



**AgrobiotecNM**



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
CAMPUS EL LLANO AGUASCALIENTES



*“La tecnología al servicio de la agricultura para apoyar la seguridad agroalimentaria de México.”*

*Revista: Año 3, Volumen 1.  
ISSN:2992-8222*



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®



**ITTEL**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO EL LLANO  
AGUASCALIENTES



AgrobioTecNM es una Revista de publicación anual, se autoriza su reproducción total o parcial. Año de inicio de publicación: Diciembre 2023. ISBN: 2992-8222.

## DIRECTORIO

**MARIO DELGADO CARRILLO**  
*Secretaría de Educación Pública*

**RICARDO VILLANUEVA LOMELÍ**  
*Subsecretaría de Educación Superior*

**RAMÓN JIMÉNEZ LÓPEZ**  
*Tecnológico Nacional de México*

**CRISTHIAN TORRES MILLAREZ**  
*Director del Instituto Tecnológico El Llano  
Aguascalientes*

**JOSÉ MARTÍN CARLOS PÉREZ**  
*Subdirector Académico*

**JOSÉ MANUEL MARTÍNEZ MIRELES**  
*Subdirector de Servicios Administrativos*

**GABRIELA JAIME CARACHURE**  
*Subdirectora de Planeación y Vinculación*



## CONSEJO EDITORIAL

Presidente: Cristhian Torres Millarez

Secretario Técnico: José Martín Carlos Pérez

Comunicación y Difusión: Ana Sofía Ocampo Olivares e Isabel de Velasco Reyes (División de Estudios de Posgrado e Investigación)

### MIEMBROS DEL COMITE EDITORIAL

#### Área I: Ciencias Pecuarias

Dra. Leticia E. Medina Esparza (ITEL), Dra. Mónica González Reyes (ITEL), Dr. Carlos R. Cruz Vázquez (ITEL), Dra. Irene V. Vitela (ITEL), Dr. Ignacio Mejía Haro (ITEL), Apolinar Velarde Martínez (ITEL).

#### Área II: Biotecnología de plantas y alimentos

Dr. Catarino Perales Segovia (ITEL), Dra Silvia Flores Benítez (ITEL)  
Dr. Héctor Silos Espino (ITEL), Dr. Luis L. Valera Montero (ITEL)  
Dr. Juan Florencio Gómez Leyva (ITTJ), Dr. Arturo Moisés Chávez Rodríguez (ITTJ).  
Irma G. López Muraira (ITTJ), Vania Sbeyde Farías Cervantes

#### Área III: Recursos naturales

Dr. Héctor Flores Martínez (ITTJ), Mayra I. Montero (ITTJ)  
Dr. Miguel Angel Segura Castruita (ITTJ), Dr. Adrián Gómez González (C. P.)

#### Área IV: Agronegocios

Dr. Ramón Fabio Ramirez Báez (ITEL)

Responsable de la edición: Dr. Héctor Silos Espino.

## LISTA DE REVISORES AGROBIOTECNM 3(1)

NOMBRE	INSTITUCION
Apolinar Velarde Martínez Pamela Rodríguez Romo	TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Mex. TecNM-Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, Méx.
Adrián Gómez González Pedro Antonio García Saucedo	Colegio de Posgraduados Campus San Luis Potosí, Méx. Facultad de Agronomía, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, Méx,
Nicolás González Cortes	Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Tabasco, Méx.
María Daniela Ortiz Robles Mónica González Reyes Esaú Ruiz Sánchez Pedro Salvador Morales Víctor Arturo Maldonado Ruelas Nibia Escalante García	TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Mex. TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Mex. TecNM-Instituto Tecnológico de Tizimín, Yucatán, Méx. TecNM-Instituto Tecnológico Chiná de Campeche, Méx. Universidad Politécnica de Aguascalientes. TecNM-Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, Mex.
Fernando Días Saucedo José Martín Carlos Pérez Jorge Luis González Escobar	TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Mex. TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Mex. TecNM-Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, San Luis Potosí, Mex.
Silvia Flores Benítez Ignacio Garay Peralta Juan Bernado Velázquez Montoya	TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Mex. TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Mex. Universidad del Bienestar Benito Juárez de Asientos, Aguascalientes, Méx.
Héctor Silos Espino Raúl Arturo Ortiz Medina José Antonio González Gutiérrez	TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Mex. Universidad Politécnica de Aguascalientes, Méx. Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos de Calvillito, Aguascalientes, Méx.
José de Jesús Alvarado Esquivel	Centro Integral de Terapia Alternativas A, C. y Clínica Azteca, Aguascalientes, Méx.

