricos y numéricos en el diseño y evaluación de sistemas de drenaje agrícola (Hooghoudt, 1940; Ernst, 1962; Skaggs, 1999),

así como para la validación de modelos físico-matemáticos en condiciones de campo y laboratorio (Ayars & Evans, 2015; Oosterbaan, 2019).

Discretización numérica

La ecuación diferencial se resolvió mediante el esquema implícito-explicito de Crank-Nicolson, que es de segundo orden en espacio y tiempo, y garantiza estabilidad numérica en problemas de difusión (Smith, 1985; Thomas, 1995).

$$\frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{K}{2n} \left[\frac{h_{i+1,j}^{n+1} - 2h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{h_{i+1,j}^n - 2h_{i,j}^n + h_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} \right] + \frac{K}{2n} \left[\frac{1}{r_j} \frac{h_{i,j+1}^{n+1} - h_{i,j-1}^{n+1}}{2 \Delta r} + \frac{h_{i,j+1}^{n+1} - 2h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_j} \frac{h_{i,j+1}^n - h_{i,j-1}^n}{2 \Delta r} + \frac{h_{i,j+1}^n - 2h_{i,j}^n + h_{i,j-1}^n}{\Delta r^2} \right] - \frac{K}{nL} \left(\frac{h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j}^n}{2} \right) + \frac{K}{nL} h_d \quad (2)$$

La ecuación de Boussinesq discretizada en una malla (i,j) se puede expresar en forma matricial como un sistema de ecuaciones lineales:

$$Ah^{n+1} = Bh^n + d \quad (3)$$

Donde h^{n+1} es el vector de cargas en el nuevo tiempo $n+1$, h^n es el vector de alturas en el tiempo actual n , A es la matriz de coeficientes del sistema implícito, B es la matriz de coeficientes del sistema explícito y d es un vector de términos independientes.

Condiciones iniciales y de frontera

Como condición inicial se estableció una carga hidráulica uniforme en todo el dominio, , donde corresponde a la carga inicial medida experimentalmente. Asimismo, se aplicaron condiciones de frontera tipo Dirichlet, imponiendo carga hidráulica nula en los extremos , lo cual representa el efecto de drenes ubicados en los bordes del dominio.

Evaluación del modelo matemático

La representatividad de la carga (h) y del caudal estimado con los modelos matemáticos se evaluaron mediante la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), la correlación producto-momento de Pearson (Coeficiente de Determinación) (R^2), y Eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe (NSE).

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \hat{h}_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{100}{\bar{h}_i} \quad (4)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h_i}) (\hat{h_i} - \bar{\hat{h_i}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h_i})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{h_i} - \bar{\hat{h_i}})^2}} \right]^2 \quad (5)$$

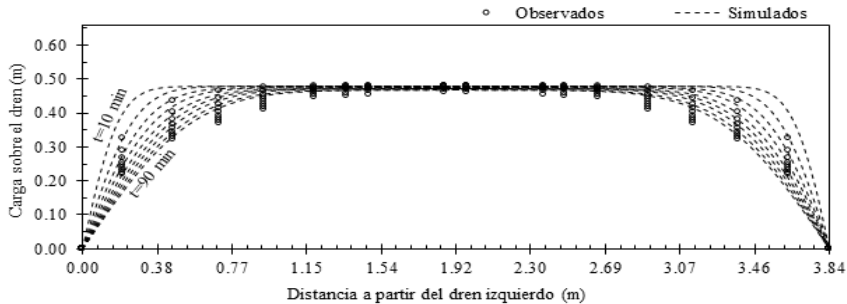
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \hat{h_i})^2}{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h_i})^2} \quad (6)$$

donde $\hat{h_i}$ es la carga simulada (m), h_i es la carga observada (m), $\bar{h_i}$ es el promedio de datos observados, $\bar{\hat{h_i}}$ es el promedio de datos simulados y N es el número de datos de entrada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

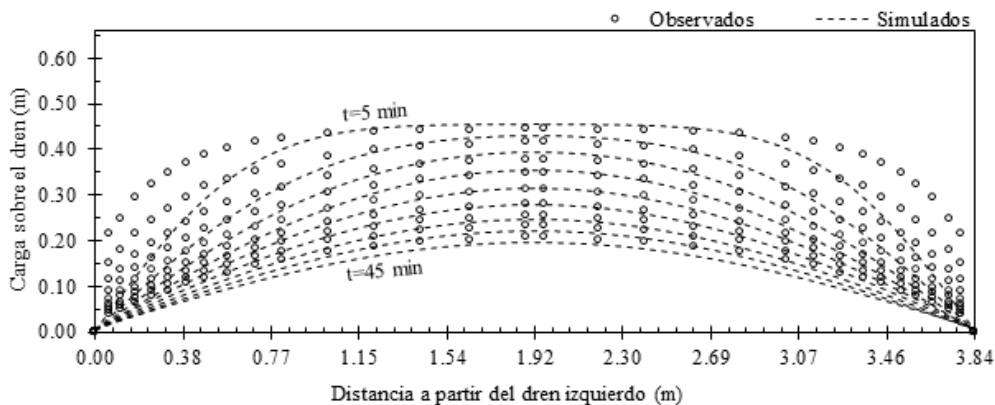
En el experimento con suelo arcilloso estratificado, la evaluación del modelo de Boussinesq en régimen transitorio evidenció un ajuste sobresaliente con los datos experimentales observados en un periodo de 90 minutos (Figura 4). El valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) fue de 0.037 m, indicando una diferencia mínima entre los niveles freáticos simulados y los medidos. El coeficiente de correlación (R^2) alcanzó 0.982, lo que refleja una correspondencia casi perfecta entre valores observados y estimados. Por su parte, el coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) fue de 0.94, confirmando la alta capacidad del modelo para reproducir la dinámica de descenso de la carga hidráulica en condiciones de baja conductividad hidráulica. Estos resultados demuestran que la ecuación de Boussinesq constituye una herramienta confiable para describir el comportamiento del drenaje en suelos arcillosos, donde el flujo subterráneo es lento y la respuesta del sistema está dominada por la capacidad de almacenamiento.

Figura 4. Comparación entre la carga hidráulica simulada con la ecuación unidimensional de Boussinesq y la observada experimentalmente en el suelo arcilloso, para un tiempo de $t = 90$ minutos.



En el experimento con suelo arenoso homogéneo (Huactzingo, Tlaxcala, 2025), la evaluación del modelo de Boussinesq mostró un ajuste aceptable, aunque con menor precisión que en el suelo arcilloso (Figura 5). El valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) fue de 0.060 m, lo que indica una mayor dispersión entre los niveles freáticos simulados y los observados. El coeficiente de correlación (r) alcanzó 0.94, lo que refleja una relación fuerte pero no tan estrecha como en el suelo arcilloso. El coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) fue de 0.74, lo que sugiere una capacidad predictiva moderada del modelo. Estos resultados confirman que, en suelos de textura ligera con alta permeabilidad, la ecuación de Boussinesq tiende a subestimar o sobrestimar transiciones rápidas del nivel freático, siendo más sensible a la parametrización de la porosidad efectiva y la conductividad hidráulica.

Figura 5. Comparación entre la carga hidráulica simulada con la ecuación unidimensional de Boussinesq y la observada experimentalmente en el suelo arenoso, para un tiempo de $t = 45$ minutos.



La comparación de los dos experimentos revela diferencias importantes en el desempeño del modelo de Boussinesq según la textura del suelo. En el suelo arcilloso estratificado, los indicadores estadísticos evidencian una capacidad predictiva sobresaliente ($RMSE = 0.037$ m; $R^2 = 0.982$; $NSE = 0.94$), lo que confirma la aplicabilidad del modelo en medios de baja conductividad hidráulica y elevada capacidad de almacenamiento. Este comportamiento coincide con lo reportado por Zavala et al. (2012) y Darzi-Naftchally et al. (2014), quienes observaron que la ecuación reproduce adecuadamente la dinámica del nivel freático en suelos finos con respuesta lenta.

Por el contrario, en el suelo arenoso homogéneo, aunque se alcanzó un ajuste aceptable ($RMSE = 0.060$ m; $R^2 = 0.943$; $NSE = 0.74$), el modelo mostró menor precisión, reflejando las limitaciones de la formulación linealizada para capturar los descensos rápidos del nivel freático en medios de alta permeabilidad. Estudios previos señalan que, en suelos ligeros, la parametrización de la porosidad drenable y el coeficiente de almacenamiento es crítica para mejorar la simulación (Fuentes et al., 2009; Chávez et al., 2011). Asimismo, Zimmer et al. (2023) destacan que, en suelos limosos y arenosos, la calibración del parámetro de almacenamiento es determinante para que la ecuación logre reproducir con fidelidad la respuesta de drenaje.

En conjunto, estos resultados sugieren que la ecuación de Boussinesq es más robusta en suelos de textura fina, mientras que en suelos arenosos su desempeño depende fuertemente de la correcta estimación de parámetros hidráulicos, lo cual representa un área de mejora y de futuras investigaciones en el diseño de drenajes agrícolas en contextos de textura ligera.

CONCLUSIONES

La ecuación de Boussinesq es más confiable en suelos de textura fina, mientras que en suelos ligeros requiere una calibración más detallada de parámetros hidráulicos para mejorar su aplicabilidad. La investigación aporta evidencia experimental inédita en México sobre el desempeño del modelo bajo condiciones contrastantes de suelo, contribuyendo a la mejora de criterios de diseño parcelario de drenajes agrícolas y a la recuperación de superficies afectadas por anegamiento y salinidad.

LITERATURA CITADA

- Ayars, J. E., & Evans, R. G. (2015). Subsurface drainage – What’s next? *Irrigation and Drainage*, 64(3), 378–392. <https://doi.org/10.1002/ird.1909>
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Elsevier.
- Boussinesq, J. (1904). Recherches théoriques sur l’écoulement des nappes d’eau infiltrées dans le sol. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 10(2), 5–78.
- Bouwer, H. (1978). *Groundwater hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Chávez, C., Fuentes, C., & Aceves, E. (2011). Evaluation of Boussinesq-based models for subsurface drainage. *Agricultural Water Management*, 98(5), 867–875. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.013>
- Darzi-Naftchally, A., Miriatifi, S. M., & Asgari, A. (2014). Comparison of steady- and unsteady-state drainage equations for determination of subsurface drain spacing in paddy fields: A case study in Northern Iran. *Paddy and Water Environment*, 12(1), 103–111. <https://doi.org/10.1007/s10333-013-0361-7>
- Ernst, L. F. (1974). *Drainage principles and applications*. Wageningen: ILRI.
- Ernst, L. F. (1962). Groundwater flow in homogeneous soils. *Journal of Hydrology*, 1(1), 22–29. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(63\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(63)90003-0)
- Fuentes, C., Chávez, C., & Ramos, J. (2009). Laboratory validation of Boussinesq drainage equations. *Irrigation Science*, 27(2), 125–134. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0120-4>
- Guitjens, J. C., & Luthin, J. N. (1965). Drain spacing under unsteady flow conditions. *Transactions of the ASAE*, 8(4), 499–502. <https://doi.org/10.13031/2013.40520>
- Gupta, R. K., Prasad, K., & Singh, H. (1994). Laboratory evaluation of drainable porosity variability in subsurface drainage. *Journal of Hydrology*, 162(1–2), 47–63. <https://doi.org/10.1016/0022->

- Hernández-Facundo, Á., & Prado-Hernández, J. V. (2021, octubre 21–22). Evaluación de ecuación de régimen permanente para el diseño de drenes subterráneos parcelarios. En 10° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Hooghoudt, S. B. (1940). General consideration of the problem of field drainage by parallel drains, ditches, watercourses and channels. Wageningen: ILRI.
- Kirkham, D. (1958). Seepage of steady rainfall through soil into drains. *Transactions of the American Geophysical Union*, 39(5), 892–908. <https://doi.org/10.1029/TR039i005p00892>
- Kirkham, D., & Powers, W. L. (1972). *Advanced soil physics*. New York: Wiley-Interscience.
- Mehdinejadi, B., Naseri, A. A., Jafari, H., Ghanbarzadeh, A., & Baleanu, D. (2013). A mathematical model for simulation of a water table profile between two parallel subsurface drains using fractional derivatives. *Computers & Mathematics with Applications*, 66(5), 785–794. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2013.05.020>
- Mishra, G. C., & Singh, V. (2007). A new drain spacing formula. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2), 338–351. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.2.338>
- Namuche-Vargas, J. R., Olvera-Salgado, M. D., Saucedo-Rojas, H. E., Fuentes-Ruiz, C., & Arellano-Monterrosas, J. L. (2020). Desarrollo y evolución del drenaje agrícola en México. *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(4), 1–26. <https://doi.org/10.47808/revistaia.v9i4.142>
- Oosterbaan, R. J. (2019). *Drainage research in agricultural development*. Wageningen: ILRI.
- Oyarce, P., Gurovich, L., & Duarte, V. (2017). Experimental evaluation of agricultural drains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(4), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001150](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001150)
- Ramos, S., Ortiz, C., & López, R. (2015). Influencia de la materia orgánica en las propiedades hidráulicas de Vertisoles. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 135–144.
- Ram, S., & Chauhan, H. S. (1987). Analytical solutions for unsteady subsurface drainage. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 113(2), 202–214. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1987\)113:2\(202\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1987)113:2(202))
- Ritzema, H. P. (2006). *Drainage principles and applications* (2nd ed.). Wageningen: ILRI.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Saxton, K. E., & Willey, P. H. (2005). The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic

- simulation. *Environmental Modelling & Software*, 20(7), 725–740. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.04.005>
- Skaggs, R. W. (1991). Modeling subsurface drainage. *Agricultural Water Management*, 19(3), 227–242. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(91\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0378-3774(91)90033-4)
- Skaggs, R. W., & van Schilfgaarde, J. (1999). *Agricultural drainage*. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA.
- Smith, G. D. (1985). *Numerical solution of partial differential equations: Finite difference methods*. Oxford: Clarendon Press.
- Thomas, J. W. (1995). *Numerical partial differential equations: Finite difference methods*. New York: Springer.
- Trejo, E., & Saucedo-Rojas, J. (2022). Aplicación de la ecuación de Boussinesq en drenaje agrícola: validación de campo en México. *Revista Mexicana de Ingeniería Agrícola*, 8(1), 23–34.
- Tzimopoulos, C. D., & Terzidis, A. (1975). Drain spacing by unsteady-state theory. *Journal of Hydrology*, 27(1–2), 101–110. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(75\)90101-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(75)90101-9)
- Zavala, M., Saucedo, H., Bautista, C., & Fuentes, C. (2012). Análisis de ecuaciones de drenaje subterráneo en condiciones experimentales. *Revista Mexicana de Ingeniería Agrícola*, 6(2), 45–54.
- Zimmer, D., Henine, H., & Jeantet, L. (2023). Integrated subsurface drainage theory from Boussinesq equation validation. *Water Resources Research*, 59(5), e2022WR032251. <https://doi.org/10.1029/2022WR032251>

Capítulo XIII

Marlio Bedoya Cardoso¹, Raquel Salazar Moreno² y
Nadia Brigitte Sanabria Méndez¹

Modelos de caja negra para la predicción de la producción mundial de café (*Coffea arabica*)

RESUMEN

La producción de café (*Coffea*) en Brasil, Vietnam, Colombia e Indonesia tiene gran importancia ya que puede afectar la cotización de este producto en el mercado mundial. En este trabajo, se desarrollaron cinco modelos para simular la producción mundial del café: Redes Neuronales Artificiales (RNA) (estáticas y dinámicas), modelos Autorregresivos Integrados con Media Móvil y variables exógenas (ARIMAX), y los modelos híbridos con RNA estáticas (RNAs-ARIMAX), y dinámicas (RNAd-ARIMAX). En todos los modelos se utilizaron como variables de entrada las superficies cultivadas y producción de los cuatro países mencionados. Para evaluar los modelos se utilizaron los resultados estadísticos de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF), el error absoluto medio (MAE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE). Los modelos ARIMAX y las redes neuronales estáticas alcanzaron resultados estadísticos menores, mientras que en los modelos híbridos su poder predictivo fue superior, logrando una EF de 0.94 y 0.97 para los modelos RNAs-ARIMAX y RNAd-ARIMAX respectivamente.

Palabras clave: Redes Neuronales Artificiales (RNA); Modelos ARIMAX; Modelos híbridos; Pronóstico; Café.

ABSTRACT

The production of coffee in Brazil, Vietnam, Colombia, and Indonesia is of great importance since it can affect the price of this product in the world market. In this work, five models were developed to simulate the coffee production in the world: Artificial Neural Networks (ANN) (static and dynamic), Autoregressive models Integrated with Moving Average with exogenous variables (ARIMAX), and hybrid models with static ANN (RNAs -ARIMAX) and dynamic ANN (RNAd-ARIMAX). In all the models, the cultivated areas and production of the four countries mentioned were used as input variables. To evaluate model performance the Nash-Sutcliffe Efficiency (EF), the mean absolute error (MAE) and the mean absolute percentage error (MAPE) were used. The ARIMAX models and the

¹ Universidad Surcolombiana, Programa de Ingeniería Agrícola, Avenida Pastrana Borrero - Carrera 1, Neiva-Huila, Colombia.

² Universidad Autónoma Chapingo, Programa de Mecánica Agrícola, Texcoco de mora, México.

static neural networks had the lowest performance, while in the hybrid models their predictive power was higher, achieving an EF of 0.94 and 0.97 for RNAs-ARIMAX and RNAd-ARIMAX respectively.

Keywords: Artificial neural networks (ANN); ARIMAX Models; Hybrid models; Forecast; Coffee.

INTRODUCCIÓN

La producción de café es una actividad agrícola que tiene un alto impacto en la economía de muchos países de América Latina y requiere de gran cantidad de mano de obra. En Colombia más de 560 mil familias viven directamente de la producción del café y para las actividades de manejo, cosecha y postcosecha ocupan más del 9% de su población activa (Cerquera & Orjuela, 2015). El café hace las mayores contribuciones al producto interno bruto agrícola de América Latina (Laderach, 2011) y es el producto agrícola más importante que se comercializa en el mercado de futuros de Nueva York y Londres (Semei, 2014).

Por otra parte, Brasil, Vietnam, Colombia e Indonesia contribuyeron con más del 69% de la producción mundial para el año cafetalero 2019/20 (ICO, 2022), por lo tanto, lo que suceda con la producción del aromático en estos cuatro países, principalmente Brasil puede afectar su cotización en el mercado.

Debido a lo anterior, el pronóstico de la producción internacional del café es de gran relevancia para las empresas compradoras y comercializadoras de café como Volcafé, Cargill, Aron y Neuman Rothfos. Así como, para los países productores del aromático, con el fin de implementar políticas agrícolas que contrarresten los efectos de la sobreoferta del grano.

El pronóstico de variables económicas, climáticas y productos agrícolas han tomado auge en los últimos años, gracias al empleo de modelos de regresión lineal múltiple (MLR), modelos autorregresivos integrados con medias móviles y variable exógena (ARIMAX), así como el empleo de técnicas de inteligencia artificial como las redes neuronales artificiales (RNA) y los modelos híbridos. Por ejemplo, el internet de las cosas y clasificadores programados de redes neuronales en proyectos de investigación han sido empleados efectivamente en la detección de pestes y enfermedades para mejorar la productividad en la agricultura (Ashokkumar et al., 2019).

Regresión lineal múltiple (MLR) y las redes neuronales artificiales fueron utilizadas para predecir la producción de papa orgánica empleando las propiedades físicas y microbiológicas del suelo, así como técnica de labranza (arado), evidenciando el potencial de estos modelos empleados para la predicción del rendimiento de este cultivo. (Abrougui et al., 2019).

Las redes neuronales hacen parte del aprendizaje automático (machine learning) en el cual se entrena un modelo con un conjunto de datos históricos, parte de ellos se emplea para la fase de pruebas y la otra parte se utiliza para evaluar el desempeño del modelo (Van Klompenburg, 2020).

(Muradkhanli, 2018) utilizó un perceptrón multicapa para predecir la producción de petróleo y encontró un alto porcentaje de precisión comparado con modelos de regresión. Además, (Negash & Yaw, 2020), emplearon modelos RNA para la modelación de la producción de petróleo, gas y

agua en yacimientos. Logrando buenos resultados de predicción en comparación a los métodos tradicionales, incluyendo el modelo numérico de yacimientos, ya que involucra tasas de inyección pasada como factor que incide en la tasa de producción actual.

El resultado de la predicción de productos agrícolas ha sido empleado como herramienta para la toma de decisiones, por ejemplo (Gopinath & Kavithamani, 2019) construyeron un modelo autorregresivo integrado con media móvil y variable explicativa (ARIMAX) para predecir la producción futura de caña de azúcar en india, indicando una disminución gradual hasta el año 2026.

Modelos agrometeorológicos con ayuda de regresión lineal múltiple fueron empleados en la producción de café a nivel regional obteniendo buenos resultados (de Oliveira et al., 2017; Aparecido & Rolim, 2018), por otra parte (Leme, et al., 2019) emplearon modelos de regresión y redes neuronales para construir un sistema de visión por computadora para identificar el grado de torrefacción del café, encontrando que es más difícil su identificación en grano que cuando está molido, recientemente (Kittichotsatsawat et al., 2022) usaron modelos de regresión lineal múltiple y redes neuronales artificiales para predecir la producción de café cereza en Tailandia, encontrando un gran potencial de las redes neuronales para este producto.