<b>ÍNDICE.</b>	<b>Página</b>
<b>SECCION: BIOTECNOLOGIA DE ALIMENTOS</b>	
Efecto comparativo de sustratos a base de bacal y pasto en el rendimiento productivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> .	10
Composición química y actividad antioxidante de extractos de hongos y plantas.	16
Hongos de mayor producción y consumo en países asiáticos: revisión.	24
Panorama de la molienda de alta energía como alternativa sostenible a la nixtamalización del maíz: revisión.	36
Efecto del mucílago de <i>Pereskia aculeata</i> Miller en la pérdida de peso y cambio de color de <i>Persea americana</i> Hass.	42
<b>SECCION: BIOTECNOLOGIA DE PLANTAS</b>	
Obtención de ADN genómico de chile yahualica para caracterización genotípica y conservación ( <i>Capsicum annuum</i> L.).	49
Parientes silvestres, la agrobiodiversidad de Aguascalientes, México.	58
Anotación de variaciones genéticas y predicción de efectos funcionales en accesiones de frijol.	66
Evaluación de la respuesta de accesiones de chayote ( <i>Sechium</i> spp.) a su establecimiento en condiciones de cultivo <i>in vitro</i> .	72
Tratamientos pre-germinativos y su efecto en semillas de cinco especies del género <i>Opuntia</i> .	77
Diversidad de cactáceas en el municipio de Cosío, Aguascalientes, México.	82
<b>SECCION: INNOVACION TECNOLOGICA</b>	
Variabilidad de la CE, pH y minerales en diferentes compostas orgánicas de bagazo de <i>Agave</i> .	91
Prototipo IOT para el monitoreo de variables ambientales y automatización de riego en cultivos de nopal.	102
Prototipo para el monitoreo de variables ambientales y riego automático en un huerto urbano mediante una app con soporte de internet de las cosas.	108
Estimación de coeficiente ambiental óptimo para el desarrollo y cultivo de chayote verde liso en Coscomatepec, Veracruz mediante instrumentación IOT.	115
Diseño de una plataforma para la gestión de parámetros críticos en estanques acuícolas.	127
Biodigestores, tecnología innovadora para reducir el impacto ambiental en unidades bovinas de sistema doble propósito.	135
Robot autónomo para la aplicación inteligente de tratamientos fitosanitarios en invernaderos.	140
Diseño y construcción mediante impresión digital 3D de un biorreactor de inmersión temporal para cultivo de tejidos vegetales.	150
<b>SECCION: TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION</b>	
Diez herramientas de inteligencia artificial para la implementación y seguimiento de programas académicos en la educación superior: revisión.	160

## SECCION: BIOTECNOLOGIA DE ALIMENTOS



## EFFECTO COMPARATIVO DE SUSTRATOS A BASE DE BACAL Y PASTO EN EL RENDIMIENTO PRODUCTIVO DE *Pleurotus ostreatus*.

[COMPARATIVE EFFECT OF BACAL AND GRASS-BASED SUBSTRATES ON THE PRODUCTIVE PERFORMANCE OF *Pleurotus ostreatus*]

Miguel Ángel Gómez Jiménez<sup>1</sup>, María Susana Acosta Navarrete<sup>2</sup>, Agueda Ma. Del Pilar Castillo-González<sup>3\*</sup>, María Del Rosario Baray Guerrero<sup>4</sup>, Reiner Rincón Rosales<sup>5</sup>

<sup>1</sup>TecNM-Chiná Campeche, Integrante de la Red Nacional de Producción e Investigación de Recursos Fúngicos del TecNM. <sup>2</sup>TecNM- Roque extensión Apaseo el Alto, Guanajuato. <sup>3</sup>TecNM- San Juan del Río, Querétaro. <sup>4</sup>TecNM- Delicias, Chihuahua. <sup>5</sup> TecNM- Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Autor de correspondencia: agueda.cg@sjuanrio.tecnm.

ORCID:0000-0002-5759-3690.

### Resumen

Este estudio analizó cómo distintos sustratos derivados de residuos agrícolas afectan la producción y morfología de *Pleurotus ostreatus*. La investigación se llevó a cabo entre octubre de 2023 y abril de 2025 en el Instituto Tecnológico de Chiná, Campeche, y se incluyó como parte de la Red Nacional de Producción e Investigación de Recursos Fúngicos del TecNM. Se evaluaron tres sustratos: S1 (100 % bacal), S2 (100 % pasto) y S3 (50 % bacal y 50 % pasto). El micelio se generó en medio PDA e inoculó en semilla de sorgo esterilizada bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. Los sustratos se mantuvieron entre 28 y 35.5 °C con humedad relativa de 72.1 ± 2.8 %, los primordios emergieron a los 20.5 ± 0.86 días. Se aplicó un diseño factorial 3×3, considerando tipo de sustrato y tiempo de cultivo, y los datos se analizaron mediante ANOVA y prueba de Tukey HSD al 95 % de confianza. Los resultados obtenidos en el estudio revelan que el sustrato S2 mostró el mayor rendimiento durante la primera cosecha, con un promedio de 1.83 ± 0.2 kg. Este sustrato fue seguido por S3, que alcanzó 1.53 ± 0.15 kg, y S1, con un rendimiento de 1.46 ± 0.2 kg. En cuanto a las características morfológicas, se observó que S1 y S3 presentaron tallos con una longitud promedio de 4.3 ± 0.95 cm y sombreros de 16.94 ± 2.38 cm. Por otro lado, el sustrato S2 generó tallos de menor longitud, alcanzando solamente 2.26 ± 0.76 cm, pero a su vez produjo sombreros de mayor tamaño, con un promedio de 20.6 ± 3 cm.

**Palabras clave:** *Pleurotus ostreatus*, bacal, pasto, rendimiento productivo.

### Abstract

This study analyzed how different substrates derived from agricultural residues affect the production and morphology of *Pleurotus ostreatus*. The research was conducted between October 2023 and April 2025 at the Instituto Tecnológico de Chiná, Campeche, and was included as part of the National Network for the Production and Research of Fungal Resources of TecNM. Three substrates were evaluated: S1 (100% bacal), S2 (100% grass), and S3 (50% bacal and 50% grass). The mycelium was generated in PDA medium and inoculated into sterilized sorghum seed under controlled temperature and humidity conditions. The substrates were maintained between 28 and 35.5 °C with a relative humidity of 72.1 ± 2.8%, and primordia emerged at 20.5 ± 0.86 days. A 3×3 factorial design was applied, considering substrate type and cultivation time, and data were analyzed using ANOVA and Tukey's HSD test at a 95% confidence level. The results obtained in the study revealed that substrate S2 showed the highest yield during the first harvest, with an average of 1.83 ± 0.2 kg. This substrate was followed by S3, which reached 1.53 ± 0.15 kg, and S1, with a yield of 1.46 ± 0.2 kg. Regarding morphological characteristics, it was observed that S1 and S3 presented stems with an average length of 4.3 ± 0.95 cm and caps of 16.94 ± 2.38 cm. On the other hand, substrate S2 generated shorter stems, reaching only 2.26 ± 0.76 cm, but at the same time produced larger caps, with an average of 20.6 ± 3 cm.