Sin embargo, hasta el momento no se han implementado técnicas de inteligencia artificial o modelos híbridos para simular la producción mundial del café. El objetivo de este trabajo es comparar 5 modelos para simular la producción mundial del café empleando técnicas de inteligencia artificial como las Redes Neuronales Artificiales estáticas (RNAs), dinámicas (RNAd), los híbridos RNAs-ARIMAX, RNAd-ARIMAX y modelos ARIMAX, para determinar cuál simula con mayor precisión, considerando como variables de entrada el área cultivada y la producción de café de Brasil, Vietnam, Colombia e Indonesia.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo se construyeron 5 modelos para simular la producción mundial del café; RNA estática, RNA dinámica, ARIMAX y los modelos híbridos RNAs-ARIMAX y RNAd-ARIMAX. Todos los modelos fueron implementados en Matlab ® versión 2022a.

2.1 Adquisición y procesamiento de datos

La información sobre el área cultivada y la producción de café de los cuatro principales productores del mundo fue obtenida de la Organización Internacional del café (ICO, 2022), y de la base de datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura desde el año 1961 (cosecha 1961/1962) hasta el año 2019 (cosecha cafetera 2019/2020) (FAO, 2021).

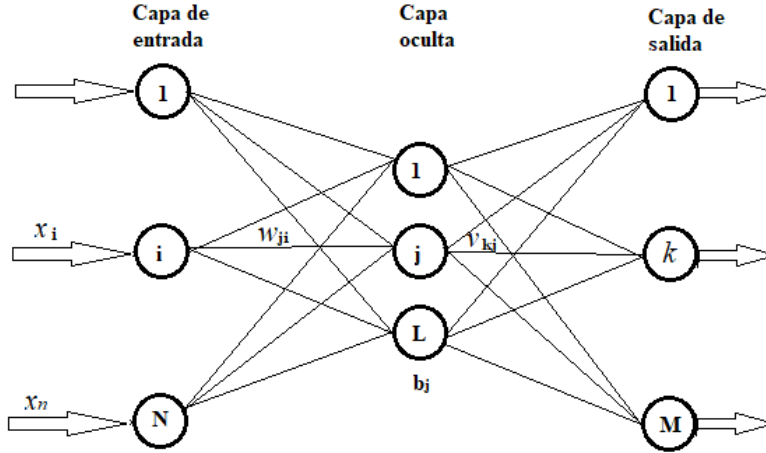
2.2 Redes neuronales estáticas

El perceptrón multicapa de la Figura 1, se compone de N neuronas en la capa de entrada, L neuronas en la capa oculta, y M neuronas en la capa de salida. En esta arquitectura de la red las conexiones son siempre hacia adelante o “Feedforward”. La salida de la capa oculta y la capa de salida se expresan con las ecuaciones (1) y (2).

$$z_j = f_L\{\sum(w_{ji}x_i + b_j)\} \quad (1)$$

$$y_k = f_M\{\sum(v_{kj}z_j + b_k)\} \quad (2)$$

Figura 1. Arquitectura de la red neuronal Perceptrón Multicapa (MLP).



En donde: x_i son las entradas individuales; w_{ji} son los pesos de conexión entre las neuronas de entrada i y las neuronas ocultas j ; b_j es la unidad de sesgo entre la capa de entrada y la capa oculta; f_L representa la función de activación de la capa oculta; v_{kj} pesos entre la capa oculta y la capa de salida; f_M representa la función de activación de la capa de salida; z_j nodos de la capa oculta; b_k es la unidad de sesgo entre la capa oculta y capa de salida; y_k vector de salidas (Yildirim et al., 2011).

Con el fin de que la red neuronal tenga la capacidad de aprender funciones no lineales, se aplica la función activación de la tangente hiperbólica en la capa oculta (Ecuación 3), en la capa de salida generalmente se utiliza una función lineal.

$$f = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (3)$$

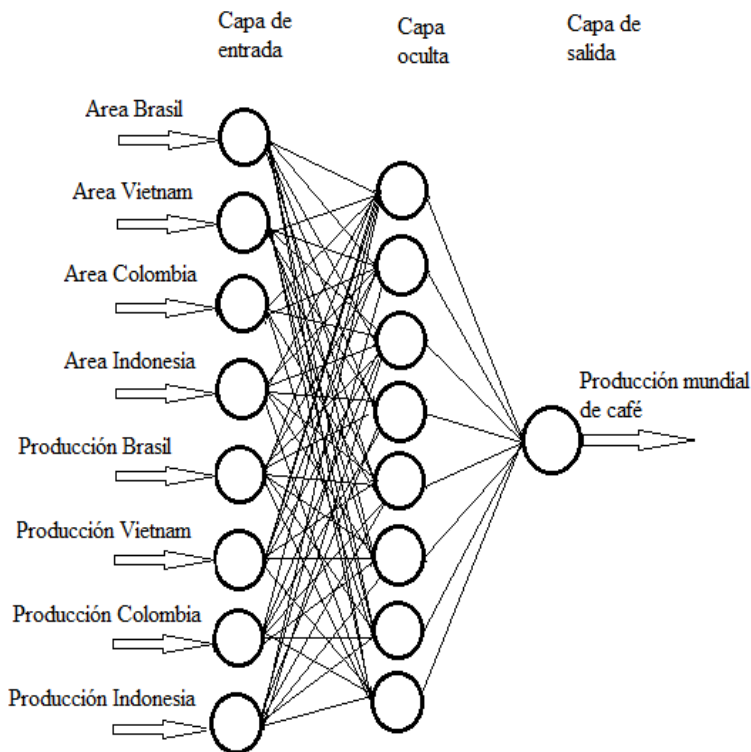
Entre los algoritmos que se emplean como entrenamiento para actualizar los valores de los pesos y sesgos, se encuentran: regularización bayesiana (trainbr); gradiente conjugado escalado (traincg) para problemas con grandes datos y el de Levenberg-Marquardt (trainlm). Este último algoritmo de retropropagación es rápido y recomendable como un algoritmo supervisado con el inconveniente de requerir más memoria en comparación con otros algoritmos (Mathworks, 2020).

La función de aprendizaje de pesos y sesgos en las RNA es el gradiente descendente con impulso (learnngdm).

La red neuronal estática que se implementó fue el perceptrón multicapa de la Figura 2. En esta arquitectura de la red las conexiones son siempre hacia adelante o “Feedforward”. Las redes neuronales artificiales son modelos de caja negra empleados para modelar procesos altamente no lineales entre las variables. Generalmente se componen de 3 capas, la capa de entrada, la capa oculta y la capa de salida. La capa de entrada es la que recibe la información y la transfiere a la capa oculta a través de conexiones y de funciones de transferencia, y esta información es enviada a la capa de salida. (Babu & Reddy, 2014) indican que las redes neuronales artificiales con 3 capas son ampliamente utilizadas en la predicción de series de tiempo.

La información total (1961-2019) se dividió en dos partes: 86% para los procesos de validación cruzada (entrenamiento (50%), validación (25%) y prueba (25%)) y 14% restante para el proceso de evaluación del modelo. Se seleccionó el algoritmo de entrenamiento Levenberg-Marquardt (trainlm) y el algoritmo de aprendizaje del gradiente descendente con impulso y la función de transferencia de la tangente hiperbólica. La función de Matlab empleada en la red estática fue “newff”

Figura 2. Arquitectura de la RNA estática: Perceptrón Multicapa (MLP).



Para determinar el número óptimo de neuronas en la capa oculta se cambió el número de neuronas de acuerdo con los criterios $h = 2n + 1$ propuesto por (Kolmogorov, 1957), y $h = \sqrt{n * m}$; propuesto por (Masters, 1993), donde h es el número de neuronas en la capa oculta, n es el número de variables de entrada y m es el número de salidas.

Base en los criterios anteriores se realizaron 100 simulaciones desde 3 hasta 17 neuronas en la capa oculta, y se seleccionó el número de neuronas con el que se obtuvo el mejor resultado estadístico. Posteriormente, con este número de neuronas se llevaron a cabo 1000 simulaciones a fin de establecer el modelo de RNA con la mayor eficiencia. La fase de evaluación y simulación del modelo se realizó con el 14% restante de la información.

2.3 Red neuronal dinámica

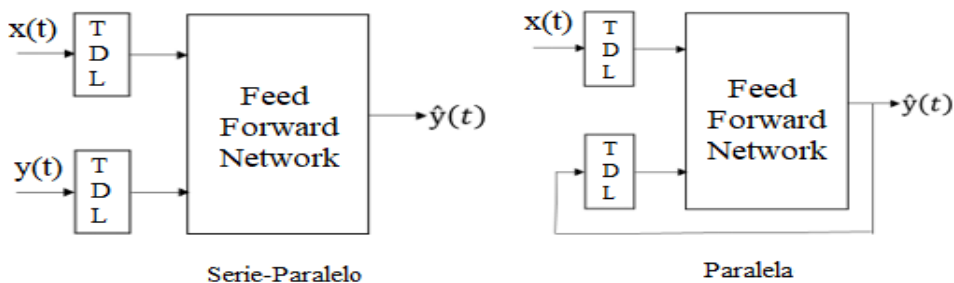
Un tipo especial de las RNA dinámicas es la denominada red Autorregresiva No Lineal con entradas exógenas (NARX). El modelo NARX es utilizado para modelar sistemas no lineales y series de tiempo. (Boussaada, et al., 2018) afirman que el aprendizaje es más efectivo en las redes NARX que en otras redes neuronales y la convergencia es más rápida. Las dos arquitecturas del modelo NARX son la arquitectura en serie-paralelo (circuito abierto) y la arquitectura paralela (circuito cerrado) mostradas en las ecuaciones (4) y (5)

$$\hat{y}(t+1) = F \left(\begin{matrix} y(t), y(t+1), \dots, y(t-n_y), x(t+1), \\ x(t), x(t-1), \dots, x(t-n_x) \end{matrix} \right) \quad (4)$$

$$\hat{y}(t+1) = F \left(\begin{matrix} \hat{y}(t), \hat{y}(t+1), \dots, \hat{y}(t-n_y), x(t+1), \\ x(t), x(t-1), \dots, x(t-n_x) \end{matrix} \right) \quad (5)$$

En las dos arquitecturas, el valor futuro de la serie de tiempo $\hat{y}(t)$ se predice usando valores presentes y pasados de la entrada exógena x , pero la arquitectura de serie-paralelo usa los valores pasados verdaderos de la serie de tiempo $y(t)$, mientras que la arquitectura (ciclo cerrado) utiliza los valores previos anteriores de la serie de tiempo $\hat{y}(t)$. Los modelos NARX se muestran en la Figura 3, donde la línea de retardo (Tapped Delay Line; TDL) representa las variables con retrasos en el tiempo y $x(t)$ son las entradas externas exógenas.

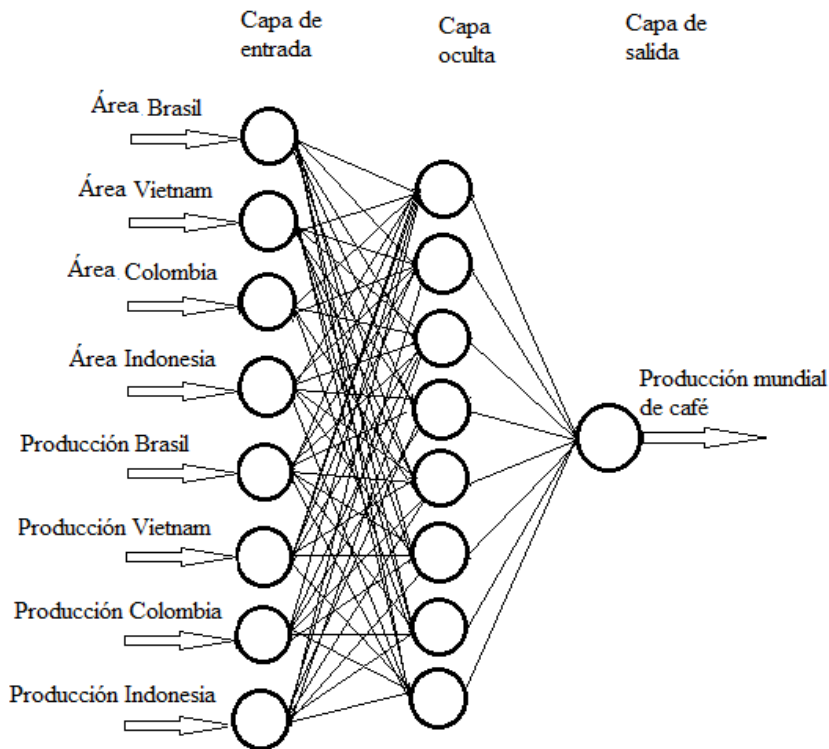
Figura 3. Arquitecturas de la red neuronal NARX



La arquitectura de serie paralelo es más precisa para el entrenamiento porque utiliza el valor real de la serie de tiempo que convierte la red neuronal en una red alimentada hacia adelante con algoritmos de entrenamiento para redes de perceptrón multicapa (MLP) (Robles-Rodriguez & Dochain, 2018; Mathworks, 2020).

La RNA dinámica implementada en este trabajo fue la red dinámica recurrente denominada red autoregresiva no lineal con entradas externas por sus siglas en inglés: nonlinear autoregressive network with exogenous inputs (NARX) (Figura 4).

Figura 4. Arquitectura de la red neuronal NARX



Se utilizó el mismo procedimiento que en el caso de la red estática para determinar el número óptimo de neuronas en la capa oculta y los mismos algoritmos de entrenamiento y aprendizaje.

2.4 Modelos ARIMAX

Con los modelos Autorregresivos Integrados con Medias Móviles (ARIMA) no se tiene interés en construir modelos uniecuacionales o de ecuación simultánea, sino analizar las propiedades probabilísticas de la serie de tiempo, estos modelos son una sentencia algebraica que muestra como una variable de una serie de tiempo está relacionada con su propio pasado (Gujarati & Porter, 2010; Pankratz, 2009). Desde sus inicios los modelos ARIMA han sido ampliamente usados en diferentes

campos del conocimiento, en especial en economía; sin embargo, los modelos Autorregresivos Integrados con Medias Móviles y variable exógena (ARIMAX) han tenido más éxito por lograr mayor precisión.

Por otra parte, los modelos ARIMA y ARIMAX han sido empleados por (Anggraeni, 2015), para planificar y preparar las materias primas y el número de trabajadores a contratar, basados en la predicción de ventas de una empresa de ropa para niños musulmanes basadas en la demanda cuando se aproxima la fiesta Eid. Asimismo (Anggraeni, 2017), utilizaron estos modelos para predecir el número de pacientes con tuberculosis en la región Malag en el oriente de Java basada en valores pasados. (Chiu, et al., 2019) implementaron estos modelos para realizar la aplicación de pesticidas en invernadero basado en la predicción del posible aumento de la mosca blanca. Recientemente (Ray & Bhattacharyya, 2020) Emplearon modelos ARIMA, ARIMAX y otros modelos para analizar la tendencia de los principales cereales alimenticios en la India, encontrando que serían una buena herramienta para la formulación de políticas públicas relacionadas con escenarios futuros de seguridad alimentaria.

Los modelos ARIMAX siguen los mismos pasos de los modelos ARIMA, los cuales son: construcción de parámetros, pruebas de significancia de los parámetros, prueba de diagnóstico, selección del mejor modelo y predicción usando ARIMAX (Wongsathan & Chankham, 2016). Un modelo ARIMAX se puede explicar en la ecuación (6)

$$(\Delta)^d y_t = \alpha + \sum_{i=1}^p \beta_i y_{t-i} + \sum_{k=1}^d \gamma_k X_t + \sum_{j=1}^q \delta_j e_{t-j} \quad (6)$$

En donde: y_t es la variable por predecir en función del tiempo; α es una constante; β_1 es el parámetro autorregresivo de su valor pasado ($t - 1$); γ_k es un parámetro multiplicado por (X_t) variable externa; δ_1 es un parámetro multiplicado por un promedio móvil de los términos de error presente y pasado. p, d, q denotan el retardo de tiempo máximo relacionado con las secuencias de entrada, secuencias de dependencia y residuos respectivamente. Este modelo asume que la secuencia de errores e_t tiene ruido blanco y sigue la distribución gaussiana (Wongsathan & Chankham, 2016), por lo tanto, la varianza de estos errores es también un parámetro del modelo (Babu & Reddy, 2014).

2.5 Pruebas de estacionaridad de los datos

La prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF) se implementó para determinar la estacionaridad a las series de tiempo recolectadas, si la serie es no estacionaria se realizan primeras diferencias y posteriormente se repite la ADF; de esta forma se elimina la posibilidad de realizar correlaciones espurias.

La estimación de parámetros de las series de tiempo empleadas para la construcción del modelo ARIMAX se determinó a partir de las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF). Posteriormente, se realizó la prueba Q de Ljung-Box (LBQ) y de Engle (ARCH) a

los residuales del modelo para verificar la autocorrelación y la no heterocedasticidad condicional. Para utilizar los modelos ARIMAX es necesario realizar este procedimiento a las variables exógenas y emplear diferentes parámetros del modelo usando 1000 simulaciones Montecarlo.

2.6 Modelos Híbridos

Los modelos híbridos son una combinación de diferentes modelos que capturan comportamientos lineales y no lineales. (Wongsathan & Chankham, 2016) implementaron en Tailandia los modelos híbridos ARIMAX-RNA para pronosticar la contaminación el material particulado de hasta 10 micrómetros o PM_{10} . (Anggraeni, 2019) también empleó modelos híbridos RNA-ARIMAX para pronosticar el precio del arroz y ser utilizado como herramienta en la toma de decisiones por parte del gobierno de Indonesia. Finalmente, (Pannakkong, 2019) aplicó los modelos híbridos ARIMA-RNA para predecir la exportación de almidón de yuca en Tailandia alcanzando resultados estadísticos MAE de 2893 y MAPE de 3.84%.

Actualmente, los modelos híbridos han logrado excelentes resultados estadísticos, en simulación y predicción de fenómenos de estudio en diferentes áreas del conocimiento, convirtiéndose en una valiosa herramienta para la toma de decisiones. En el presente trabajo, los modelos híbridos son una combinación de modelos de RNA con modelos ARIMAX (RNA-ARIMAX), utilizando redes estáticas (RNAs-ARIMAX), y dinámicas (RNAs-ARIMAX).

Este tipo de modelos asume que la serie de tiempo está compuesta por una estructura no lineal y otra lineal más un error, por lo tanto, primero se realiza la predicción de la variable de estudio, posteriormente, los residuales de la serie de tiempo se tratarán como un modelo lineal, finalmente, los resultados son sumados como se representa en la Ecuación 7.

$$Y_t = Nl_t + L_t + e_t \quad (7)$$

Donde: Nl_t es la componente no-lineal, L_t es el componente lineal de la serie de tiempo y e_t son los residuales en el tiempo.

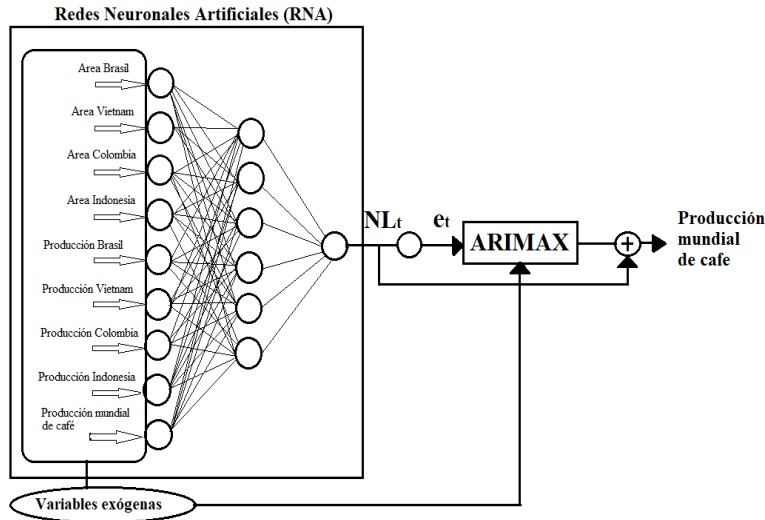
Los modelos híbridos fueron contruidos con un componente no lineal y otro con una estructura de autocorrelación lineal; el componente no lineal fue una RNA, los residuales se trataron como un modelo lineal realizando la prueba de estacionaridad para construir el modelo ARIMAX con las 8 variables de entrada, de esta forma se construyeron los modelos híbridos: RNAs-ARIMAX y RNAd-ARIMAX cuya estructura se muestra en la Figura 5. En donde: Nl_t describe el componente no lineal; e_t son los errores entre los valores predichos y reales.

2.7 Evaluación de los métodos de predicción

El desempeño de un modelo se mide comparando los valores de la salida del modelo con la salida deseada a través de medidas estadísticas de la bondad de ajuste. En este trabajo se utilizan los estadísticos sugeridos por (Wallach et al., 2014) expresados en las Ecuaciones (8), (9) y el error

porcentual absoluto medio (MAPE) sugerido por (Anggraeni, 2019), que expresa la exactitud de la predicción como un porcentaje Ecuación (10).