**Keywords:** *Pleurotus ostreatus*, bacal, pasture, productive yield.

## Introducción

La producción de setas comestibles ha ganado relevancia en los últimos años debido a su potencial nutraceutico y al enfoque hacia una agricultura sostenible. En este contexto, *Pleurotus ostreatus*, comúnmente conocida como seta ostra, ha sido objeto de estudio debido a su apreciado sabor y su notable composición química, que incluye compuestos bioactivos como glucanos, triterpenos y flavonoides. Estos componentes no solo enriquecen su valor nutricional, sino que también la posicionan como un alimento funcional con beneficios para la salud (Nieto & Chegwin, 2010; Castaño *et al.*, 2007). El cultivo de setas comestibles ha adquirido relevancia significativa, destacándose no solo por su valor culinario, sino también por su potencial nutraceutico y su aporte a prácticas de agricultura sostenible. Uno de los aspectos más importantes de *Pleurotus ostreatus* es su capacidad para degradar componentes estructurales de las plantas, tales como celulosa, hemicelulosa y lignina. Esta capacidad permite el cultivo de estas setas en una amplia variedad de residuos agrícolas, lo que facilita la bioconversión de desechos en productos comestibles. Este proceso no solo optimiza el aprovechamiento de recursos, sino que también contribuye a la reducción del impacto ambiental. En regiones como Chiapas, donde aproximadamente el 44 % de la producción agrícola se convierte en desechos (Arreaga *et al.*, 2024), el uso de residuos para la obtención de setas puede constituir una solución viable. El presente estudio tiene como objetivo el determinar cómo diferentes sustratos, específicamente basados en bacal y pasto, influyen en el rendimiento productivo y las características morfológicas de *Pleurotus ostreatus*. A través de la investigación de estas variables, se busca proporcionar información valiosa que pueda ser utilizada para fomentar prácticas de agricultura sostenible y mejorar la seguridad alimentaria en la región. La innovación en el uso de sustratos alternativos para el cultivo de setas no solo tiene implicaciones económicas, sino que también promueve la utilización responsable de los recursos y la mitigación de desechos, alineándose con los objetivos de sostenibilidad actuales.

## Materiales y métodos

### Sustratos

Se evaluaron tres formulaciones de sustratos: 100 % bacal (S1), 100% pasto (S2) y 50 % bacal con 50 % pasto (S3). Las esporas del hongo *Pleurotus ostreatus* se extrajeron y desarrollaron en medio Agar Papa Dextrosa (PDA), incubando a 26 °C durante 48 horas se genera el inóculo máster. Se preparó semilla de sorgo limpia mediante una hidratación con agua durante 12 horas, posteriormente se eliminó el exceso de agua y se embolsó en polietileno resistente a altas temperaturas, estas bolsas fueron esterilizadas en autoclave a 121°C por 15 minutos. Para inocular la semilla de sorgo se cortan trozos de 1 mm<sup>2</sup> de Agar Papa Dextrosa (PDA) en las zonas en donde se observa el desarrollo del micelio, generando el primer inóculo exponencial.

### Establecimiento del experimento.

Se trabajó con 30 repeticiones (unidades de producción) de cada una de las combinaciones de los sustratos S1, S2 y S3. Los sustratos fueron esterilizados a 72°C durante 1 hora, se dejaron enfriar y en bolsas de polietileno (60 cm x 80 cm) con capacidad de 8 kilos de sustrato se inocularon. Para el desarrollo del micelio en las unidades de producción, se mantuvieron en un rango de temperatura de 28 a 35.5 °C con una humedad relativa de  $72.1 \pm 2.8$  %, observándose los primordios a los  $20.5 \pm 0.86$  días post-inoculación.

### Análisis experimental

Se implementó un diseño factorial 3x3, considerando tipo de sustrato y tiempo de cultivo como factores principales. Las variables evaluadas fueron rendimiento de cosecha y dimensiones morfológicas del tallo y sombrero. Los datos se analizaron mediante ANOVA al 95 % de confianza y la prueba de Tukey HSD se empleó para comparar medias, utilizando Phyton y las librerías de acceso libre como Matplotlib para el análisis de datos

## Resultados y discusión

### Aparición de primordios

A los 25 días posteriores a la inoculación de las unidades de producción, se documentó el desarrollo y crecimiento de los primordios de *Pleurotus ostreatus*. Este basidiomiceto comestible exhibe un ciclo vital caracterizado por una fase vegetativa inicial, seguida por la formación de estructuras reproductivas denominadas cuerpos fructíferos.

La colonización del sustrato por el micelio se manifestó progresivamente durante los primeros días postinoculación, estableciendo una red de hifas que facilitó la asimilación de nutrientes. Bajo condiciones ambientales controladas (temperatura, humedad relativa y ventilación), se observó el inicio de la diferenciación de primordios al día 20, se caracterizó por la aparición de estructuras nodulares que marcan el comienzo de la fructificación (Figura 1 a).

### Tiempo de cosecha

Al alcanzar el día 25 de desarrollo, como se evidencia en la figura 1, los primordios presentaron un estado avanzado de maduración, manifestando la morfología característica de cuerpos fructíferos juveniles (Figuras 1 b,c,d). Estos se distinguieron por exhibir sombreros incipientes de forma convexa, una coloración grisácea homogénea y una disposición agregada en racimos. Esta etapa representa un punto crítico en el desarrollo del hongo, marcando la transición entre las fases vegetativa y reproductiva. Es importante señalar que dicha transición está condicionada por diversos factores ambientales, incluyendo la exposición a luz difusa, los niveles de dióxido de carbono y la composición nutricional del sustrato (Zhu *et al.*, 2019).

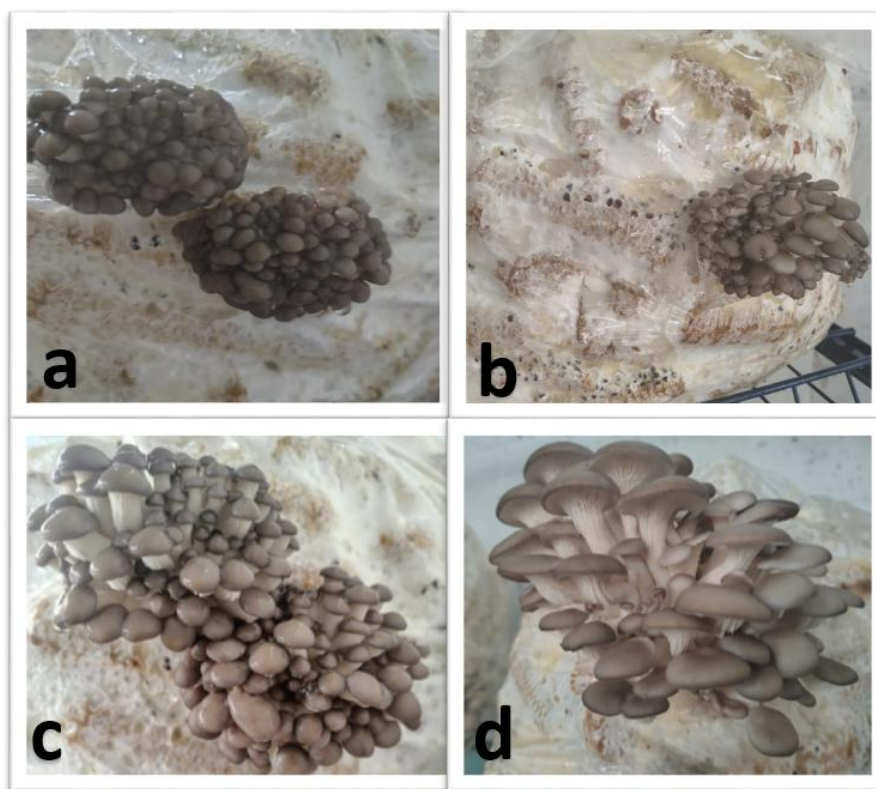


Figura 1. Crecimiento y desarrollo de los cuerpos fructíferos dentro de un sistema de producción. Donde 1 a estructuras nodulares; 1 b, c, d desarrollo de cuerpos fructíferos juveniles.

### Rendimiento por sustrato

El análisis de los datos de rendimiento demostró diferencias en la producción de hongos entre los sustratos evaluados. El sustrato S2 exhibió la mayor productividad durante la primera emergencia, alcanzando  $1.83 \pm 0.2$  kilogramos. En segundo lugar, se ubicó el sustrato S3 con una producción de  $1.53 \pm 0.15$  kilogramos, mientras que el sustrato S1 registró el menor rendimiento con  $1.46 \pm 0.2$  kilogramos. Los resultados presentados en el Cuadro 1 evidencian que la incorporación de pasto como sustrato tiene un efecto positivo sobre la productividad del cultivo de hongos. Donde: S1 (100 % bacal); S2 (100 % pasto) y S3 (50 % bacal + 50 % pasto) Promedio + DS. Análisis de Tukey HSD al 95 % de confianza.

Cuadro 1. Rendimiento de *Pleurotus ostreatus* según sustrato.