Figura 5. Estructura del modelo RNA-ARIMAX



$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (9)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (10)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con respecto a la red neuronal estática (RNAs) el mejor resultado en la simulación de la producción mundial del café desde el 2012 hasta el año 2019 se alcanzó con 8 neuronas en la capa oculta. Por otro lado, la red neuronal dinámica (RNAd) logra su mejor resultado estadístico con 6 neuronas en la capa oculta. Comparando los dos modelos RNA (dinámica y estática), el mejor resultado en la parte de simulación del modelo de la producción mundial de café fue la RNAd como se aprecia en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Resultados de la validación cruzada y simulación con redes neuronales (RNA)

Criterio estadístico	Validación cruzada 1961-2011		Simulación 2012-2019	
	RNAs	RNAd	RNAs	RNAd
EF	0.95	0.95	0.87	0.90
MAE (Gg)	218	218	112	102
MAPE	4.05	3.84	1.21	1.08

Fuente: Elaboración propia.

Gg: Gigagramos

Resultados similares fueron reportados por (Mitrea et al., 2009; Sundermeyer, 2013) quienes usaron los mismos tipos de redes empleadas en este trabajo, encontrando que la red dinámica (RNAd) superó a la red estática, en términos de precisión. Finalmente, los dos modelos neuronales lograron alta precisión en las predicciones basados en el criterio MAPE, ya que su valor fue inferior al 10%.

3.1 Pruebas de estacionaridad de las series

Debido a que los resultados de la prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADT) con un nivel de significancia de 95% muestran la no estacionaridad de las variables de entrada, fue necesario realizar primeras diferencias como se muestra en el Cuadro 2. Después de realizar las primeras diferencias a las series de tiempo, estas se vuelven estacionarias con $\alpha = 0.05$, de igual forma, se aprecia que todos los coeficientes de autocorrelación son cero en los modelos ARIMA, por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula (H_0) que indica que los residuales tienen ruido blanco, con un nivel de significancia del 95%, basado en las pruebas Q Ljung-Box, y no existe heterocedasticidad condicional Engles (ARCH).

Cuadro 2. Prueba de estacionaridad en las variables

Datos	Datos Originales		Datos en primeras diferencias					
	ADT		ADT		Q Ljung-Box		Engles (ARCH)	
	Valor p	ARIMA	Valor p	estadístico	Valor p	estadístico	Valor p	Estadístico
P.M.C.	0.906	(2-1-1)	0.001	-14.16	0.23	24.35	0.32	0.98
P.C. Brasil	0.448	(1-1-2)	0.001	-16.89	0.16	26.03	0.49	0.49
P.C. Vietnam	0.999	(2-1-3)	0.001	-6.56	0.73	15.73	0.01	6.29
P.C. Colombia	0.635	(1-1-1)	0.001	-9.39	0.51	19.21	0.76	0.10
P.C. Indonesia	0.995	(1-1-0)	0.001	-6.68	0.78	14.87	0.59	0.30
A.C.C. Brasil	0.045	(1-1-0)	0.001	-8.1	0.41	20.79	0.01	7.73
A.C.C. Vietnam	0.995	(2-1-3)	0.001	-5.37	1.00	3.32	0.54	0.38
A.C.C. Colombia	0.52	(2-1-2)	0.001	-7.16	0.23	24.38	0.35	0.87
A.C.C. Indonesia	0.98	(1-1-0)	0.001	-5.71	1.00	6.10	0.90	0.02

P.M.C.: Producción mundial de café, P.C.: Producción de café, A.C.C.: área cosechada de café

Los 4 mejores modelos ARIMAX que se construyeron y validaron están en el Cuadro 3, teniendo en cuenta los estadísticos de bondad de ajuste mencionados previamente. Aunque el mejor resultado estadístico de los modelos ARIMAX fue el (2-1-1), todos los modelos realizan predicciones de la producción mundial del café con una alta precisión basado en el estadístico MAPE, inferiores al 10%. Sin embargo, los modelos RNA (estáticos y dinámicos) tuvieron un mejor resultado estadístico en la predicción de la producción mundial del café frente a los modelos ARIMAX.

Cuadro 3. Mejores modelos ARIMAX para simular la producción mundial de café

Modelo	EF	MAE (Gg)	MAPE
ARIMAX (1-1-1)	0.57	221	2.34
ARIMAX (1-1-2)	0.56	226	2.34
ARIMAX (2-1-1)	0.85	142	1.48
ARIMAX (2-1-2)	0.54	187	2.03

Fuente: Elaboración propia

Realizando un análisis a los residuales con la prueba de ADT, se determina la estacionaridad de los datos por no existir raíz unitaria con $\alpha = 0.05$ por otra parte, los residuales se distribuyen de forma independiente, no se rechaza la hipótesis nula (H_0) con un nivel de significancia del 95% según la prueba Q Ljung-Box, (Cuadro 4); por lo tanto, los residuales pueden ser empleados para realizar los modelos híbridos sin necesidad de obtener las primeras diferencias.

Cuadro 4. Análisis de los residuales

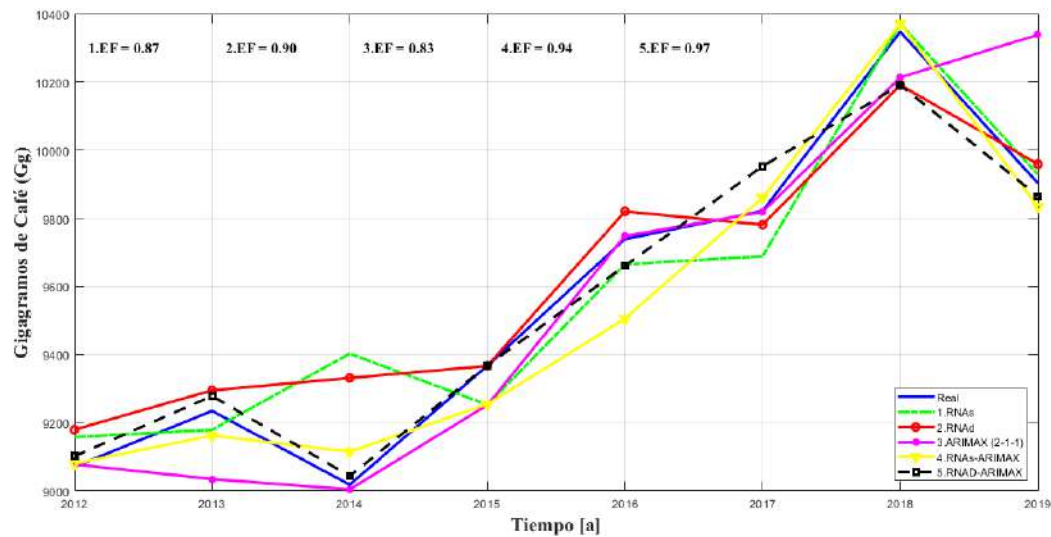
Pruebas	Criterios	RNAs-ARIMAX	RNAd-ARIMAX
ADT	Valor-p	0.001	0.001
	Estadístico	-5.94	-6.10
	Valor crítico	-1.95	-1.95
Q Ljung-Box	Valor-p	0.15	0.87
	estadístico	26.28	13.13
	Valor crítico	31.41	31.41
Engles (ARCH)	Valor-p	0.45	0.0042
	estadístico	0.56	8.18
	Valor crítico	3.84	3.84

En la Figura 6, se comparan los 5 modelos implementados y se aprecia que los resultados logrados con los modelos híbridos (RNA-ARIMAX) tienen un poder predictor superior en la predicción de la producción mundial del café basado el estadístico de eficiencia, en comparación con los resultados alcanzados con los modelos ANN (estáticos y dinámicos) y ARIMAX por separado.

Resultados similares fueron obtenidos por (Wongsathan & Chankham, 2016; Anggraeni, 2019), en los cuales el mejor rendimiento de las predicciones fue alcanzado con modelos híbridos. En la Tabla 5 se presentan los resultados alcanzados con los diferentes modelos empleados los

cuales simulan la producción internacional del café con alta precisión, pues todos obtuvieron valores inferiores al 10% en el estadístico de MAPE.

Figura 6 Simulación de la producción mundial del café con los cinco modelos implementados



Cuadro 5. Desempeño modelos para simular la producción mundial de café

Modelo	EF	MAE (Gg)	MAPE
RNAs	0.87	112	1.12
RNAd	0.90	102	1.08
ARIMAX (2,1,1)	0.83	115	1.18
RNAs-ARIMAX	0.94	82	0.86
RNAd-ARIMAX	0.97	63	0.64

CONCLUSIONES

Los modelos de caja negra empleados en el presente trabajo realizan pronósticos de alta precisión para estimar el comportamiento de la producción mundial del café y pueden ser usadas como una herramienta fundamental en la toma de decisiones.

A pesar de que las redes neuronales artificiales una vez entrenadas tienen excelentes resultados como modelos predictivos, no hacen la distinción entre patrones lineales y no lineales, por esta razón, los modelos híbridos RNA-ARIMAX lograron mayor precisión basado en los resultados estadísticos para simular la producción mundial del café entre los años 2012 (cosecha 2012/2013) y 2019 (cosecha 2019/2020), en comparación con los modelos RNA y ARIMAX por separado. Para posteriores investigaciones se sugiere emplear variables que permita relacionar los efectos que tienen las variables climáticas y la deficiencia hídrica del suelo sobre la producción del café.

AGRADECIMIENTO

A la Organización Internacional del Café (ICO), por facilitar información relevante para el desarrollo de este trabajo, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Universidad Surcolombiana por sus aportes económicos.

LITERATURA CITADA

- Abrougui, K., Gabssi, K., Mercatoris, B., Khemis, C., Amami, R., & Chehaibi, S. (2019). Prediction of organic potato yield using tillage systems and soil properties by artificial neural network (ANN) and multiple linear regressions (MLR). *Soil and Tillage Research*, 190, 202-208. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.011>
- Anggraeni, W., Vinarti, R. A., & Kurniawati, Y. D. (2015). Performance Comparisons between Arima and Arimax Method in Moslem Kids Clothes Demand Forecasting: Case Study. *Procedia Computer Science*, 72, 630–637. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.172>
- Anggraeni, W., Pusparinda, N., Riksakomara, E., Samopa, F., & Pujiadi, P. (2017). The Performance of ARIMAX Method in Forecasting Number of Tuberculosis Patients in Malang Regency, Indonesia. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(17), 6806-6813.
- Anggraeni, W., Mahananto, F., Sari, A. Q., Zaini, Z., & Andri, K. B. (2019). Forecasting the Price of Indonesia's Rice Using Hybrid Artificial Neural Network and Autoregressive Integrated Moving Average (Hybrid NNs-ARIMAX) with Exogenous Variables. *Procedia Computer Science*, 161, 677-686. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.171>
- Aparecido, L. E. D. O., & Rolim, G. D. S. (2018). Forecasting of the annual yield of Arabic coffee using water deficiency. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(12), 1299-1310. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018001200002>
- Ashokkumar, K., Chowdary, D. D., & Sree, C. D. (2019). Data analysis and prediction on cloud computing for enhancing productivity in agriculture. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 590, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- Babu, C. N., & Reddy, B. E. (2014). A moving-average filter based hybrid ARIMA–ANN model for forecasting time series data. *Applied Soft Computing*, 23, 27-38. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.05.028>
- Boussaada, Z., Curea, O., Remaci, A., Camblong, H., & Mrabet Bellaaj, N. (2018). A Nonlinear Autoregressive Exogenous (NARX) Neural Network Model for the Prediction of the Daily Direct Solar Radiation. *Energies*, 11(3), 620. <https://doi.org/10.3390/en11030620>
- Cerquera, L. O., & Orjuela Y, C. F. (2015). El acompañamiento institucional en el desarrollo del sector cafetero colombiano. *Revista Finanzas y Política Económica*, 7(1), 169-191. <https://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.2015.7.1.9>

- Chiu, L. Y., Rustia, D. J. A., Lu, C. Y., & Lin, T. T. (2019). Modelling and Forecasting of Greenhouse Whitefly Incidence Using Time-Series and ARIMAX Analysis. *IFAC-PapersOnLine*, 52(30), 196-201. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.521>
- FAO. (2021). Food and Agriculture Organization of the united Nations. Data. Crop. [Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>], [Fecha de consulta: diciembre 09 de 2021].
- Gopinath, M., & Kavithamani, M. (2019) Production of Sugarcane Forecasting using ARIMAX Model. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue-12S, <https://doi.org/10.35940/ijitee.I1147.10812s19>
- Gujarati, D., & Porter, D. (2010). *Econometría* (quinta Edición). México: Editorial Mc. Graw Hill. 921p.
- ICO (2022). International Coffee Organization. Historical data on the global Coffee trade. Total Production. [Disponible en: https://www.ico.org/new_historical.asp], [Fecha de consulta: diciembre 09 de 2022].
- de Oliveira A, L. E., de Souza R, G., Camargo L, R. A., de Souza, P. S., & dos Santos, E. R. (2017). Agrometeorological models for forecasting coffee yield. *Agronomy Journal*, 109(1), 249-258. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.03.0166>
- Kittichotsatsawat, Y., Tippayawong, N., & Tippayawong, K. Y. (2022). Prediction of arabica coffee production using artificial neural network and multiple linear regression techniques. *Scientific Reports*, 12(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18635-5>
- Kolmogorov, A. N. (1957). On the representation of continuous functions of many variables by superposition of continuous functions of one variable and addition. In *Doklady Akademii Nauk* (Vol. 114, No. 5, pp. 953-956). Russian Academy of Sciences. <https://doi.org/10.1090/trans2/028/04>
- Laderach, P., Lundy, M., Jarvis, A., Ramirez, J., Portilla, E. P., Schepp, K., & Eitzinger, A. (2011). Predicted impact of climate change on coffee supply chains (pp. 703-723). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14776-0_42
- Leme, D. S., da Silva, S. A., Barbosa, B. H. G., Borém, F. M., & Pereira, R. G. F. A. (2019). Recognition of coffee roasting degree using a computer vision system. *Computers and electronics in agriculture*, 156, 312-317. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.029>
- Masters, T. (1993). *Practical neural network recipes in C++*. Morgan Kaufmann.
- Mathworks. (2020). Design Time Series NARX Feedback Neural Networks. R2020b. Documentation <https://la.mathworks.com/help/deeplearning/ug/design-time-series-narx-feedback-neural-networks.html>
- Mitrea, C. A., Lee, C. K. M., & Wu, Z. (2009). A comparison between neural networks and traditional

- forecasting methods: A case study. *International journal of engineering business management*, 1, 11. <https://doi.org/10.5772/6777>
- Muradkhanli, L. (2018). Neural networks for prediction of oil production. *IFAC-PapersOnLine*, 51(30), 415-417. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.339>
- Negash, B. M., & Yaw, A. D. (2020). Artificial neural network based production forecasting for a hydrocarbon reservoir under water injection. *Petroleum Exploration and Development*, 47(2), 383-392. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(20\)60055-6](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(20)60055-6)
- Pankratz, A. (2009). Forecasting with univariate Box-Jenkins models: Concepts and cases (Vol. 224). John Wiley & Sons. 562p <https://doi.org/10.1002/9780470316566>
- Pannakkong, W., Huynh, V. N., & Sriboonchitta, S. (2019). A Novel Hybrid Autoregressive Integrated Moving Average and Artificial Neural Network Model for Cassava Export Forecasting. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 12(2), 1047-1061. <https://doi.org/10.2991/ijcis.d.190909.001>
- Ray, S., & Bhattacharyya, B. (2020). Statistical modeling and forecasting of arima and arimax models for food grains production and net availability of India. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 8(3), 296-309. [https://doi.org/10.18006/2020.8\(3\).296.309](https://doi.org/10.18006/2020.8(3).296.309)
- Robles-Rodriguez, C. E., & Dochain, D. (2018). Decomposed Threshold ARMAX Models for short-to medium-term wind power forecasting. *IFAC-PapersOnLine*, 51(13), 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.253>
- Semei, C. R., Mauricio, R. G., & Pedro, L. C. A. (2014). Inefficiency in the international coffee market: The case of Colombian arabica. *African Journal of Agricultural Research*, 9(5), 556-561. <https://doi.org/10.5897/ajar11.2228>
- Sundermeyer, M., Oparin, I., Gauvain, J. L., Freiberg, B., Schlüter, R., & Ney, H. (2013). Comparison of feedforward and recurrent neural network language models. In 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (pp. 8430-8434). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icassp.2013.6639310>
- Van Klompenburg, T., Kassahun, A., & Catal, C. (2020). Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105709. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709>
- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., & Brun, F. (2014). Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment. Second Edition. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/c2011-0-06987-9>
- Wongsathan, R., & Chankham, S. (2016). Improvement on PM-10 forecast by using hybrid ARIMAX and Neural Networks Model for the summer season in Chiang Mai. *Procedia Computer Science*, 86, 277-280. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.062>

Yildirim, I., Ozsahin, S., & Akyuz, K. C. (2011). Prediction of the financial return of the paper sector with artificial neural networks. *BioResources*, 6(4), 4076-4091. <https://doi.org/10.15376/biores.6.4.4076-4091>

Capítulo XIV

Angel Kristof De León Sanchez², Jesús Antonio García Martínez¹,
Briseida Salas Benavides² y Miguel Servín Palestina²

Sistema de visión artificial basado en YOLOv8 para la clasificación y medición automática de ajo (*Allium sativum* L.) en postcosecha

RESUMEN

El ajo (*Allium sativum* L.) es un cultivo de alto valor económico cuya clasificación poscosecha continúa realizándose manualmente, lo que limita la eficiencia, genera variabilidad y dificulta garantizar estándares de calidad en el mercado. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue diseñar e implementar un sistema de visión artificial basado en YOLOv8 para la detección, medición y clasificación automática de bulbos de ajo. Se construyó un conjunto de datos de 6000 imágenes bajo condiciones controladas, complementadas con técnicas de *data augmentation*. El modelo fue preentrenado en Roboflow y posteriormente entrenado en YOLOv8 con parámetros de resolución de 640×640 píxeles, 50 épocas y *batch size* de 6. Los resultados evidenciaron un desempeño altamente positivo, alcanzando valores de mAP50 de 99.5% y mAP50-95 entre 93–98.5%, así como un error máximo de ± 0.3 mm en la medición del perímetro de los bulbos. Asimismo, el sistema clasificó los ajos en calibres siguiendo los estándares del CEZAC - INIFAP e incorporó la diferenciación de categorías de semilla (premium, primera, segunda y desgranado). Se concluye que el modelo YOLOv8 constituye una herramienta eficiente y confiable para automatizar procesos de poscosecha de ajo, aunque su validación en escenarios de campo heterogéneos será indispensable para garantizar su aplicación práctica en sistemas comerciales.

Palabras clave: postcosecha, ajo, imágenes, visión artificial, clasificación

ABSTRACT

Garlic (*Allium sativum* L.) is a high-value crop whose postharvest classification is still mostly

¹ Universidad Autónoma de Zacatecas. Avda. Ramón López Velarde, 801. Zacatecas, Zacatecas, México.

² Campo Experimental Zacatecas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, 98500 Calera de Victor Rosales, Km. 24.5 carretera Zacatecas-Fresnillo, México

Correo:angelkristoff45@gmail.com; Antonio.garcia.gama@gmail.com; brissalas40@gmail.com; miguel.servin@hotmail.com

performed manually, which limits efficiency, generates variability, and makes it difficult to ensure consistent quality standards in the market. In this context, the aim of this study was to design and implement a computer vision system based on YOLOv8 for the automatic detection, measurement, and classification of garlic bulbs. A dataset of 6,000 images was built under controlled conditions and expanded using data augmentation techniques. The model was pre-trained in Roboflow and subsequently trained in YOLOv8 with parameters of 640×640-pixel resolution, 50 epochs, and a batch size of 6. Results demonstrated highly positive performance, reaching mAP50 values of 99.5% and mAP50-95 between 93–98.5%, as well as a maximum error of ± 0.3 mm in perimeter measurements of garlic bulbs. Furthermore, the system classified garlic according to size grades following INIFAP Zacatecas standards and incorporated the differentiation of seed quality categories (premium, first, second, and fragmented). It is concluded that YOLOv8 constitutes an efficient and reliable tool for automating garlic postharvest processes, although validation in more heterogeneous field scenarios will be necessary to guarantee its practical application in commercial systems.

Keywords: postharvest, garlic, images, artificial vision, classification

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la visión artificial ha transformado radicalmente los procesos de clasificación agrícola mediante técnicas avanzadas de análisis de imágenes digitales. En el contexto de la postcosecha, herramientas como redes convolucionales (CNN) y modelos de detección de objetos han alcanzado niveles de precisión superiores al 95 % en tareas de clasificación y reconocimiento en cultivos diversos (Anh et al., 2022; Ayalde et al., 2024; Sitanggang et al., 2023). Los algoritmos YOLO son utilizados por su equilibrio entre velocidad y precisión, siendo idóneos para aplicaciones en tiempo real (Ryu et al., 2025). Estos desarrollos evidencian la superioridad de los sistemas de visión artificial frente a los métodos manuales tradicionales, mediante la automatización de procesos de clasificación de productos agrícolas y la optimización de la eficiencia operativa en toda la cadena de valor.