Sustrato	Rendimiento (kg)
S1	$1.46 \pm 0.2$ B
S2	$1.83 \pm 0.2$ A
S3	$1.53 \pm 0.15$ B

Los resultados morfológicos presentados en el Cuadro 2 revelan patrones distintivos en el desarrollo de las estructuras fúngicas. Se observó que los tratamientos S1 y S3 exhibieron características morfológicas similares, con tallos que alcanzaron dimensiones de  $4.3 \pm 0.95$  cm y sombreros con diámetros de  $16.94 \pm 2.38$  cm. En contraste, el tratamiento S2 manifestó un patrón de crecimiento diferenciado, caracterizado por tallos más reducidos ( $2.26 \pm 0.76$  cm) pero con sombreros de mayor envergadura ( $20.6 \pm 3$  cm). Esta variación estructural evidencia claramente la influencia diferencial que ejerce la combinación de sustrato del elote del maíz sobre la morfología del hongo. Donde: S1 (100% bacal); S2 (100% pasto) y S3 (50 % bacal + 50 % pasto) Promedio + DS. Análisis de Tukey HSD al 95 % de confianza.

Cuadro 2. Dimensiones morfológicas de *Pleurotus ostreatus* según sustrato

	Longitud del tallo (cm)	Diámetro del sombrero (cm)	Sustrato
S1	$4.3 \pm 0.95$ A	$16.94 \pm 2.38$ B	
S2	$2.26 \pm 0.76$ B	$20.6 \pm 3$ A	
S3	$4.3 \pm 0.95$ A	$16.94 \pm 2.38$ B	

Estos hallazgos son consistentes con la literatura científica existente, particularmente con investigaciones previas que han documentado la relación directa entre la composición del sustrato y el desarrollo morfológico de *Pleurotus ostreatus* (Infante *et al.*, 2016). Estos resultados sugieren que los sustratos con presencia de bacal, ya sea solo o en combinación con pasto, promueven una mayor elongación del tallo, posiblemente debido a diferencias en la textura, disponibilidad de nutrientes, o retención de humedad, en comparación con el sustrato exclusivamente compuesto por pasto como lo refleja la figura 1, sobre la correlación entre las variables de estudio. Esta variación morfológica podría estar relacionada con adaptaciones fisiológicas del hongo a las condiciones fisicoquímicas del medio.

## Conclusiones

Los resultados del análisis morfométrico de los cuerpos fructíferos revelan patrones diferenciados según el sustrato utilizado. En cuanto al diámetro del píleo, se evidenció una superioridad significativa en los hongos cultivados sobre sustrato de pasto, alcanzando aproximadamente 21 centímetros, en comparación con los desarrollados en bacal y la mezcla bacal-pasto, que presentaron dimensiones menores, cercanas a 17 centímetros. Esta diferencia notable sugiere que el sustrato de pasto proporciona condiciones más favorables para el desarrollo y expansión del sombrero, posiblemente debido a características específicas como una mayor retención de humedad o una mejor accesibilidad a nutrientes.

Por otra parte, respecto a la longitud del estípite, se observó una tendencia inversa. Los sustratos que contenían bacal, tanto en forma pura como en mezcla con pasto, produjeron tallos significativamente más largos, con una media de 4.4 centímetros, mientras que el sustrato de pasto generó tallos más cortos, de aproximadamente 3.0 centímetros. Este comportamiento diferencial podría atribuirse a las características estructurales del bacal, que posiblemente proporcionan un ambiente con mejor ventilación o una configuración física que estimula el crecimiento vertical del tallo.

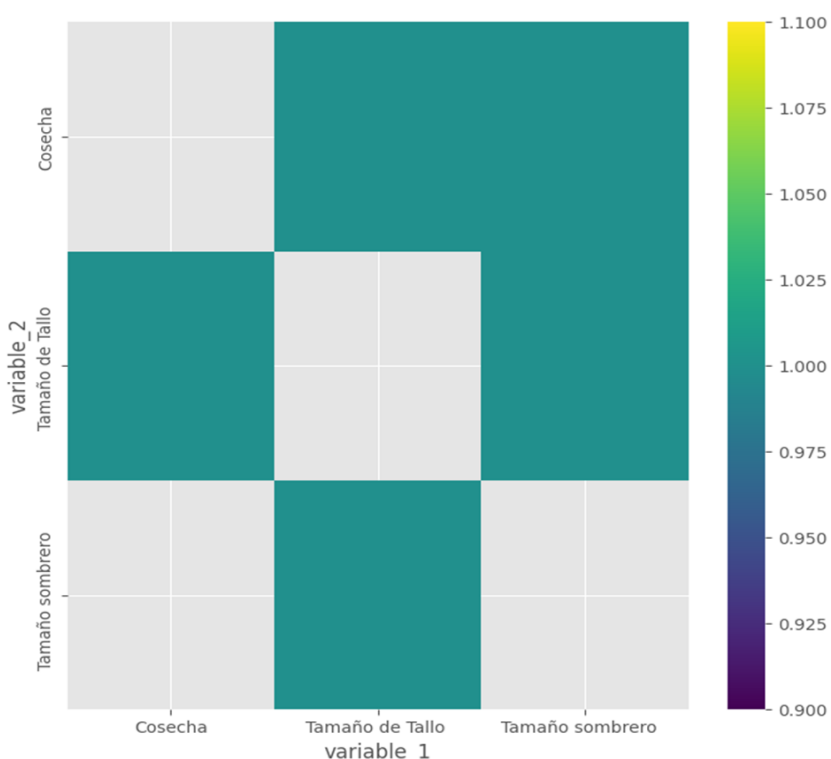


Figura 2. Correlación entre las variables evaluadas de tamaño de sombrero, tallo y rendimiento.

El tratamiento con pasto demostró una superioridad significativa en términos de producción, alcanzando un rendimiento de hongos ostra de aproximadamente 1.85 kilogramos. Este resultado fue notablemente superior en comparación con los tratamientos mixtos de bacal-pasto (1.55 kg) y el tratamiento exclusivo de bacal (1.48 kg). A pesar de que el sustrato de bacal mostró cierta influencia en las características morfológicas del cultivo, esto no se tradujo en una mejora estadísticamente significativa del rendimiento productivo. La evidencia sugiere que el pasto, como sustrato único, proporciona condiciones más favorables para el desarrollo del hongo, posiblemente debido a una mejor disposición de nutrientes y una capacidad superior de retención de humedad. Estos hallazgos son relevantes para la optimización de las prácticas de cultivo, indicando que el uso de pasto como sustrato principal podría ser la alternativa más eficiente para maximizar la producción de cuerpos fructíferos en este tipo de cultivo fúngico.

El análisis estadístico demostró que no existieron diferencias significativas entre los distintos tratamientos evaluados en cuanto al tiempo de aparición del primer primordio. Los datos registraron un promedio aproximado de 20.5 días para todos los tratamientos. Esta uniformidad temporal sugiere que la iniciación del desarrollo reproductivo en *Pleurotus* mantiene una relativa independencia del sustrato utilizado, señalando que los factores ambientales como la temperatura y la humedad podrían ejercer una influencia más determinante en esta etapa específica del desarrollo.

En contraste, la cuantificación del número de primordios evidenció diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El sustrato de bacal demostró ser el más efectivo, generando aproximadamente 6,1 primordios, seguido por el tratamiento con pasto (5,85 primordios) y, finalmente, la combinación bacal-pasto, que produjo cerca de 5,55 primordios. La superioridad del sustrato de bacal en la formación de primordios podría atribuirse a sus características físico-químicas particulares, aunque es importante señalar que esta ventaja inicial no se correlacionó necesariamente con un mayor rendimiento en la cosecha final.

Estos hallazgos contribuyen significativamente a la comprensión de los factores que influyen en las etapas tempranas del desarrollo de *Pleurotus* proporcionando información valiosa para la optimización de su cultivo.