La clasificación manual del ajo en la etapa de postcosecha presenta limitaciones significativas, como su elevada demanda de mano de obra, baja velocidad de procesamiento y inconsistencia en los estándares de calidad del producto. Ante estos desafíos, investigaciones recientes han propuesto enfoques automatizados mediante el uso de Redes Neuronales Convolucionales (CNN), las cuales han demostrado una precisión del 98 % en tareas de clasificación multitiqueta tras el recorte de raíces (Anh et al., 2022). Asimismo, metodologías basadas en imágenes hiperespectrales han alcanzado precisiones superiores al 90 % en la estimación de parámetros relacionados con el tratamiento de fertilizantes (Chung et al., 2024) enhancing the efficient production of crops and optimizing resource utilization have become paramount objectives. Garlic growth and quality are influenced by various factors, with fertilizers playing a pivotal role in shaping both aspects. This study aimed to develop classification models for distinguishing garlic fertilizer application differences by employing statistical and machine learning techniques, such as partial least squares (PLS). Pese a estos avances, ambas estrategias se mantienen en fases experimentales y presentan limitaciones ante la variabilidad morfológica del ajo, condiciones heterogéneas de iluminación y diversidad textural, lo cual restringe su aplicabilidad en entornos productivos reales.

El ajo es un cultivo de gran relevancia económica y nutricional, valorado por sus propiedades organolépticas y beneficios funcionales (Parreño et al., 2023) but its cultivation is challenged by the infertility of commercial cultivars and the accumulation of pathogens over time, which occurs as a consequence of vegetative (clonal. En la etapa de postcosecha, la investigación en visión artificial para su clasificación y evaluación cuantitativa aún es limitada, aunque estudios recientes evidencian el potencial del *deep learning* para optimizar estos procesos. En frutas y hortalizas, las CNN y algoritmos de aprendizaje profundo han mostrado alta precisión en la detección de defectos y clasificación (Ceccarelli et al., 2020; Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018), mientras que el uso de imágenes hiperespectrales ha permitido estimar atributos de calidad de forma no destructiva (Zhou et al., 2019). Además, la evolución de YOLO ha consolidado su capacidad para aplicaciones en tiempo real, destacando su efectividad en la clasificación de productos agrícolas en entornos complejos (Bochkovskiy et al., 2020; Fuentes et al., 2017) and theoretical justification of the result, is required. Some features operate on certain models exclusively and for certain problems exclusively, or only for small-scale datasets; while some features, such as batch-normalization and residual-connections, are applicable to the majority of models, tasks, and datasets. We assume that such universal features include Weighted-Residual-Connections (WRC).

Estos antecedentes demuestran el potencial de adaptar técnicas avanzadas de visión artificial al procesamiento postcosecha del ajo. En este contexto, este estudio propone el desarrollo de un sistema automatizado basado en YOLOv8 para la clasificación y medición precisa del ajo. El objetivo es diseñar una metodología para la identificación y categorización de los dientes mediante procesamiento de imágenes e implementar un módulo de medición automática de dimensiones morfológicas (diámetro, longitud) y de calidad.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Adquisición y preparación del conjunto de datos

El trabajo experimental se realizó en el CEZAC bajo condiciones ambientales controladas. Se construyó un conjunto de datos fotográficos para la detección de ajos enteros (*Allium sativum* L.), desgranados y clasificación de dientes, priorizando variabilidad en ángulos, iluminación y fondos conforme a Everingham et al., (2010). El material biológico fueron 30 bulbos de la variedad Cubano en madurez comercial, de los cuales se capturaron 67 imágenes por bulbo, obteniendo 2,010 imágenes originales. Mediante técnicas de aumento de datos (rotación $\pm 30^\circ$, cambios de brillo/contraste y volteo horizontal/vertical), el conjunto se triplicó hasta 6,030 imágenes.

Configuración del sistema de captura

La adquisición de imágenes se realizó bajo condiciones controladas utilizando: Un entorno con tres paredes blancas para homogenizar el fondo. Dos lámparas LED de 7W (6500K) posicionadas estratégicamente: una en vista superior para minimizar sombras y otra en vista lateral para uniformizar la iluminación. Una cámara digital de 12 megapíxeles (resolución 4000×3000 píxeles), calibrada para balance de blancos automático y enfoque fijo a 30 cm de distancia, tal como se ilustra en la Figura 1.

Etiquetado.

El proceso de etiquetado de imágenes se diseñó en función de los objetivos del estudio, con el fin de garantizar una correcta identificación de las clases de interés. Para este propósito se empleó la técnica de cajas delimitadoras (*bounding boxes*), que consiste en encerrar cada objeto dentro de un rectángulo y asignarle la categoría correspondiente. Este procedimiento se llevó a cabo mediante la plataforma Roboflow, la cual proporciona herramientas en línea que permiten tanto la anotación manual como la generación semiautomática de etiquetas, facilitando la gestión del conjunto de datos. Posteriormente, el dataset fue dividido en tres subconjuntos: entrenamiento (50%), utilizado para que el modelo aprenda a reconocer patrones; validación (30%), empleado durante el entrenamiento para ajustar hiperparámetros y evitar sobreajuste; y testeo (20%), reservado exclusivamente para evaluar el desempeño final del modelo con imágenes que no fueron utilizadas en las fases anteriores, asegurando así una estimación confiable de su capacidad de generalización.

Figura 1 Configuración experimental para la adquisición de imágenes en condiciones controladas.



Las imágenes se almacenaron en formato JPG y se organizaron en carpetas correspondientes a las clases definidas (ajo, ajo_premium, ajo_segundas, ajo_desgranado). Posteriormente, se implementaron técnicas de aumento de datos (*data augmentation*) con el propósito de incrementar la variabilidad del conjunto y mejorar la capacidad de generalización del modelo.

La estrategia de etiquetado y ampliación sintética de datos buscó optimizar la representatividad del conjunto empleado en el entrenamiento del modelo YOLOv8, asegurando mayor diversidad en ángulos de captura, escalas y condiciones de apariencia de los objetos, aspectos esenciales para un desempeño robusto en tareas de detección y clasificación en la etapa de postcosecha.

Entrenamiento del modelo

El proceso de entrenamiento se inició con la verificación preliminar de la calidad del conjunto de datos en la plataforma Roboflow, la cual se utilizó únicamente como recurso de preentrenamiento para comprobar la correcta asignación de etiquetas y la coherencia del dataset. A partir de este procedimiento, se generaron dos archivos de salida: un modelo preentrenado en formato .pt, empleado como punto de partida para reducir los tiempos de ajuste en CPU o GPU, y un archivo .yaml que describió la estructura del conjunto de datos.

El entrenamiento principal se llevó a cabo con la arquitectura YOLOv8 (Ultralytics, 2023), reconocida por su desempeño en tareas de detección y clasificación en visión artificial. Para este fin, se utilizó una computadora portátil ThinkPad® equipada con procesador Intel® Core™ i5-8350U (1.70–1.90 GHz) y 16 GB de memoria RAM. El entorno de desarrollo fue Spyder (Anaconda Inc.), implementando las librerías Ultralytics para visión por computadora y tqdm para el seguimiento del progreso de las iteraciones.

Los parámetros de entrenamiento se definieron en función del equilibrio entre precisión y costo computacional. La resolución de entrada se estableció en 640×640 píxeles (img_size), se configuraron 50 épocas como número de iteraciones completas sobre el conjunto de entrenamiento, y un tamaño de lote (batch) de 6 imágenes. Bajo esta configuración, el conjunto ampliado de 6,000 imágenes se procesó de manera secuencial, calculando el error promedio por lote y ajustando los pesos de la red neuronal. Al finalizar el entrenamiento, se almacenaron los pesos finales del modelo en un directorio de salida, junto con los archivos de métricas y gráficas de evolución de las pérdidas (loss functions), curvas de precisión y recall, así como los valores de mAP correspondientes, generadas automáticamente por YOLOv8.

Postprocesamiento y métricas de desempeño.

Al finalizar el entrenamiento, los resultados fueron almacenados en un directorio de salida que incluyó los archivos del modelo y las métricas generadas automáticamente por YOLOv8. Para la evaluación del desempeño se consideraron indicadores estándar en tareas de detección de objetos, tanto en el conjunto de entrenamiento como en el de validación.

Las métricas principales incluyeron: pérdida de localización (box_loss), que evalúa la correspondencia entre las cajas predichas y las de referencia (ground truth) mediante funciones basadas en IoU (Intersection over Union); pérdida de clasificación (cls_loss), que mide la capacidad del modelo para asignar la clase correcta; y pérdida de ajuste de bordes (dfl_loss), orientada a la precisión en la delimitación de las cajas. Adicionalmente, se calcularon indicadores de desempeño global como precisión (Precision), sensibilidad o exhaustividad (Recall) y el F1-score, los cuales permiten cuantificar la relación entre verdaderos positivos, falsos positivos y falsos negativos.

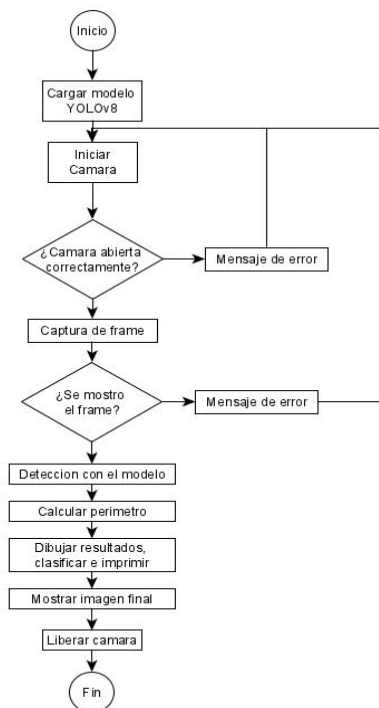
Se utilizaron también métricas de referencia ampliamente aceptadas, tales como el $mAP@0.5$ (precisión promedio media con umbral IoU = 0.5) y el $mAP@0.5-0.95$, que evalúa el desempeño del modelo en diferentes niveles de exigencia de solapamiento entre cajas predichas y reales. Estas métricas proporcionan una visión integral sobre la capacidad del modelo para generalizar y evitar problemas de sobreajuste (overfitting).

Para complementar la evaluación, YOLOv8 generó representaciones gráficas, incluyendo curvas precisión-recall, recall-confidence y precision-confidence, así como distribuciones de etiquetas y de áreas de bounding boxes. Finalmente, se construyó una matriz de confusión, la cual permitió comparar las predicciones del modelo con las etiquetas reales y visualizar la frecuencia de aciertos y errores por clase.

Programación con cámara web y clasificación de bulbos.

El sistema de visión artificial se implementó mediante una cámara web conectada al modelo YOLOv8 previamente entrenado. El procedimiento general integró tanto la detección como la clasificación de bulbos en una misma secuencia de ejecución. En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo que resume las etapas principales: carga del modelo, inicialización de la cámara, captura de imágenes, detección del bulbo, cálculo del perímetro y clasificación final.

Figura 2. Diagrama de flujo general del proceso de detección y clasificación de bulbos de ajo mediante visión artificial con cámara web.



Cálculo del perímetro del bulbo

El perímetro de los bulbos de ajo se estimó a partir de imágenes capturadas a una altura controlada, utilizando un objeto de diámetro conocido como referencia. Con esta relación, los valores en píxeles se transformaron a dimensiones reales en milímetros mediante la ecuación 1. Donde Apx es el ancho del objeto en píxeles y Pxcn la relación píxel/cm de la imagen (357 px/cm).

$$\text{Diámetro} = \frac{\text{Apx}}{\text{pxcm}} * 10 \quad (1)$$

La clasificación por calibre se realizó de acuerdo con el Cuadro 1, el cual presenta las dimensiones estándar establecidas por el INIFAP Zacatecas para el cultivo de ajo (Hernández et al., 2014).

Cuadro 1 Clasificación del ajo según calibre (Hernández et al., 2014)

Calibre	Diámetro del bulbo (mm)
5	40-45
6	45-50
7	50-55
8	55-60
9	60-65
10	65-70
11	70-75

Clasificación por semilla

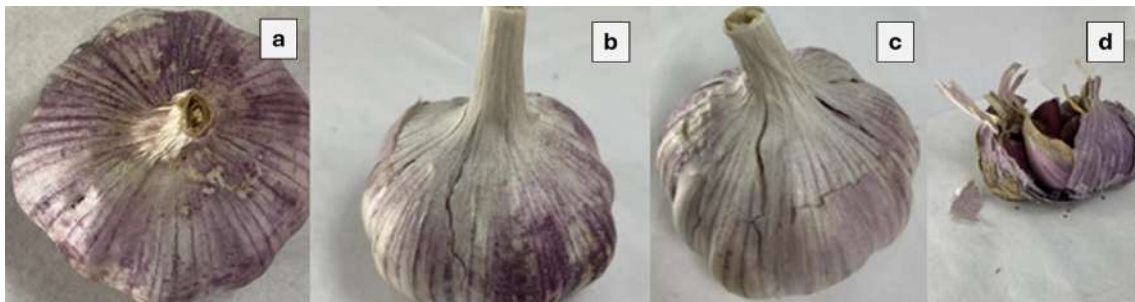
Además de la clasificación por calibre, el sistema incorporó un módulo para diferenciar entre ajos enteros y desgranados, así como para evaluar la calidad de la semilla. Este procedimiento se realizó mediante el mismo enfoque de entrenamiento e implementación del modelo, considerando tres parámetros de calidad definidos por el productor: color, firmeza y forma (redondez).

La clasificación final se estableció de la siguiente manera:

- Premium: cumple con los tres parámetros.
- Primera: cumple dos de tres.
- Segunda: cumple uno de tres.
- Desgranado/Merma: no cumple con ningún parámetro.

En la Figura 3 se presenta un esquema gráfico que resume los criterios aplicados para la clasificación de semillas de ajo.

Figura 3. Esquema de criterios aplicados para la clasificación de semillas de ajo (a. premium, b. primera, c. segunda, d. desgranado).



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desempeño del entrenamiento del modelo

Al finalizar el entrenamiento, el sistema de visión artificial basado en YOLOv8 generó una carpeta de salida con los pesos finales del modelo, las curvas de confianza y precisión, así como las gráficas de error asociadas al proceso de ajuste. Estos resultados constituyeron los primeros indicadores de desempeño, evidenciando que el modelo logró interpretar correctamente las etiquetas y detectar las características esenciales de los bulbos de ajo.

En la Figura 4 se muestran los cálculos correspondientes al parámetro batch, los cuales reflejaron una convergencia adecuada y un aprendizaje estable, asegurando que las iteraciones progresivas condujeron a la reducción de errores sin indicios de sobreajuste.

Figura 4. Cálculos del batch durante el entrenamiento de YOLOv8 para la detección de bulbos de ajo.



Métricas de desempeño del modelo.

Los resultados del entrenamiento generaron un conjunto de diez gráficas, cinco correspondientes al conjunto de entrenamiento (superiores) y cinco al conjunto de validación (inferiores), representadas en la Figura 5. Estas gráficas, generadas automáticamente por la librería Ultralytics, constituyen una herramienta esencial para evaluar el desempeño del modelo y su capacidad de generalización.

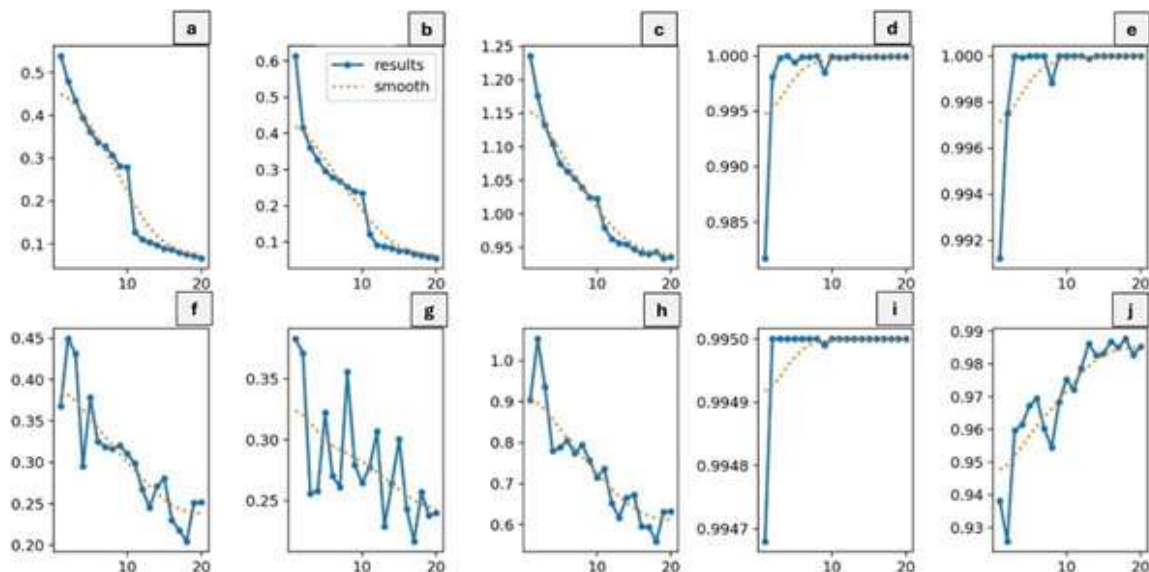
En la Figura 5a, el vector `train/box_loss` mostró una disminución progresiva, indicando que el modelo aprendió a localizar los objetos de forma precisa, ajustando las cajas predichas a los contornos reales de los bulbos. Este comportamiento es consistente con lo reportado en aplicaciones similares de visión artificial en frutas como tomate o manzana, donde la reducción sostenida de la `box_loss` se asocia con una mejora en la detección de objetos irregulares en postcosecha (Liu et al., 2025). La Figura 5b presentó `train/cls_loss`, correspondiente al error en la clasificación. Los valores decrecientes confirmaron que el modelo asignó adecuadamente las clases, reduciendo falsos positivos. Resultados similares se han documentado en la clasificación fresas y aguacates, donde arquitecturas basadas en YOLO alcanzaron una correcta asignación de categorías con errores mínimos en datasets balanceados (Kamat et al., 2025).

La Figura 5c, relacionada con `train/dfl_loss` (Distribution Focal Loss), evidenció que el modelo alcanzó estabilidad en la predicción de bordes, lo cual es especialmente relevante en productos agrícolas de formas irregulares, como el ajo. Esta métrica mejora la detección de objetos pequeños al modelar cada coordenada como una distribución discreta en lugar de un único valor. Este hallazgo coincide con investigaciones recientes que subrayan la utilidad de `dfl_loss` para aumentar la precisión en detecciones agrícolas complejas (Shen et al., 2025).

En la Figura 5d, `metrics/precision` alcanzó valores cercanos a 1.0, reflejando que la mayoría de las detecciones fueron correctas. Por su parte, la Figura 5e, que representa `metrics/recall`, demostró que el modelo fue capaz de identificar la gran mayoría de los objetos presentes en las imágenes, reduciendo los falsos negativos. La combinación de alta precisión y alto recall es un indicador de equilibrio en el modelo, minimizando tanto errores de comisión como de omisión. Esto resulta fundamental en aplicaciones de postcosecha, donde la clasificación errónea puede repercutir directamente en la calidad comercial y el precio del producto.

Respecto al conjunto de validación, las Figuras 5f, 5g y 5h (`val/box_loss`, `val/cls_loss` y `val/dfl_loss`, respectivamente) confirmaron que el modelo generalizó adecuadamente, sin evidencias de sobreajuste (overfitting). Esta capacidad de generalización sugiere que el sistema puede aplicarse en condiciones reales de producción, más allá de las imágenes de entrenamiento, lo que constituye un avance importante frente a estudios previos que reportaron caídas de rendimiento al pasar de entornos controlados a escenarios reales. Shi et al., (2024) propusieron STF-YOLO, que integra Swin Transformer y YOLOv8, mejorando significativamente la detección de objetos pequeños como yemas de té en comparación con otros detectores populares.

Figura 5. Gráficas de desempeño del modelo YOLOv8: a. Train/box_loss, b. Train/cls_loss, c. Train/df_l_loss, d. metrics/precisión(B), e. metrics/recall(B), f. val/box_loss, g. val/cls_loss, h. val/df_l_loss, i. metrics/mAP50(B) y j. metrics/mAP50-95(B)



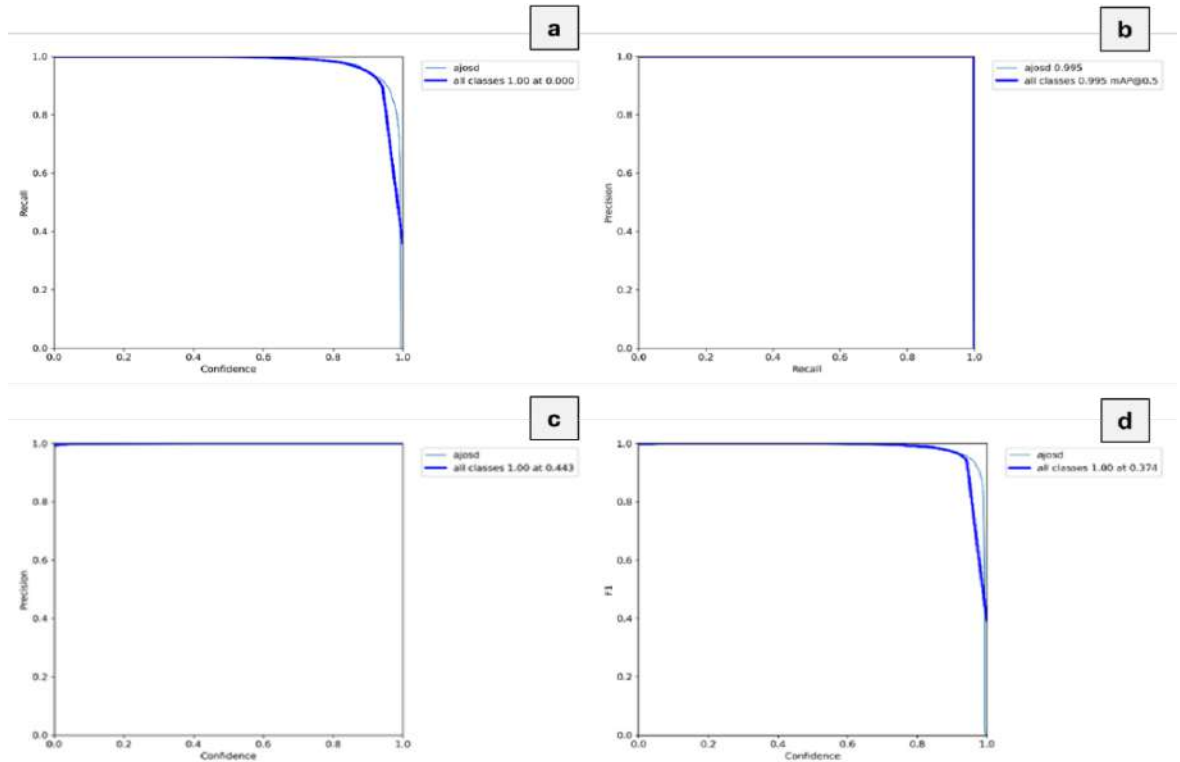
En la Figura 5i, la métrica mAP50(B) alcanzó un valor de 0.995 (99.5%), lo que representa un desempeño sobresaliente en la detección con un umbral de $\text{IoU} \geq 0.50$. Finalmente, la Figura 5j, que muestra mAP50-95(B), registró valores entre 0.93 y 0.985 (93–98.5%), evidenciando la robustez del modelo incluso bajo criterios más estrictos de evaluación. Resultados similares han sido reportados en estudios recientes de agricultura de precisión; por ejemplo, (Wu et al., 2024) desarrollaron una versión mejorada de YOLOv8 (D-YOLOv8) para la detección densa de flores de albaricoque mediante drones, alcanzando un 98.37% de AP con solo 13.2 millones de parámetros, demostrando que las arquitecturas optimizadas de YOLOv8 son altamente efectivas para la identificación de objetivos agrícolas complejos y densos.

Curvas de desempeño y distribución de etiquetas

La curva Recall-Confidence (**Figura 6a**) mostró una sensibilidad cercana a 1.0 en casi todo el rango de confianza, indicando que el modelo identificó prácticamente todos los objetos reales. Este desempeño garantiza un alto nivel de seguridad en la detección, aspecto crucial en aplicaciones de poscosecha para evitar pérdidas económicas. La curva Precision-Recall (**Figura 6b**) se aproximó al punto ideal (1,1), alcanzando 99.5% en precisión y recall, lo que validó un mAP cercano al 100% y un desempeño comparable a reportes en tomate y uva con YOLOv8 (>95% en escenarios controlados). La curva Precision-Confidence (**Figura 6c**) mostró que, a partir de un umbral de confianza del 44.3%, la precisión fue del 100%, eliminando falsos positivos y garantizando confiabilidad en la clasificación automatizada de ajo. Por su parte, la curva F1-score (**Figura 6d**) se mantuvo próxima a 1.0 en casi todo el rango de confianza, lo que refleja un rendimiento sobresaliente, aunque su

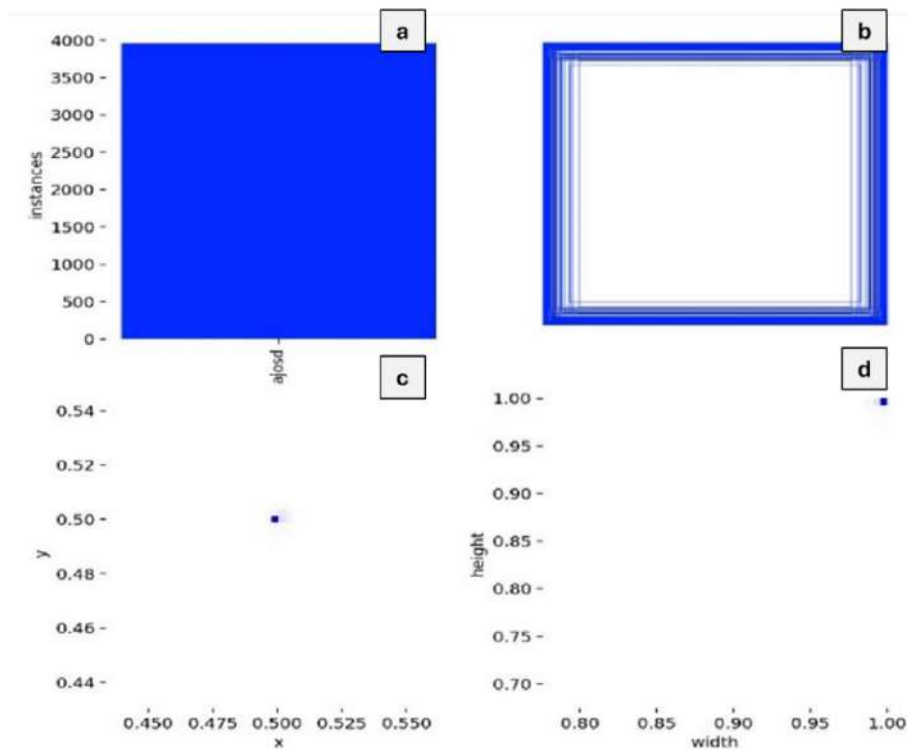
comportamiento plano sugiere un posible sobreajuste. Este fenómeno, frecuente en sistemas de visión artificial agrícola, puede mitigarse mediante estrategias de *data augmentation* o con imágenes en condiciones de campo menos controladas.

Figura 6. Métricas de desempeño del modelo YOLOv8 en la detección de bulbos de ajo:
(a) Curva Recall-Confidence, (b) Curva Precision-Recall, (c) Curva Precision-Confidence con umbral óptimo de 0.443 y (d) Curva F1-score en función del nivel de confianza.



Las gráficas de distribución de etiquetas evidenciaron que el conjunto de datos se encontraba balanceado en cuanto a clases (Figura 7a). No obstante, la Figura 9b mostró que las bounding boxes tendieron a abarcar gran parte de la imagen, lo que podría limitar la detección de objetos más pequeños. La Figura 7c reflejó que los centros de las cajas estaban mayormente concentrados en la coordenada central ($x=0.5$, $y=0.5$), lo cual sugiere una restricción en la variabilidad espacial de las anotaciones. Finalmente, la Figura 7d mostró que los objetos ocupaban casi todo el campo visual, lo que podría representar un reto para escenarios donde existan múltiples instancias por imagen. En conjunto, estas observaciones destacan la necesidad de ampliar el dataset hacia condiciones más heterogéneas para mejorar la robustez del modelo.

Figura 7. Gráficas de distribución de etiquetas: (a) balance de clases, (b) tamaño relativo de bounding boxes, (c) localización de centros de detección y (d) proporción de ocupación de la imagen.

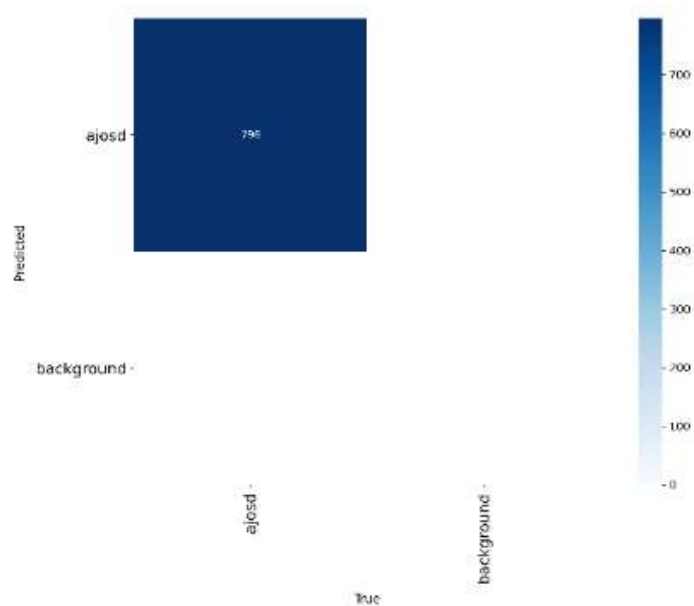


La **Figura 8** matriz de confusión mostró un bloque dominante en la celda de verdaderos positivos para la clase ajo, con 796 instancias correctamente detectadas y ausencia de conteos en celdas fuera de la diagonal. En términos operativos, esto implica alta sensibilidad (recall) y especificidad, es decir, el modelo no confundió objetos con fondo ni fondo con objetos en el conjunto evaluado. Este comportamiento es coherente con sistemas de detección agrícola bien entrenados en escenarios controlados, donde la variabilidad de fondo, pose e iluminación es acotada. Pro: confirma que la red aprendió rasgos discriminativos sólidos para ajo bajo tu protocolo de captura. Contra: una matriz “casi perfecta” puede ser indicio de validación indulgente, sesgo del conjunto (clase/fondo) o fuga de información entre entrenamiento y validación; conviene verificar estratificación, separación estricta por escenas y mayor diversidad de negativos.

La matriz de confusión evidenció un desempeño casi perfecto en la detección de bulbos de ajo, al identificar correctamente todas las instancias y diferenciar el fondo sin errores, reflejando alta especificidad y sensibilidad bajo condiciones controladas. No obstante, estudios previos muestran que estas métricas tienden a disminuir en escenarios reales más complejos. En huertos de manzana, el modelo YOLOv5s-GBR alcanzó altos valores de precisión y recall, aunque persistieron errores con iluminación variable y oclusiones (Sun et al., 2024) De forma similar, arquitecturas ligeras basadas

en YOLO han mostrado eficiencia en sistemas embebidos, pero limitaciones en fondos heterogéneos (Olguín-Rojas et al., 2025) En aplicaciones robóticas, YOLOv5-RACF logró un mAP@0.5 de 98.75% en la detección de manzanas, aunque su rendimiento disminuyó ante solapamientos y ramas (Zhu et al., 2024). También, la integración de YOLOv5 con nubes de puntos LiDAR alcanzó una precisión del 90%, pero con menor recall por oclusiones parciales (Karim et al., 2025). Finalmente, un modelo YOLOv7 con atención aplicado a ciruelas reportó métricas destacadas en entornos naturales, aunque sensible al cambio de dominio entre lotes y temporadas (Tang et al., 2023).

Figura 8. Matriz de confusión del modelo para la clase ajo.



Resultados de detección y medición

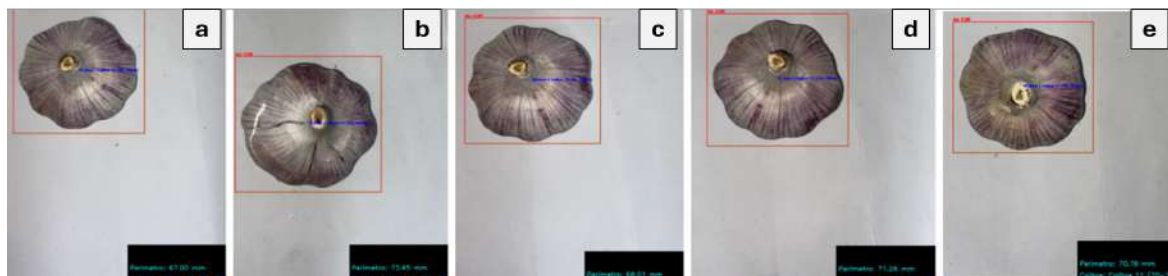
En la Figura 9 se presenta una imagen donde el sistema de visión artificial detectó correctamente un ajo y calculó su perímetro con alta precisión: 71.26 mm, con un margen de error de aproximadamente ± 0.3 mm. Este resultado demuestra la capacidad del modelo para estimar dimensiones físicas de forma precisa en condiciones controladas.

En la **Figura 10**, se muestran varias muestras en las cuales el sistema realiza detección, medición del perímetro y asigna el calibre correspondiente (de acuerdo con categorías predefinidas como calibre 10 o calibre 11). Estas imágenes ilustran la viabilidad de automatizar totalmente el proceso de clasificación y medición del ajo, eliminando la necesidad de intervención humana. Esto sugiere que, con equipamiento adecuado, podríamos lograr una implementación práctica robusta y escalable, garantizando precisión, consistencia y eficiencia.

Figura 9 Detección del ajo con su respectivo perímetro medido.



Figura 10. Detección, medición y clasificación de ajos en imagen.
(a. calibre 10, b. calibre 11, c. calibre 10, d. calibre 11, e. calibre 11)



Clasificación por calidad de semilla

Asimismo, se evaluó la capacidad del modelo para clasificar ajos según la calidad de semilla en tres categorías: premium, primera y desgranado. Los resultados confirmaron un desempeño preciso en la detección y medición del perímetro bajo condiciones controladas, evidenciando la solidez del enfoque propuesto. Este rendimiento es consistente con avances recientes en agricultura de precisión, donde modelos YOLO optimizados han demostrado alta exactitud en tareas de estimación y clasificación automática (Ayalde et al., 2024; Shi et al., 2024; Tang et al., 2023). En la **Figura 11** se presentan ejemplos representativos de detección en cada categoría:

Figura 11. Demo de Roboflow para detección de ajo (amarillo), bulbo categoría premium (rojo), bulbo categoría segundas (verde), ajo desgranado (morado).



CONCLUSIONES

El sistema de visión artificial desarrollado en este estudio permitió la detección y clasificación automática de bulbos de ajo, incluyendo ajo entero, ajo desgranado y medición de perímetro, alcanzando un desempeño sobresaliente con una precisión superior al 98.5%. La implementación se basó en un dataset de 6000 imágenes, un preentrenamiento en Roboflow y el uso del modelo YOLOv8, lo que evidenció la capacidad de las redes de detección profunda para resolver tareas de clasificación y medición en condiciones controladas de poscosecha. Los resultados confirmaron que YOLOv8 no solo logró un aprendizaje estable y generalizable, sino que también superó valores de precisión reportados previamente en la literatura, consolidándose como una herramienta prometedora para la automatización de procesos postcosecha. No obstante, se identificó que el incremento del tamaño y diversidad del dataset, así como el uso de hardware especializado (GPU de mayor capacidad), resultan necesarios para optimizar el entrenamiento y mejorar la detección en tiempo real. Si bien el modelo demostró un rendimiento excepcional en escenarios controlados, su aplicación práctica exige validación en condiciones más heterogéneas: variaciones de orientación, fondos complejos, iluminación cambiante y presencia de múltiples instancias en una misma imagen. Estas pruebas adicionales garantizarán su robustez y escalabilidad hacia contextos operativos reales. Finalmente, este trabajo abre la posibilidad de extender el enfoque hacia clasificaciones más complejas basadas en parámetros de calidad de semilla (color, firmeza y forma), lo que representa un paso significativo hacia la implementación de sistemas inteligentes para la selección, clasificación y valorización de productos agrícolas en cadenas de valor de poscosecha.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Aguas Firmes, implementado por la Cooperación Alemana para el Desarrollo Sustentable (GIZ) y promovido por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ); a la cervecera líder AB InBev, a través de Grupo Modelo y Coca-Cola Company; y al INIFAP. Gran ref. SIGI: 1234837220 y 135051364.

LITERATURA CITADA

- Anh, P. T. Q., Thuyet, D. Q., & Kobayashi, Y. (2022). Image classification of root-trimmed garlic using multi-label and multi-class classification with deep convolutional neural network. *Postharvest Biology and Technology*, 190(October 2021), 111956. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111956>
- Ayalde, D. G., Londoño, J. C. G., Mosquera, A. Q., Melendez, J. L. L., Gimode, W., Tran, T., Zhang, X., & Selvaraj, M. G. (2024). AI-powered detection and quantification of post-harvest physiological deterioration (PPD) in cassava using YOLO foundation models and K-means clustering. *Plant Methods*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01309-w>
- Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y., & Liao, H.-Y. M. (2020). YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. <http://arxiv.org/abs/2004.10934>
- Ceccarelli, A., Farneti, B., Khomenko, I., Cellini, A., Donati, I., Aprea, E., Biasioli, F., & Spinelli, F. (2020). Nectarine volatiles response to fresh-cutting and storage. *Postharvest Biology and Technology*, 159(June 2019), 111020. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111020>
- Chung, H., Wi, S., Cho, B. K., & Lee, H. (2024). Classification of Garlic (*Allium sativum* L.) Crops by Fertilizer Differences Using Ground-Based Hyperspectral Imaging System. *Agriculture (Switzerland)*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/agriculture14081215>
- Cubero García, S. (2012). Diseño e implementación de nuevas tecnologías basadas en visión artificial para la inspección no destructiva de la calidad de fruta en campo y mínimamente procesada. 212. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/15999>
- Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C. K. I., Winn, J., & Zisserman, A. (2010). The pascal visual object classes (VOC) challenge. *International Journal of Computer Vision*, 88(2), 303–338. <https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4>
- Fuentes, A., Yoon, S., Kim, S. C., & Park, D. S. (2017). A robust deep-learning-based detector for real-time tomato plant diseases and pests recognition. *Sensors (Switzerland)*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/s17092022>
- Hernández, M. R., Ángel, J., Ríos, C., Valle, R. V., & Torres, R. R. (2014). Orientación de semilla, rendimiento y calidad de ajo (*Allium sativum* L.) en dos variedades para Zacatecas. *AGROFAZ*, 14(3), 73–78.
- Kamat, P., Gite, S., Chandekar, H., Dlima, L., & Pradhan, B. (2025). Multi-class fruit ripeness detection using YOLO and SSD object detection models. *Discover Applied Sciences*, 7(9). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07617-7>
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147(February), 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>

- Karim, M. R., Reza, M. N., Ahmed, S., Lee, K. H., Sung, J., & Chung, S. O. (2025). Detection of Trees and Objects in Apple Orchard from LiDAR Point Cloud Data Using a YOLOv5 Framework. *Electronics (Switzerland)*, 14(13), 1–31. <https://doi.org/10.3390/electronics14132545>
- Liu, J., Yu, J., Zhang, C., Cui, H., Zhao, J., Zheng, W., Xu, F., & Wei, X. (2025). Optimization of a multi-environmental detection model for tomato growth point buds based on multi-strategy improved YOLOv8. *Scientific Reports*, 15(1), 1–29. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06692-5>
- Olguín-Rojas, J. C., Vasquez, J. I., López-Canteñs, G. de J., Herrera-Lozada, J. C., & Mota-Delfin, C. (2025). A Lightweight YOLO-Based Architecture for Apple Detection on Embedded Systems. *Agriculture (Switzerland)*, 15(8), 1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture15080838>
- Parreño, R., Rodríguez-Alcocer, E., Martínez-Guardiola, C., Carrasco, L., Castillo, P., Arbona, V., Jover-Gil, S., & Candela, H. (2023). Turning Garlic into a Modern Crop: State of the Art and Perspectives. *Plants*, 12(6), 1–18. <https://doi.org/10.3390/plants12061212>
- Ryu, J., Kwak, D., & Choi, S. (2025). YOLOv8 with Post-Processing for Small Object Detection Enhancement. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(13), 1–13. <https://doi.org/10.3390/app15137275>
- Shen, Y., Yang, Z., Khan, Z., Liu, H., Chen, W., & Duan, S. (2025). Optimization of Improved YOLOv8 for Precision Tomato Leaf Disease Detection in Sustainable Agriculture. *Sensors*, 25(5), 1–23. <https://doi.org/10.3390/s25051398>
- Shi, M., Zheng, D., Wu, T., Zhang, W., Fu, R., & Huang, K. (2024). Small object detection algorithm incorporating swin transformer for tea buds. *PLoS ONE*, 19(3 March), 1–25. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299902>
- Sitanggang, I. S., Rahmani, I. A., Caesarendra, W., Agmalara, M. A., Annisa, A., & Sobir, S. (2023). Garlic Field Classification Using Machine Learning and Statistic Approaches. *AgriEngineering*, 5(1), 631–645. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5010040>
- Sun, X., Zheng, Y., Wu, D., & Sui, Y. (2024). Detection of Orchard Apples Using Improved YOLOv5s-GBR Model. *Agronomy*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy14040682>
- Tang, R., Lei, Y., Luo, B., Zhang, J., & Mu, J. (2023). YOLOv7-Plum: Advancing Plum Fruit Detection in Natural Environments with Deep Learning. *Plants*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/plants12152883>
- Wu, Z., Wang, X., Jia, M., Liu, M., Sun, C., Wu, C., & Wang, J. (2024). Dense object detection methods in RAW UAV imagery based on YOLOv8. *Scientific Reports*, 14(1), 1–23. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69106-y>
- Zhou, L., Zhang, C., Liu, F., Qiu, Z., & He, Y. (2019). Application of Deep Learning in Food: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(6), 1793–1811. <https://doi.org/10.1002/crfs.10000>

doi.org/10.1111/1541-4337.12492

Zhu, F., Zhang, W., Wang, S., Jiang, B., Feng, X., & Zhao, Q. (2024). Apple-Harvesting Robot Based on the YOLOv5-RACF Model. *Biomimetics*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/biomimetics9080495>

Capítulo XV

Oscar Palmeros Rojas¹, Noé Ramírez Negrete²
y Itzayana Amairani Brindis Fernández³

Características de los estudiantes de nuevo ingreso de la Preparatoria Agrícola de la UACH

RESUMEN

En este trabajo, se analizó la información obtenida del examen de selección 2025 de la Universidad Autónoma Chapingo, aplicado a estudiantes de nuevo ingreso a la Preparatoria Agrícola de la UACH. Las variables sociodemográficas analizadas están: Género, Estado de Procedencia, marginación del municipio de procedencia, etnia y modalidad de la secundaria de egreso. Las variables del ámbito académico son: calificación del examen, resultados en habilidades numéricas y conocimientos matemáticos. Los hallazgos muestran que la institución, a través de la implementación de políticas, contribuye con la inclusión social y la igualdad de género, favoreciendo a grupos vulnerables. En lo académico, se encontró que aproximadamente el 75% de los estudiantes de nuevo ingreso, no tienen los conocimientos mínimos en matemáticas. Los estudiantes que egresaron de secundarias comunitarias o técnica indígena, son los que cuentan con mayor deficiencia en conocimientos aritméticos básicos.

Para garantizar el éxito académico de los estudiantes, la institución deberá crear talleres, cursos, asesorías, tutorías y acompañamiento emocional, los cuales les ayuden a los estudiantes a superar sus deficiencias en conocimientos previos.

Palabras clave: examen de selección, inclusión, habilidades numéricas, conocimiento matemático, aprendizaje significativo.

¹ Área de Matemáticas de la Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco Estado de México. Km 38.5 carretera federal México-Texcoco. C.P. 56230. México. E-mail: opalmerosr@chapingo.mx

² Área de Matemáticas de la Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco Estado de México. Km 38.5 carretera federal México-Texcoco. C.P. 56230. México. E-mail: nramirez@chapingo.mx

³ Área de Disciplinas Humanísticas de la Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco Estado de México. Km 38.5 carretera federal México-Texcoco. C.P. 56230. México. E-mail: ibrindisf@chapingo.mx

ABSTRACT

In this paper, we analyzed information obtained from the 2025 admissions exam at the Universidad Autónoma Chapingo, administered to new students at the Preparatoria Agrícola de la UACH. The sociodemographic variables analyzed are: gender, state of origin, marginalization of the municipality of origin, ethnicity, and type of secondary school. The academic variables are: exam grade, results in numerical skills, and mathematical knowledge. The findings show that the institution, through the implementation of policies, contributes to social inclusion and gender equality, benefiting vulnerable groups. Academically, it was found that approximately 75% of new students lack basic mathematical knowledge. Students who graduated from community or indigenous technical secondary schools are the most deficient in basic arithmetic skills. To ensure students' academic success, the institution must create workshops, courses, counseling, tutoring, and emotional support to help students overcome their deficiencies in prior knowledge.

Keywords: selection exam, inclusion, numerical skills, mathematical knowledge, meaningful learning.

INTRODUCCIÓN

La Educación Media Superior (EMS), conocida como Bachillerato o Preparatoria, tiene como objetivo principal brindar a sus estudiantes conocimientos, habilidades, herramientas y competencias que más adelante los egresados utilizarán en su vida universitaria o en su vida laboral (OCDE 2010, INEE 2013). En la EMS se desarrolla la capacidad para analizar y resolver problemas, fomenta la confianza del estudiante, se define y fortalece el carácter, genera ciudadanos participativos y responsables. Diversos organismos (públicos y privados) coinciden en que, la calidad del empleo mejora considerablemente cuando la formación del individuo incluye como mínimo Educación Media Superior. Dicho de otro modo, las personas que estudiaron la preparatoria (o su equivalente), tienen acceso a mejores salarios y prestaciones, seguridad social y en general, a mejores condiciones de vida, (CEPAL 2006, UNESCO 2005).

En México, a partir del 9 de febrero de 2012, la EMS obtuvo un carácter obligatorio por declaración del Congreso de la Unión. A partir de esta fecha, se ofertan diversas alternativas educativas: Bachillerato escolarizado (tecnológico y general), Bachillerato no escolarizado (certificación por evaluaciones virtuales parciales), Bachillerato mixto, Certificación de bachillerato por examen, cursos de Capacitación para el trabajo y para quienes tienen algún tipo de discapacidad (Cámara de Diputados LXI Legislatura, Gaceta Parlamentaria, 2012).

A pesar de la importancia de la educación media superior, entre 2018 y 2022, de acuerdo con cifras del Sistema Educativo Nacional (SEN), la cobertura de la educación a nivel bachillerato pasó del 84.2 al 78.4%, es decir, experimentó una disminución de cerca del 6%, SEP (2022). Además de esto, en la actualidad, la EMS enfrenta importantes retos por atender; tasas de abandono que oscilaron, en el ciclo escolar 2019-2022, entre el 10.5% y 11%, INEE, (2019). Algunos autores coinciden que el abandono escolar, en la educación media superior, es un fenómeno multifactorial, los cuales se agrupan en tres grandes categorías:

- Factores de carácter **microsocial**: características individuales de los estudiantes (aspiraciones del estudiante, autoestima, salud física y emocional, adicciones, embarazo adolescente), relaciones interpersonales (ausencia de relaciones significativas entre compañeros, falta de orientación educativa de personas adultas, etc.) y conexiones familiares (omisión de lazos amorosos, bajas expectativas de superación familiar, etc.), Brito et al. (2019), Necochea et al. (2017), García y Soto, (2014).
- Factores de tipo **mesosocial**, son los factores relacionados con la escuela, los grupos de iguales y la comunidad; resaltando factores como, clima escolar, clima en el aula, la orientación personal, escolar y profesional inadecuada, las relaciones significativas entre estudiantes y profesores, salones pequeños, pedagogía inapropiada y ausencia de políticas escolares para retener a las y los estudiantes, Muñoz et al. (2005), Rodríguez (2021).
- Factores **macrosociales**, relacionados con: educación-formación (normatividad, gestión, programas de prevención del abandono escolar, presupuesto, etc.), formación-empleo (oferta de empleo, oportunidades y expectativas del sector laboral) y valores sociales dominantes (atracción por el éxito inmediato, placer del presente sin interés por el futuro, escasa valoración social de la educación, ausencia de culturas de la juventud en la cultura escolar, etc.), Arellano & Ortiz, (2022), Weiss (2012), Miranda (2018).

Otro problema importante en la educación media superior se relaciona con una eficiencia terminal baja. Para los ciclos escolares entre 2018-2019 a 2021-2022, la Secretaría de Educación Pública reportó que la tasa de eficiencia terminal oscila entre el 58.3% y el 68.7% respectivamente, SEP (2022). Gallardo et. al (2019), menciona que, este problema se atribuye a diferentes causas, entre estas, rigidez y especialización excesiva de los planes de estudio, los métodos obsoletos de enseñanza y evaluación, desconexión entre la teoría y la práctica, falta de programas de apoyo a los alumnos, el rol inadecuado del profesorado ante las necesidades actuales de aprendizaje y una orientación vocacional deficiente. Por su parte, Díaz Barajas y Ruiz Olvera (2018), atribuyen parte del problema a elementos sociales, familiares, psicológicos, económicos, perfiles de ingreso limitados, falta de hábitos de estudio y a una serie de pensamientos y sentimientos genéricos que el individuo tiene de sí mismo (autoconcepto). Vera et. al. (2012) identificaron que, la calificación del examen de admisión y antecedentes escolares como el promedio del nivel inmediato anterior, el déficit de conocimientos previos y en habilidades básicas son factores asociados a los estudiantes que intensifican el problema.

Se puede ver que la eficiencia terminal y el abandono escolar son un fenómeno multifactorial, complejo, dinámico y acumulativo; con relaciones de diversos ámbitos y niveles sociales, institucionales, educativos, familiares e individuales, Lorenzo y Zaragoza (2014).

Desarrollar en el estudiante el pensamiento crítico, razonado y lógico, es uno de los propósitos de la EMS, Arch E. (2019). Para lograr esto, las matemáticas, la lectura y escritura son elementos clave en la formación del estudiante, lo cual se ve reflejado en el hecho de que estas asignaturas ocupan una buena parte de los planes y programas de estudio de las escuelas de EMS de México.

A pesar de la importancia de las matemáticas, en el nivel medio superior existen problemas importantes, tanto en la enseñanza como en su aprendizaje. El Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación informó que, de acuerdo con los resultados del Plan Nacional para la Evaluación de los Aprendizajes (Planea 2017), los alumnos que terminan la Educación Media Superior presentan deficiencias importantes en Matemáticas, INEE (2109).

Para 2015, México se situó 82 puntos por debajo del promedio general en el área de matemáticas (408 de 490 puntos), lo que indica que un 57% de los estudiantes no poseen la capacidad para aplicar su conocimiento matemático en su día a día (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, 2017).

Sánchez y López (2018), destacan que factores como la motivación, la actitud hacia las matemáticas y las habilidades previas en el tema, impactan de manera importante en el rendimiento de los alumnos. Por otro lado, Hernández et al. (2020), destacan la importancia de: calidad de la enseñanza, uso de metodologías adecuadas y disponibilidad de recursos didácticos, como factores que impactan positivamente en el aprendizaje efectivo de las matemáticas. Larracilla et. al., (2019) y Zaratoga et. al., (2023), afirman que la dificultad para entender la asignatura, ausencias a clases, falta de hábitos de estudio, condiciones sociales inadecuadas, baja autoestima personal, elevados índices de ansiedad, limitaciones en las habilidades aritméticas, son factores que incrementan la reprobación en esta asignatura.

Un elemento que ha agudizado el problema del aprendizaje en matemáticas es el confinamiento causado por la pandemia del virus SARS-COV2 (COVID-19), el cual fue decretado en el diario oficial de la federación el 23 de marzo del 2020 (DOF, 2020). Los efectos de esta enfermedad fueron considerables en cada uno de los sectores socioeconómicos de la población mundial. En el caso de la educación, el impacto para los adolescentes y jóvenes fue devastador. En la población estudiantil se incrementaron los problemas emocionales (ansiedad, depresión, irritabilidad, inestabilidad emocional, etc.), INEGI (2021), Pérez et. al. (2023), se incrementó la procrastinación, la falta de motivación, pérdida de hábitos de estudio; todo esto está generando en el estudiante, sentimientos de incapacidad, Bautista et. al, (2023), UNICEF (2020), Rodríguez (2021), Hanushek, E. and L. Woessmann (2020), Sánchez et. al. (2024).

El panorama nacional, de la Educación Media Superior y del aprendizaje de las matemáticas, descrito previamente, no es desconocido para la Universidad Autónoma Chapingo (UACH).

La UACH es una institución que ofrece educación Media Superior, Superior y de Posgrado en ciencias agrícolas. Para el caso de Educación Media Superior, ofertada en la Preparatoria Agrícola, la institución selecciona a sus estudiantes a través de un examen de conocimientos, un estudio socioeconómico y otros criterios, lo cual favorece al ingreso de estudiantes del sector rural de todo el país. Derivado de este proceso de selección, entre el 35 y 38% de las y los estudiantes pertenecen a alguna de las 70 etnias (mixteca, náhuatl, otomí, teco, choles, mames, etc.), provenientes de los estados de Hidalgo, Oaxaca, Puebla, Veracruz y Chiapas (UPOM, 2021).

Esta diversidad, en conjunto con características de la institución, así como deficiencias en la formación previa de los estudiantes que ingresan a la preparatoria, generan la existencia de problemas académicos, emocionales, familiares y personales de los estudiantes, entre estos, se destacan: reprobación, desapego familiar, problemas culturales, problemas con el sistema educativo, abandono (temporal o definitivo), entre otros. El impacto de estos se ve reflejado en la alta tasa de deserción escolar, la cual es mayor al 40% (Coronado G. 2024).

Consciente de esta problemática, la UACH, en su Plan de Desarrollo institucional 2009-20025, ha generado diversas estrategias para disminuir la tasa de deserción escolar (PDI, 2009-2025). Entre las acciones implementadas, destaca la creación de tutorías de pares, asesorías académicas, cursos y talleres remediales, atención psicológica, programas deportivos, culturales y de orientación vocacional. Sin embargo, y a pesar de los programas institucionales, la deserción escolar sigue siendo un problema importante que afecta a los estudiantes de esta casa de estudio.

Es importante resaltar que, el impacto de las estrategias emprendidas, depende del conocimiento de la población a quien va dirigida. En este sentido, y con el objetivo de conocer las características de los estudiantes de nuevo ingreso, los autores de este trabajo, emplearon el examen de selección para determinar el nivel de conocimientos de las y los estudiantes, particularmente en aritmética. Se busca emplear este conocimiento para diseñar políticas, estrategias y programas que ayuden a las y los alumnos en su formación académica.

El objetivo del presente trabajo consiste en analizar la calificación del examen de selección, calificación en conocimientos matemáticos, calificación de habilidades numéricas, género, modalidad de la secundaria de procedencia, marginación del municipio, entidad federativa de nacimiento y grupo étnico, contenidas en el examen de selección para el ingreso a la Preparatoria Agrícola, aplicado en la Universidad Autónoma Chapingo, en el ciclo escolar 2025-2026.

MATERIALES Y MÉTODOS

La información fue proporcionada por la dirección del departamento. Los análisis estadísticos fueron realizados en el paquete estadístico R (R Core Team 2023). El conocimiento de estas variables, permitirá a la administración en turno, gestionar y generar estrategias acordes a las necesidades de los estudiantes, las cuales, los acompañarán a lo largo de su formación.

Características generales de la población

Para el primer semestre del ciclo escolar 2025-2026, se cuenta con una matrícula de 1326 estudiantes, los cuales, 1306 son de nuevo ingreso y 20 de reingreso. Referente a este punto, enfocaremos la atención en los estudiantes de nuevo ingreso, debido a que, para ellos se desconocen necesidades especiales, hábitos de estudio, conocimientos previos, entre otros.

De los 1306 estudiantes registrados, 590 (45.2%) son mujeres. La edad de los estudiantes oscila entre los 13 y 30 años. Detalles adicionales se presentan en la siguiente tabla.

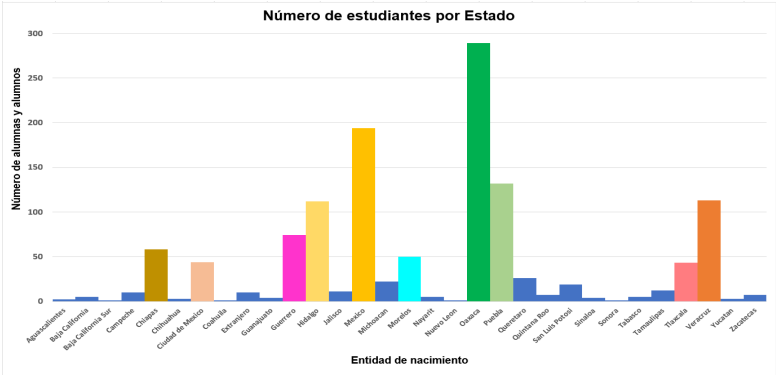
Tabla 1. Distribución por edad medida en años, para hombres y mujeres

	Mínima	Máxima	Mediana	Media	sd
Mujer	13	30	15	15.11	1.2
Hombre	13	27	15	15.03	1.43

Fuente: elaboración propia

La distribución de la matrícula de nuevo ingreso de acuerdo a la **entidad federativa de nacimiento**, se muestra en la gráfica siguiente.

Figura 1. Distribución de la matrícula de nuevo ingreso por entidad federativa de nacimiento



Fuente: elaboración propia

Los estados con mayor presencia en la institución y su distribución, de acuerdo al género se presenta en la tabla siguiente.

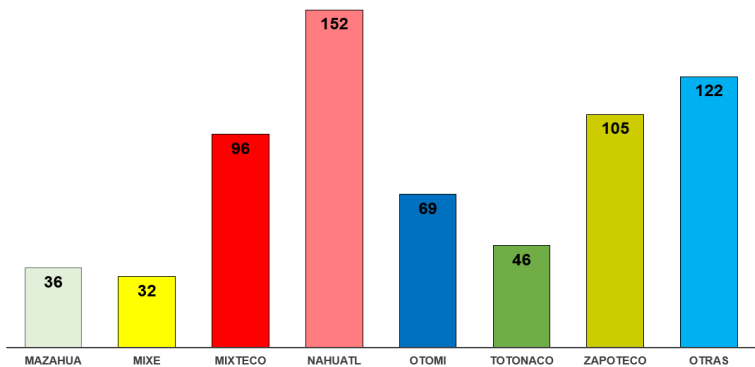
Tabla 2. Distribución por género para los estados con mayor presencia en la UACH

Estado	Mujer	Hombre	Total
Chiapas	26 (1.9%)	32 (2.5%)	58 (4.4%)
CDMX	20 (1.53%)	24 (1.83%)	44 (3.36%)
Guerrero	34 (2.6%)	40 (3 %)	74 (5.6%)
Hidalgo	54 (4.13%)	58 (4.4%)	112 (8.53 %)
Edo. Mex	97 (7.42%)	97 (7.42%)	194 (14.84%)
Morelos	24 (1.83%)	26 (1.9%)	50 (3.73%)
Oaxaca	138 (10.5%)	151 (11.56%)	289 (22.06%)
Puebla	70 (5.35%)	62 (4.74%)	132 (10.9%)
Tlaxcala	14 (1.07%)	29 (2.22%)	43 (3.29%)
Veracruz	48 (3.67%)	65 (4.97%)	113 (8.64%)
Otros	65 (5.2%)	132 (10.9%)	197 (16.1%)
Total	590 (45.20%)	716 (54.8%)	1306 (100%)

Fuente: elaboración propia

En la tabla 2, se puede observar que la UACH, ha adecuado sus procesos de selección de tal manera que se tenga equidad de género. Del total de estudiantes, 658 (50.4%) manifestaron pertenecer a alguno de los 70 pueblos indígenas de México.

Figura 2. Distribución de las 7 Etnias con mayor presencia en Chapingo
Distribución de Etnias en Chapingo

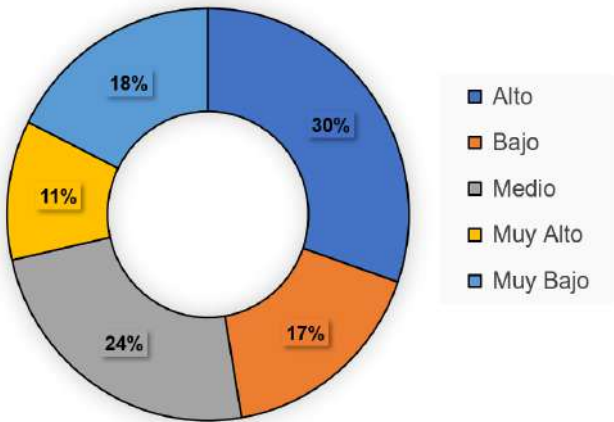


Fuente: elaboración propia

De las 30 etnias que tienen presencia en la institución, las siete que tienen mayor representación son Mazahua (5.47%), Mixe (324.86%), Mixteco (14.58%), Náhuatl (23.1%), Otomí (10.48%), Totonaco (7%) y Zapoteco (15.95%), ver figura 2.

Una característica adicional, es el grado de marginación del municipio de procedencia. La distribución para esta variable se presenta en la figura 3.

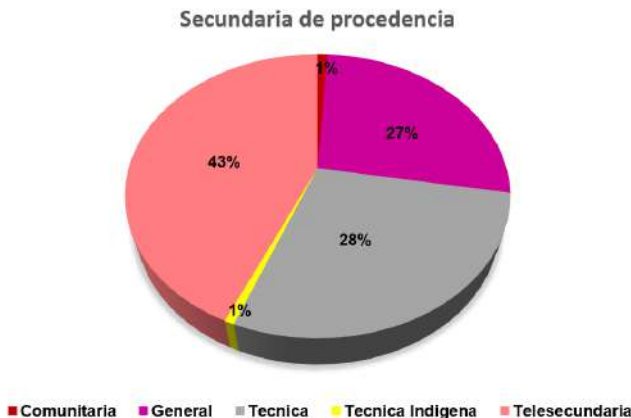
Figura 3. Porcentaje de marginación para el municipio de procedencia
Marginación del municipio



Fuente: elaboración propia

Finalmente, y en referencia al tipo de secundaria de la que los estudiantes provienen, tenemos la siguiente distribución.

Figura 3. Distribución para tipo de secundaria del que provienen los estudiantes



Fuente: elaboración propia

A través de esta selección, la universidad Chapingo busca ser una institución inclusiva, promoviendo valores como el respeto, tolerancia, interculturalidad, diversidad ideológica; esta y otras acciones están encaminadas a erradicar la discriminación y disminuir la brecha educativa en diversos sectores del país (PDI, 2009-2025).

Para lograr que cada estudiante que pertenece a la institución, tenga igualdad de oportunidades y las facilidades que le permitan desarrollar su potencial, sin importar su género, orientación, ideología, la institución debe establecer políticas claras y protocolos de actuación contra la discriminación y la violencia de género, incluyendo: creación de un código de conducta que promueva el respeto, la inclusión y la igualdad, generar protocolos de atención y seguimiento para casos de acoso, violencia o discriminación, que garantice un proceso justo, confidencial y seguro para las víctimas, capacitación obligatoria para todo el personal (docente, administrativo y directivo) sobre igualdad de género, derechos humanos y prevención de la violencia, integrar en sus currículos la perspectiva de género y la no discriminación, derechos sexuales y reproductivos, promover la participación equitativa de estudiantes en actividades académicas y extracurriculares, rompiendo con la idea de que hay materias o deportes para hombres y para mujeres, implementar y fortalecer las actividades, talleres y cursos que buscan despertar el interés de las y los estudiantes para que se interesen en áreas como ciencia, tecnología y matemáticas, entre otras, Villa Lever (2014).

Desempeño Académico

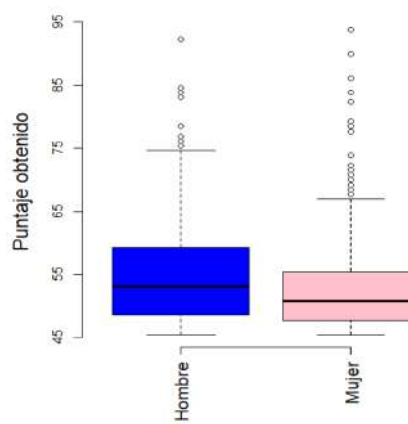
Además del análisis descriptivo de las características de los estudiantes de nuevo ingreso, es de interés para la institución analizar los resultados del examen de selección. Un análisis detallado de esta prueba permitirá conocer del estudiante sus capacidades, habilidades y las diferentes áreas de

oportunidad. La institución podrá conocer el perfil del estudiante, lo que le permitirá planear, crear, e implementar las estrategias que acompañaran a los estudiantes en su formación académica.

Resultados del Examen de selección.

El promedio del examen de selección aplicado a las y los estudiantes de nuevo ingreso a la Preparatoria Agrícola de la UACH, fue de 53.88 puntos. Para las mujeres, el promedio es de 52.76 puntos y 54.81 puntos para los hombres. El valor mínimo en ambos géneros coincide y es de 45.39 puntos, mientras que el máximo para mujeres es de 93.85 y 92.31 para hombres.

Figura 4. Distribución de las calificaciones por género



Fuente: elaboración propia

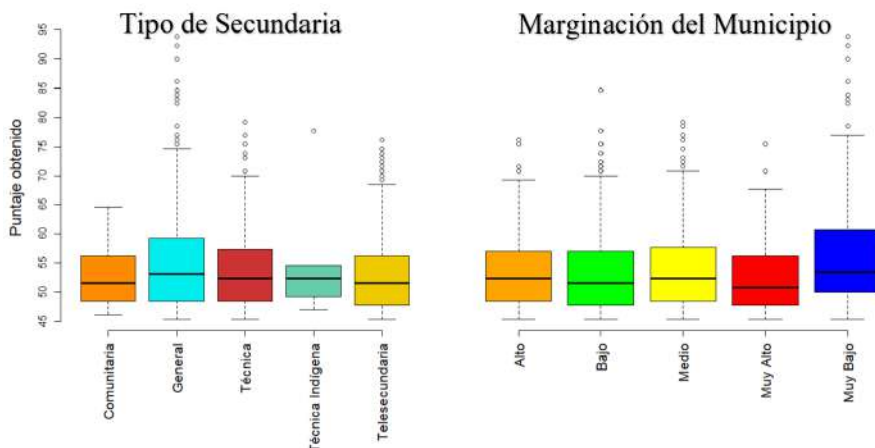
La tabla siguiente, muestra la calificación promedio para las 10 entidades federativas.

Tabla 3. Calificación mínima y máxima global y por género para las 10 entidades con mayor presencia en Chapingo

Estado	Global		Mujer		Hombre	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Chiapas	45.39	76.15	45.39	63.08	45.39	76.15
CDMX	45.39	83.08	45.39	82.31	45.39	83.08
Guerrero	45.39	76.92	45.39	67.69	45.39	76.92
Hidalgo	45.39	78.46	45.39	78.46	45.39	74.62
Edo. Mex	45.39	92.31	45.39	90.00	45.39	92.31
Morelos	45.39	79.23	45.39	79.23	45.39	76.22
Oaxaca	45.39	76.15	45.39	73.85	45.39	76.15
Puebla	45.39	72.31	45.39	72.31	45.39	71.54
Tlaxcala	45.39	78.46	45.39	59.23	45.39	78.46

Fuente: elaboración propia

Figura 5. Distribución del puntaje obtenido en función de Tipo de secundaria (izquierda) y nivel de marginación del municipio (derecha)



Fuente: elaboración propia

A partir de la información antes presentada, se puede observar que, mediante su proceso de selección, la UACH sigue impactando en el sector rural del país. Al seleccionar estudiantes de grupos vulnerables, provenientes de comunidades del medio rural y marginadas, y ofrecerles educación de nivel medio superior (preparatoria) de alta calidad, busca que las innovaciones científicas y tecnológicas lleguen oportunamente a estas regiones, generando así, una mejora en la calidad de vida de estos sectores de la población, lo que le permite contribuir al desarrollo soberano, sustentable e incluyente del país (PDI, 2009-2025).

Resultados en conocimientos matemáticos y habilidades numéricas

En los registros históricos de la Subdirección de Administración Escolar (SAE), se observa que los dos primeros semestres de cada ciclo son los de mayor riesgo de deserción escolar. Las asignaturas que presenta el mayor número de reprobados son Álgebra I y II, Agronomía I y II, Introducción a las Ciencias y Experimentales y Física I (Gaceta Universitaria Numero uno, 2018). Este hecho, en conjunto con otros problemas (emocionales, familiares, personales, académicos), originan una tasa de deserción escolar que supera el 40% (Coronado G. 2024).

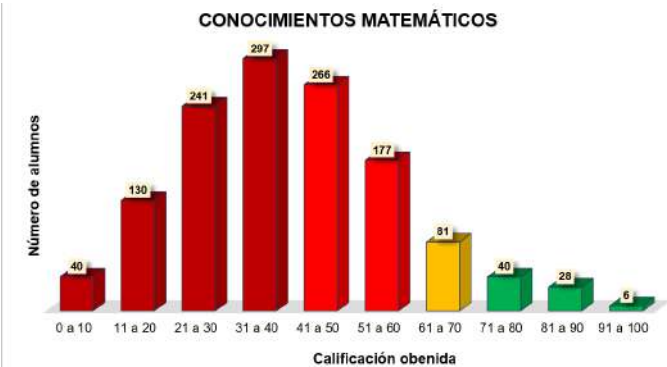
Para el caso de la asignatura en matemáticas, se emplearán los resultados obtenidos en conocimientos matemáticos y habilidades matemáticas como herramienta que permitirá identificar algunas de las características académicas de la población de nuevo ingreso, particularmente, los conocimientos aritméticos previos y el razonamiento para resolver problemas aplicados. Con esto se busca que, autoridades y profesores generen estrategias que impacten en la formación del estudiante.

Para la parte del examen del año 2025, denominada *conocimiento matemático*, se evaluaron los temas *aritméticos* de: porcentajes, regla de tres, mínimo común múltiplo, suma de fracciones heterogéneas y jerarquía de las operaciones. Referente a la parte **algebraica**, este examen evaluó

los temas de: lenguaje algebraico, productos notables, ecuación lineal y cuadrática. Dichos temas están considerados en los Programas Analíticos de primero, segundo y tercero de secundaria (https://libros.conaliteg.gob.mx/secundaria_2024.html).

La calificación mínima en *Conocimientos matemáticos* fue de 0, la máxima de 100. Existieron 9 estudiantes que obtuvieron 0 de calificación y 6 que lograron el 100. Así mismo, 1151 (88.1%) estudiantes obtienen una calificación menor o igual a 60. La distribución de las calificaciones se presenta en la figura 6.

Figura 6. Distribución de las calificaciones en conocimientos matemáticos para el examen de selección 2025



Fuente: elaboración propia

Para esta variable, se realizó un análisis para las variables: Género, Modalidad de Secundaria y Marginación del municipio, se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 4. Distribución de las calificaciones en razonamiento matemático. Las dos últimas columnas contienen parámetros de centralidad (mediana) y variabilidad (desviación estándar),

	Calificación			Centralidad	Variabilidad
	0-59	60 a 70	71 a 100	Mediana	DE
Género					
Mujer	454	108	28	40	17.39
Hombre	520	150	46	40	18.36
Modalidad de secundaria					
Comunitaria	11	2	0	40	15.81
General	249	73	28	40	19.49
Técnica	292	62	13	40	16.75
Técnica Indígena	7	2	0	30	19.01
Telesecundaria	415	119	33	40	17.37

Marginación del municipio					
Muy baja	160	43	27	40	20.70
Baja	168	44	10	40	17.65
Media	230	69	16	40	17.86
Alta	303	78	15	40	16.71
Muy alta	113	24	6	40	16.70

Fuente: elaboración propia

La información de la tabla 4., nos muestra que, 974 (74.58%) estudiantes no cuentan con los conocimientos mínimos necesarios para iniciar el curso de Matemáticas I (Álgebra I) ofertado en el primer semestre de la Preparatoria Agrícola. Este hecho los pone en situación de riesgo de reprobar la asignatura correspondiente.

De manera análoga, se hizo un análisis de la calificación obtenida en la parte de Habilidades Numéricas. La calificación mínima fue de 16.67, la máxima de 100. La mediana de 53.33. Se observó que 779 (59.65%) estudiantes obtuvieron un resultado menor a sesenta, 325 (24.88%) tienen una calificación entre sesenta y setenta, y los restantes 202 (15.47%) oscilan entre setenta y cien.

CONCLUSIONES

El reto para estudiantes, docentes y administración, es importante, ya que, aproximadamente el 75% de la población necesitará apoyo para continuar con su educación. En el caso concreto de conocimientos matemáticos, 1151 carecen del 60% de los temas aritméticos esenciales, esto impactará fuertemente en su formación académica. Recordar que, la teoría del Aprendizaje señala que, para adquirir, de forma efectiva, los nuevos conocimientos, es esencial contar con una base sólida en los conocimientos previos, Ausubel, (2009), Bellido y Cruz (2020). Dentro de los procesos cognitivos, el nuevo conocimiento requiere estar ligado (anclarse) con los conceptos ya existentes, si los puntos de unión son débiles, incompletos o inexistentes, el nuevo conocimiento no tendrá dónde fijarse y será más difícil de comprender y recordar, lo que podría conducir al aprendizaje mecánico y superficial, Mello et. al. (2019). Pero el problema es más complejo puesto que, tener deficiencias en alguna etapa del aprendizaje generan nuevas deficiencias en etapas posteriores, además, aquellos estudiantes que tienen deficiencias en conocimientos previos, requerirán mayor tiempo y esfuerzo para entender los conocimientos previos, asociarlos con los nuevos y entender estos últimos.

El análisis de la información mostró que, los estudiantes que provienen de secundaria comunitaria o Técnica Indígena, tienen mayores deficiencias en conocimientos previos, particularmente en matemáticas, lo que los deja en riesgo alto de reprobar alguna de las asignaturas del primer semestre.

El camino que los estudiantes están por recorrer no es sencillo, sin embargo, no deben recorrerlo solos, es indispensable que sean acompañados por profesores(as), pero también, es de

vital importancia que la administración de la institución genere las condiciones que les permita a los estudiantes continuar el trayecto. Se deben crear cursos remediales, cursos de nivelación, asesorías de pares, talleres sobre resolución de problemas, talleres sobre técnicas de estudio, talleres de gestión y manejo del tiempo. Además de lo anterior, crear nuevos espacios (y fortalecer a los ya existentes) en los que se brinde apoyo emocional a estudiantes (autoestima, ansiedad, depresión, manejo de ira, etc.). Adecuar sus planes de estudio para que, asignaturas con problemas (matemáticas) puedan tener más clases (horas) por semana, esto extendería el tiempo que se le dedica a revisar los conceptos básicos. Finalmente, pero no menos importante, incrementar e incentivar la capacitación de sus docentes, no solo en su campo disciplinar, sino también en la docencia, buscando que las y los profesores ajusten sus métodos de enseñanza a las necesidades de los estudiantes, lo que impactaría positivamente en la calidad educativa que oferta la institución, en el rendimiento académico de las y los estudiantes y se garantiza una educación innovadora, inclusiva y efectiva.

LITERATURA CITADA

- Ausubel, D.P., Novak, J.D., Hanesian H. (2009). Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo. México: Trillas.
- Arch, E. (2019). Obtenido de La importancia de las matemáticas en el desarrollo cognitivo: <https://docplayer.es/13838480-La-importancia-de-las-matematicas-en-el-desarrollo-cognitivo-ensayo-sobre-la-educacion-superior-dr-emilio-arch-tirado.html>
- Arellano-Esparza, C. A., & Ortiz-Espinoza, Ángeles. (2022), Educación media superior en México: abandono escolar y políticas públicas durante la covid-19. Iconos - Revista De Ciencias Sociales (74), 33-52. <https://doi.org/10.17141/iconos.74.2022.5292>
- Bautista-Jacobo, Alejandrina, Quintana-Zavala, María Olga, Vázquez-Bautista, Manuel Alejandro, & González-Lomeli, Daniel. (2023). Ansiedad, estrés y calidad de sueño asociados a COVID-19 en universitarios del noroeste de México. Horizonte sanitario, 22(2), 305-316. Epub 29 de enero de 2024.<https://doi.org/10.19136/hs.a22n2.5322>
- Bellido, M.E. y Cruz C.M. (2020). Aprendizaje significativo. En: M.E., Bellido (Ed.), Estrategias de enseñanza y aprendizaje. UNAM FES Zaragoza.
- Brito-Ortiz JF, Nava-Gómez ME, Juárez-García A. (2019). Escala de estrés percibido en estudiantes de odontología, enfermería y psicología: validez de constructo. Revista ConCiencia EPG 4(2):42-54. DOI: <https://doi.org/10.32654/concienciaepg>.
- Cámara de Diputados. LXI Legislatura (9 de diciembre de 2012). Gaceta Parlamentaria. Núm. 3158-VII. Palacio Legislativo de San Lázaro.
- CEPAL (2006). Hacia la ampliación del marco de análisis de la educación en el contexto del seguimiento de los objetivos de desarrollo del milenio. Santiago de Chile, 3 y 4 de agosto de 2006, CEPAL. Extraído el 15 de octubre de 2010, de http://www.eclac.org/dds/noticias/paginas/4/26284/Ernesto%20Espindola_1META.pdf. (2010). Panorama social de América

Latina. Santiago de Chile: Naciones Unidas-CEPAL.

- Coronado González J. (2024), Tesis de Doctorado en Ciencias en Educación Agrícola Superior. Departamento de Sociología Rural, Universidad Autónoma Chapingo <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/3da0b083-c94b-4b01-94fe-dfea0d0cf4b9/content>.
- Díaz Barajas D. Ruiz Olvera A. (2018). Reprobación escolar en el nivel medio superior y su relación con el autoconcepto en la adolescencia. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos* (México), vol. XLVIII, núm. 2, pp. 125-142.
- DOF (2020), Acuerdo por el que se establecen las medidas preventivas que se deberán implementar para la mitigación y control de los riesgos para la salud que implica la enfermedad por el virus SARS-CoV2 (COVID-19). 24 de marzo de 2020. Disponible en: www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5590339&fecha=24/03/2020#gsc.tab=0.
- Gallardo León F., Gutiérrez Chávez S. Espino Mandujano S. y Arreola Ramírez E (2019). 3 factores que inciden en la eficiencia terminal del alumno en la Escuela de nivel medio superior de Celaya. *Verano de la Ciencia*. 5.
- García, K. L., y Soto, S. P. (2014). Factores determinantes de la deserción tardía y la graduación en la Universidad de la Costa CUC [Tesis de Maestría]. Universidad de la Costa de CUC, Colombia. Repositorio de tesis posgrado [926].
- Hanushek, E. and L. Woessmann (2020), “The economic impacts of learning losses”, OECD Education Working Papers, No. 225, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/21908d74-en>.
- Hernández C., García E., & Mendoza, L. (2020). Calidad de la enseñanza y aprendizaje de las matemáticas en el nivel medio superior. *Revista Educación y Pedagogía*, 22(56), 251-265.
- Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación INEE (2013). *La Educación Media Superior en México*. 2ª edición. México.
- INEE (2019). Informe de resultados PLANEA EMS 2017. El aprendizaje de los alumnos de educación media superior en México. Lenguaje y Comunicación y Matemáticas. México: autor.
- Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación (INEE), (2019). ¿Qué hacen los planteles de educación media superior contra el abandono escolar? evaluación de la implementación curricular en educación media superior (EIC EMS). Informe complementario. INNE Editorial, primera edición. Ciudad de México, México: www.inne.edu.mx. Recuperado del 25 de marzo de 2022 <https://www.inee.edu.mx/wp-content/uploads/2019/08/P1D256.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, (2021). Inegi presenta resultados de la encuesta para la medición del impacto covid-19 en la educación (Ecovid-Ed) 2020. Comunicado de prensa núm. 185/2 1. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/OtrTemEcon/ECOVIED-ED_2021_03.pdf

- Larracilla Salazar, Némesis, Moreno García, Elena, & García Santillán, Arturo. (2019). Factores que explican la ansiedad hacia las matemáticas en estudiantes de Economía en México. *Investigación administrativa*, 48(124) Recuperado en 05 de febrero de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-767820190002000048lng-es&ting=es.
- Lorenzo Quiles O., Zaragoza Loya J., (2014). Educación Media y Superior en México: análisis teórico de la realidad actual. *DEDiCA: REVISTA DE EDUCACIÓN Y HUMANIDADES*.
- Mello Román, Jorge Daniel, & Hernández Estrada, Adolfo. (2019). Un estudio sobre el rendimiento académico en Matemáticas. *Revista electronica de investigación educativa*, 21, e29. Epub 15 de abril de 2020. https://doi.org/10.24320/redie.2019.21_e29.2090
- MIRANDA LOPEZ 2018, Francisco. Abandono escolar en educación media superior: conocimiento y aportaciones de política pública. *Sinéctica [online]*. n.51, 00010. ISSN 2007-7033. [https://doi.org/10.31391/s2007-7033\(2018\)0051-010](https://doi.org/10.31391/s2007-7033(2018)0051-010).
- Muñoz, C., Rodríguez, P. G., Restrepo, P., y Borrani, C. (2005). El síndrome del atraso escolar y el abandono del sistema educativo. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*, 35(3-4), 221-285. <https://www.redalyc.org/pdf/270/27035407.pdf>
- Necochea, Y., Nervi, Ch., Tuesta, V., Olazabal, L., Rodríguez, J., Gastelo, A., y León-Jiménez, F. (2017). Frecuencia y características del abandono estudiantil en una escuela de Medicina de Lambayeque, 2006-2014. *Revista Médica Heredian*, 28(3), 171-177. <https://doi.org/10.20453/rmh.v28i3.3184>
- OCDE (2010). Informes en [http:// quipu/informes.html](http://quipu/informes.html); <http://www.educacion.gob.es/creade/IrASeccionFront.do?id=132y> <http://www.siteal.iipe-oei.org/perfiles/países>.
- OECD (2017), Development Co-operation Report 2017: Data for Development, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/dcr-2017-en>.
- Plan de Desarrollo Institucional (PDI) 2009-2025, (2009). Universidad Autónoma Chapingo. Disponible en: https://upom.Chapingo.mx/descargas/departamento_planeacion/pdi_2009_2025.pdf
- Pérez Hernández, D. L. Morales Pulido, M. 1. Garfias Sánchez, J C. & Sánchez Rayas F (2023). Efectos de la pandemia por Covid-19 en las actividades académicas de estudiantes de Nivel Medio Superior. *Transdigital*, 4(7), 1-16. <https://doi.org/10.56162/transdigital2034>.
- 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/>.
- Rodríguez, J. L. (2021). Los estudiantes adolescentes sufren los efectos de un largo año de pandemia. *Theconversation*: <https://theconversation.com/los-estudiantes-adolescentes-sufren-los-efectos-%20de-un-largo-ano-de-pandemia-156177>

- Sánchez-Escobedo, Py Rivero-Morales, A. (Eds.) (2024). Temas Emergentes en la Educación Superior. CDMX: Asociación Iberoamericana de Docencia Universitaria. Alemán Suarez, Jorge Darío. Copado Bueno, Fernando. Martínez Gómez, Gladys. Palmeros Rojas, Oscar. (2024). Capítulo 7. Problemas de los alumnos para atender las actividades académicas, durante la pandemia de COVID 2019 y sus repercusiones.
- Sánchez L., López A. (2018). Factores que influyen en el rendimiento académico en matemáticas de los estudiantes del nivel medio superior. *Revista de Investigación Educativa*, 36(2), 408-424.
- SEP (2022) Principales Cifras del Sistema Educativo Nacional (SEN), cíclicos escolares: 2018-2019 a 2021-2022. http://www.planeacion.sep.gob.mx/Doc/estadistica_e_indicadores/principales_cifras/principales_cifras_20202021_bolsillo.pdf
- UNESCO (2005). Las Tecnologías de la Información y la Comunicación en la Enseñanza, Manual para docentes o cómo crear nuevos entornos de aprendizaje abierto por medio de la tecnología, UNESCO.
- UNICEF (2020). E impacto del COVID-19 en la salud mental de adolescentes y jóvenes. U-Report. <https://www.unicef.org/lac/el-impacto-del-covid-19-en-la-salud-mental-de-adolescentes-y-jovenes#~:text=Un%20reciente%20sondeo%20realizado%20por%20de%20Latinoamérica%20y%20el%20Caribe&text=E1%20sondeo%20r,apido%20amplifico%20las,y%20territorios%20de%20la%20región>
- UACH - UPOM. (2021). Anuario Estadístico 2022, https://upom.chapingo.mx/descargas/estadisticas_institucionales/anuarios/anuario_2022pdf
- Vara A., Ramos Y., Sotelo A., Echeverría S., Serrano M., Vales J. (2012). Factores asociados al rezago en estudiantes de una institución de educación superior en México. *Revistas Iberoamericana de Educación Superior*, 3(7), 41-56.
- Villa Lever, Lorenza. (2014) Educación media superior, jóvenes y desigualdad de oportunidades. *Innovación educativa* (México, DF), 14(64), 33-45, Recuperado en 30 de enero de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-26732014000100004&Ing-es&Ing-es
- Weiss, E (2012). La educación media superior en México ante el reto de su universalización. *Archivos de Ciencias de la Educación*. En Memoria Académica. Disponible en http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/art_revistas/pr.5927/pr_5927.paf
- Zaratoga Martinez, Jesús, Memije Alarcón, Norma Yadira, & Ventura Ramos, Perla Elizabeth. (2023). Factores que inciden en la enseñanza-aprendizaje de las matemáticas en universitarios de Ciencias Economicas. *Mendive*. *Revista de Educacion*, 21(4) Epub 30 de diciembre de 2023.

Capítulo XVI

Rafael Zamora Linares¹, Enrique Armando Gómez Lozoya
y Donato Vázquez Juárez

El uso del celular como herramienta didáctica. El caso del área de física de la UACH

RESUMEN

Recientemente, incluyendo la pandemia por el COVID-19, se ha tenido un gran avance en el uso de la tecnología en el campo de la educación y del desarrollo del proceso enseñanza aprendizaje. Sabemos que los cursos a distancia, el uso de las TICS, las bibliotecas virtuales, recientemente el auge de la inteligencia artificial y los simuladores educativos en diversas áreas del conocimiento, son elementos interrelacionados en las carreras y cursos que conforman nuestra realidad educativa. 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 objetivo de este trabajo es obtener información relacionada con el uso del celular y el desarrollo del proceso de Enseñanza- Aprendizaje en particular, en el área de física de Preparatoria Agrícola, mediante el apoyo de información bibliográfica y de indicadores obtenidos por medio de entrevistas a docentes y alumnos del área de Física para socializar las **conclusiones**. En este sentido se muestran docentes que reconocen la potencialidad del celular como herramienta didáctica, y pretenden establecer un equilibrio del uso del celular de manera en tiempos de uso en el salón de clases y tiempos necesarios de omisión en su uso.

Palabras clave: Celular, herramienta didáctica, enseñanza, aprendizaje.

ABSTRACT

Recently, including the COVID-19 pandemic, there has been a great advance in the use of technology in the field of education and the development of the teaching-learning process. We know that distance courses, the use of ICTs, virtual libraries, recently the rise of artificial intelligence and educational simulators in various areas of knowledge, are interrelated elements in the careers

¹ Profesor Investigador.

Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 carretera México-Texcoco. Preparatoria Agrícola, Área de Física.
Correo: rzamoral@chapingo.mx, engomez@chapingo.mx, dvasquezj@chapingo.mx

and courses that make up our educational reality. The use of the cell phone concentrates on many of the properties of current technology, achieving with it, a great proximity to the tools of communication, education, economy, science, sports, etc. However, it can also be a great source of distraction that should be supervised and limited, at least in the classroom. The objective of this work is to obtain information related to the use of the cell phone and the development of the Teaching-Learning process in the Área of physics of Agricultural High School, through the support of bibliographic information and indicators obtained through interviews with teachers and students in the area of Physics to socialize the conclusions. In this sense, teachers recognize the potential of the cell phone as a teaching tool and intend to establish a balance between the use of the cell phone in terms of times of use in the classroom and necessary times of omission in its use.

Keywords: Cell phone, didactic tool, teaching, learning.

INTRODUCCIÓN

Recientemente, incluyendo el cercano periodo de pandemia por el COVID-19, se ha mostrado un gran avance en el uso de la tecnología en el campo de la educación y de manera particular para el desarrollo del proceso enseñanza aprendizaje.

Los cursos a distancia, el uso de las TICS, las bibliotecas virtuales y los simuladores educativos y el uso de la inteligencia artificial en diversas áreas del conocimiento, son elementos interrelacionados en los cursos que conforman nuestra realidad educativa.

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.

Por otra parte, se han tenido opiniones de compañeros profesores que indican que los celulares pueden ser de gran ayuda para el desarrollo de los cursos de Física. Se puede aprovechar el celular para obtener definiciones que afirmen o pongan en duda lo que expresa el docente. Se puede usar para complementar la información otorgada por el docente o por el texto considerado. También, puede utilizarse para hacer simulaciones como ejercicios de la asignatura, consultas bibliográficas alternas y en algunos casos, los alumnos hacen uso de la inteligencia artificial para planeaciones o muestras de proyectos relacionados con lo considerado en clase.

Objetivos

General: Analizar el uso del celular en el proceso de Enseñanza- Aprendizaje, mediante información bibliográfica y de indicadores obtenidos por medio de entrevistas a docentes y de Física para identificar las ventajas y desventajas de este dispositivo.

Particulares:

- Realizar una Revisión Bibliográfica relacionada con el uso del celular en el salón de clases

- Entrevistar a docentes en relación con el uso del celular en el salón de clases
- Reconocer la situación del uso del celular en el área de Física de Preparatoria Agrícola de la UACH.
- Ejemplificar el uso del celular con un ejercicio práctico

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trata de un estudio de caso, en una investigación 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)) . En este trabajo usamos como herramientas metodológicas a datos institucionales, respuestas de cuestionario, observaciones y opiniones sobre el tema del uso del Celular en el salón de clases. Este instrumento se aplicó al final del semestre, Julio-diciembre de 2024 en el área de inscripción. La elaboración de este cuestionario responde a los temas que han abordado los temas de la investigación sobre el uso de los celulares en el salón de clases.

Desarrollo metodológico

1. Nos enfocamos en buscar referentes bibliográficos en donde el uso del celular como herramienta educativa era el centro de la investigación.
2. Se aplicó una entrevista con una guía en donde se pregunta sobre el celular 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. Se expone un ejemplo de aprovechamiento del uso del celular en una práctica de cinemática.
4. Finalmente se ordena y clasifica la información obtenida y se hacen las conclusiones respectivas.

Marco teórico

Hablando del uso del celular como herramienta didáctica (Rodríguez. K (2022)) menciona que hacer uso de la tecnología para incidir en los procesos educativos es importante e interesante y retador para los docentes y que en la época de la pandemia el uso de este tipo de tecnología creció de manera extraordinaria. Se habla de las ventajas del celular como:

- Buen uso de la tecnología
- Aprovechamiento de buen uso del Internet para hacer tarea con mayor flexibilidad
- Se puede Investigar, hacer con ayuda del docente, simulaciones de casos específicos.

Hablando de los procesos de enseñanza y aprendizaje relacionada con las tecnologías de la información y las comunicaciones, han posibilitado la Innovación de todo el contexto educativo dentro y fuera del salón de clases.

El uso del celular en la escuela tiene ventajas y desventajas educativas, sociales y de seguridad. El celular 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. Se conoce como phubbing a la acción de prestar más atención al móvil que a las personas que le están acompañando (incluyendo al profesor). ¿Qué uso se le puede dar al Celular en el aula? Se reconoce que tenemos elementos a favor y en contra de su uso.

Ventajas

- 1.-Permite la búsqueda de información. Relacionada con el tema en cuestión
- 2.-Facilita el uso de herramientas educativas y tecnológicas como realidad aumentada, actividad interactiva o lecturas.
- 3.-Funciona como registro de actividades, planificación de tiempos de estudio y de tareas.
- 4.-Permite tomar fotos y videos (y editarlos), lo cual es útil para ilustrar trabajos y presentaciones
- 5.- Permite la lectura de noticias
- 6.-Funciona como diccionario y traductor
- 7.-Funciona como cronometro

Desventajas

1. Distracción
2. Disminución del rendimiento académico
3. Problemas de Conducta
4. Desigualdad en el acceso tecnológico.

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)

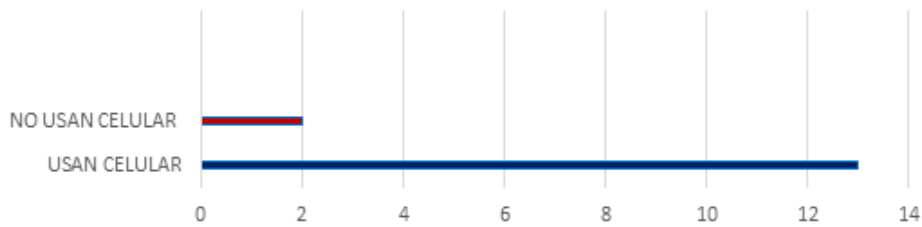
En los últimos años la sociedad ha avanzado en el área de la tecnología y particularmente en el proceso de enseñanza aprendizaje. En este sentido el estudiante se convierte en mayor protagonista, aunque el docente no debe ser ajeno en el entendimiento y manejo de estas herramientas tecnológicas. La teoría del aprendizaje constructivista con significado y aprendizaje situado, promueven el uso de las TICS. (Romero, T 2023)

Es claro que el celular se ha convertido en la herramienta favorita de los alumnos y que el trabajo escolar tiene a este dispositivo electrónico como el principal compañero. Adicionalmente el uso de la inteligencia artificial ha acelerado el trabajo del alumno y de equipos pequeños de trabajo en el salón de clases. Tareas, proyectos simulaciones, datos bibliográficos, experimentos son cercanos al uso del celular.

RESULTADOS

- 1. Ante el cuestionamiento para profesores de que si usa el celular en el salón de clases, 13 dijeron que sí, pero 3/ 15 comentaron que no lo hacen y solo en ocasiones lo ocupan para revisar algún dato.

Gráfica 1: Uso del celular por el Profesor

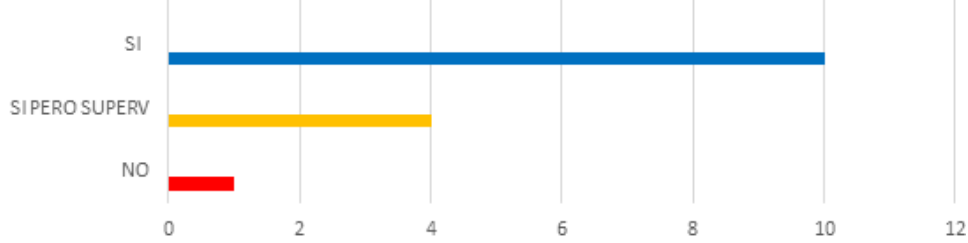


Fuente: Elaboración propia

Se puede interpretar que el uso del celular es un evento amplio e importante y muy socorrido en el campo educativo.

- 2. En la pregunta ¿Permite el uso a los alumnos en el salón de clases? Se destaca que sólo un compañero comento que no lo permite, 4 compañeros comentan que lo permite bajo su supervisión y 10 compañeros indican que permiten su uso al buscar información relacionada con lo que se está viendo o trabajando el salón de clases

Gráfica 2: Permite el uso del celular a alumnos en el salon



Fuente: Elaboración propia.

La mayoría de los docentes han compartido que permiten el uso del celular para tener apoyo en el desarrollo de los cursos, por ejemplo, en buscar información complementaria. Reconocen también, la necesidad de tener una supervisión para que el celular no se vuelva una distracción.

- 1. En la interrogante de ¿aprovecha las funciones del celular como herramienta para el desarrollo de los cursos?

Todos los docentes respondieron que Si

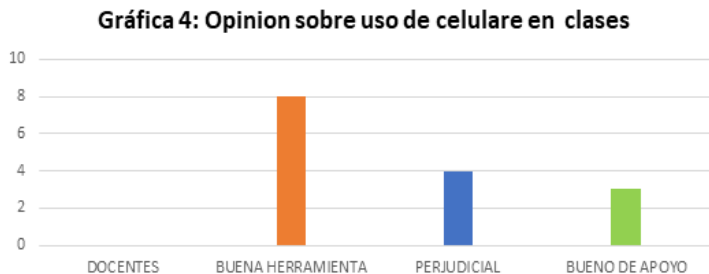
- 2. Conoce usted, ¿Cómo aprovechar al Celular para buscar y observar ejercicios, simulaciones y ejemplos relacionados con la temática de los contenidos? La respuesta de los compañeros docentes fue: 2 compañeros respondieron que no y 2 compañeros que un poco y 11 compañeros comentaron que, si conoce, Gráficamente:



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, la mayoría de los profesores tienen familiaridad con los celulares, sin embargo, se reconoce que aún falta tener un dominio mayor sobre lo que nos proporciona el celular para usarlo como herramienta educativa.

- 3. En la pregunta relacionada a si el día del examen ¿se permite el uso de celulares? La respuesta unánime fue que no, dado que no se permite circular la información de la respuesta del examen.
- 4. En cuanto a la opinión que se tiene sobre el uso de celulares. Resalta (por 10 personas) el que puede ser provechoso, pero requiere supervisión del docente y es importante que el docente tenga experiencia en su uso.



Fuente: Elaboración propia.

Los docentes reconocen la vigencia de los celulares. Es claro que con el buen uso de estos se tiene acceso a una buena parte de las herramientas de la educación, desde el uso de la inteligencia artificial, hasta lecturas complementaria y la socialización de información por arte de los integrantes de grupos académicos.

Ejemplo de experimentos usando el celular. Aunque se tienen muchos ejemplos para demostrar su valía e importancia como herramienta didáctica, se pone un ejemplo de Cinemática

Actividad experimental

Movimiento rectilíneo acelerado (MRUA)

Objetivos

- 1 Usar la tecnología de grabación del celular para obtener información de la posición y del tiempo de un cuerpo con aceleración constante
- 2 Reconocer el grafico de un movimiento rectilíneo con aceleración constante

Teoría: Se introducirá el alumno al Movimiento Uniformemente Acelerado

Material:

Carro dinámico

Riel para el carro dinámico

Celular

Procedimiento

- 1 El riel de 120 cm se colocó con un desnivel de 1.8 cm de altura
- 2 De la parte más alta del riel inicio el movimiento el carro
- 3 Usando el celular se tomó un video del movimiento del carro
- 4 Se seleccionaron 11 imágenes (cuadros) del video. Los cuadros se seleccionaron con una distribución en el tiempo considerando el total del recorrido
- 5 El ajuste del celular para la grabación del video fue de 60 cuadros por segundo
- 6 Se muestran unas imágenes del recorrido

Se muestra el inicio del movimiento del carro dinámico. La marca 0 cm, en la regla de madera, es el origen de coordenadas del sistema



Imagen 1.-Elaboración propia

El carro se encuentra en la marca 10.0 cm y corresponde a un tiempo de recorrido de 0.68s



Imagen 2.-Elaboración propia

El carro se encuentra en la marca 50.0 cm y corresponde a un tiempo de recorrido de 1.62s



Imagen 3.-Elaboración propia

El carro se encuentra en la marca 107 cm y corresponde a un tiempo de recorrido de 1.78s



Imagen 4.-Elaboración propia

Resultados de este ejemplo:

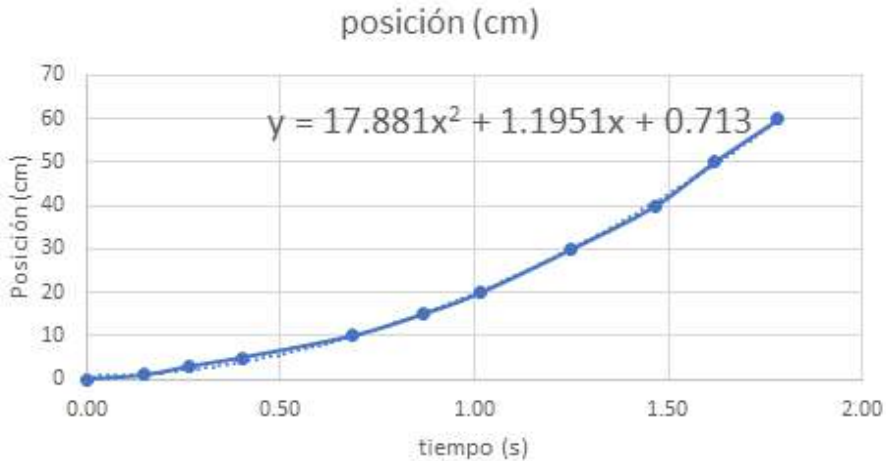
Las medidas de posición para el carro a diferentes tiempos se muestran en la tabla 1

Tabla 1 Construcción Propia

Cuadros totales	Tiempo (s)	Posición (cm)
0	0.00	0
9	0.15	1
16	0.27	3
24	0.40	5
41	0.68	10
52	0.87	15
61	1.02	20
75	1.25	30
88	1.47	40
97	1.62	50
107	1.78	60

La grafica de estos datos se muestra a continuación:

Grafica de Experimento Propuesto



Fuente: Elaboración propia.

Análisis

- 1 en la gráfica se observa que el carro sigue un movimiento acelerado
- 2 al usar Excel para ajustar la gráfica a una ecuación cuadrática el primer coeficiente del término cuadrático que se obtiene es 17.8.
- 3 Al comparar la ecuación de ajuste con la ecuación $d = V_i t + \frac{1}{2} a t^2$ se obtiene que la aceleración es aproximadamente de 35.6 cm/s^2

CONCLUSIONES

El uso de celulares es un buen ejemplo de herramientas didácticas con un buen potencial para mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje.

Los docentes del área de Física de la Preparatoria Agrícola de la UACH reconocen la importancia del uso del celular y lo toman en cuenta para que los alumnos socialicen y amplíen su información que se obtienen en clases presenciales.

Los profesores reconocen que el uso del celular requiere de una supervisión para que no se tengan distracción de los objetivos planteados en el desarrollo de los contenidos educativos.

Se requiere que los docentes aprovechen la potencialidad del celular y trabajen con los experimentos tradicionales y los relacionen con las formas de presentar resultados, gráficas y esquemas que nos permite este instrumento electrónico.

El ejemplo mostrado del uso del celular en el desarrollo de los cursos, nos da una idea de aplicaciones constructivas y de acercamiento didáctico.

LITERATURA CITADA

- Herrera P. (2025) Celulares en las Aulas: ¿Herramienta Educativa o Distracción? UNAM. México.
- Pascuas R (2020) Dispositivos Móviles en la Educación: Tendencias e Impacto para la Innovación. Universidad de la Amazonia. Florencia Colombia
- Rodríguez K. (2022) El uso de Celulares como Herramienta Educativa. Milenio. México
- Romero. D.T (2023) Uso de las TIC en la Enseñanza de la Física en la Secundaria de Nicaragua. Universidad Autónoma de Nicaragua. Nicaragua.
- San Pieri, R (2014). Metodología de la Investigación. MC Graw Hill. México

Consejo Arbitral	
Ph. D. Rebeca Alejandra Pérez Figueroa	Dr. Roberto Arpi Mayta Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú
Dra. Martha Marivel Mendoza Ontiveros Universidad Autónoma del Estado de México	Dr. Edmar Salinas Callejas UAM-Azcapotzalco
PhD Miguel Ángel Martínez Damián Colegio de Postgraduados	Ph. D. Alberto Gallegos David Universidad Autónoma Chapingo
Dra. Ma. Teresa Pérez Soto Universidad Autónoma de Morelos	PhD Lorenzo Irineo López Cruz Universidad Autónoma Chapingo
Dr. Gerónimo Barrios Puente Universidad Autónoma Chapingo	Dra. Laura Elena Garza Bueno Colegio de Postgraduados
PhD Pablo Emilio Escamilla García Instituto Politécnico Nacional	

Modelos de respuesta en prácticas agrícolas
Se editó en el Departamento de la División de Ciencias
Económico Administrativas de la UACH, carretera
México-Texcoco, km 38.5, Texcoco Edo. de México,
C. P. 56230
Octubre 2026
<https://dicea.chapingo.mx/investigacion/ciema/publicaciones/>

Los daños mecánicos ocasionados por impacto en frutas y hortalizas varían en función de las características de las superficies en contacto. En las líneas de manipulación los impactos se producen sobre las superficies de las máquinas, las cuales presentan diferentes materiales (acero, amortiguadores de golpes, entre otros). Las características de dichos materiales influyen notablemente en la aparición de magulladuras (García, 2000). Los daños por golpes inicialmente no son visibles, pero pueden estropear la apariencia y varios parámetros fisicoquímicos, disminuyendo la calidad y el peso, provocando a su vez pérdidas económicas considerables (Martínez, 2003). Se estima, según estudios reportados (Kader, 2002; Wills y Golding, 2016) que la pérdida de producto por daño mecánico es de 12% de la producción total. Por lo tanto, lograr la reducción del daño mecánico durante la manipulación de las frutas y hortalizas constituye una tarea importante. Para inferir cambios postcosecha en los productos agrícolas, se utilizan técnicas matemáticas como el análisis estadístico y la modelización, incluyendo métodos como el de elementos finitos (MEF) (Sadri et al., 2008), el cual ha evolucionado en un corto periodo en comparación con otros procedimientos de análisis. La simulación permite solucionar sistemas complejos de ingeniería, trayendo como consecuencia que los análisis numéricos y en especial el Método del Elemento Finito tengan un gran auge en la actualidad (Fernández et al., 2013). Su impacto ha sido tal que ha revolucionado la forma de diseñar en la actualidad (Silvestre, 1998). Diversos estudios (Kabas et al., 2008; Jamal et al., 2005) han demostrado la efectividad de dicho método numérico en el campo de la Ingeniería Agrícola (Rashvand et al., 2022; Ahmadi et al., 2016).