### Referencias

- Aguilar-Ventura, D. A., Solís-Gordillo, L. A., Rivas-Jacobo, I. C., & Espinosa-Velasco, S. (2025). Cultivo de *Pleurotus* (Fungi: Agaromycetes): recurso biológico y biotecnológico en Tzimol, Chiapas, México. *Bioagrobiencias*, *18*(1), 1-9. <https://doi.org/10.56369/BAC.6291>
- Arreaga, A., López, A., y Sulbarán, R. (2024). Residuos agroindustriales del estado de Chiapas susceptibles a la generación de energía. En Coronado, M., Joel, K. (Editores), *Agua y energía: actualidad y retos para un desarrollo sostenible. México*. 227-239.
- Castaño, D., Valencia, P., Murillo, E., Eras, J., y Méndez, J. (2007). Ácidos grasos sustituidos en especies vegetales y su relación con la actividad antioxidante. *Scientia et Técnica*, *1*(33), 343-344.
- Infante, C., Cuadrado, B., De Arco, D., Pérez, K., Barrera, E., y San Juan, M. (2016). Evaluación de tusa y cáscara de maíz como sustratos para el cultivo de *Pleurotus pulmonarius*. *Ciencia y Tecnología*, *32*(1), 31-46.
- Juárez-Hernández, E. O., Pérez-Zavala, M. L., Román-Reyes, M., Barboza-Corona, J. E., & Macías-Sánchez, K. L. (2023). Overview of *Pleurotus* spp., edible fungi with various functional properties. *International Food Research Journal*, *30*(5), 1074-1092.
- López-Guzmán, L. M., Chacón, S., & Bautista-Gálvez, A. (2017). Adiciones al conocimiento sobre la diversidad de los hongos (macromicetes) de Chiapas, México. *Scientia Fungorum*, *45*, 27-35.
- Nieto, I. J., & Chegwin, A. C. (2010). *Hongos comestibles y nutraceuticos: aplicaciones y beneficios*. Bogotá: Editorial Académica.
- Rija, A., Krishnamoorthi, R., Kaviyadharshini, M., & Mahalingam, P. U. (2025). Unlocking fungal fortunes: Cutting-edge extraction techniques and therapeutic possibilities of mushroom bioactive compounds. *Food Chemistry Advances*, *6*. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100895>.
- Sánchez Vázquez, J. E., & Royse, D. J. (2001). *La biología y el cultivo de Pleurotus spp.* San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México: El Colegio de la Frontera Sur; Noriega Editores.
- Valverde, M. E., Hernández-Pérez, T., & Paredes-López, O. (2015). Edible mushrooms: Improving human health and promoting quality life. *International Journal of Microbiology*. <https://doi.org/10.1155/2015/376387>
- Wang, Y., Hausner, G., Rout, P. R., & Yuan, Q. (2025). Investigation of Fungal Mycelium-bound Bio-foams from Agricultural Wastes as Sustainable and Eco-conscious Packaging Innovations. *Journal Of Cleaner Production*, *145*206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145206>
- Zhu, W., Hu, J., Li, Y., Yang, B., Guan, Y., Xu, C., Chen, F., Chi, J., & Bao, Y. (2019). Comparative Proteomic Analysis of *Pleurotus ostreatus* Reveals Great Metabolic Differences in the Cap and Stipe Development and the Potential Role of Ca<sup>2+</sup> in the Primordium Differentiation. *International Journal Of Molecular Sciences*, *20*(24), Article 6317. <https://doi.org/10.3390/ijms20246317>

**COMPOSICIÓN QUÍMICA Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE EXTRACTOS DE HONGOS Y PLANTAS**

[CHEMICAL COMPOSITION AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF MUSHROOM AND PLANT EXTRACTS]

José Enrique Oliverio Villaseñor Zetina<sup>1</sup>, José Guillermo Batista Ortiz<sup>2</sup>, Héctor Xólotl Silos Vega<sup>3\*</sup> y Héctor Silos Espino<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Biomilenio S. P. R. de R. L. Cuauhtémoc s/n, Tzitzio, Mich., México C. P. 61330. <sup>2</sup>TecNM-Pabellón de Arteaga, Carr. a la Estación de Rincón Km. 1, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes 20670, México. <sup>3</sup>Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad de Guadalajara. Blvd. Gral. Marcelino García Barragán 1421, Olímpica, 44430 Guadalajara, Jal. México. <sup>4</sup>TecNM-El Llano. Laboratorio de Bioprocesos. Km 18, carr. Aguascalientes-San Luis Potosí, El Llano Ags. C.P. 20330. México.

Autor de correspondencia: hsilos@ucol.mx

ORCID: 0000-0002-4242-7593

**Resumen**

En este trabajo se analizó la composición química y actividad antioxidante de extractos etanólicos de hongos y plantas (solos o combinados) recomendados como suplementos alimenticios para coadyuvar en desarmonías generales. El hongo matsutake sobresalió en proteína ( $46.0 \pm 3.0\%$ ). El hongo shiitake resultó alto en carbohidratos ( $52.0 \pm 1.0\%$ ). Los hongos shiitake y kawaratake tuvieron una concentración de lípidos de  $0.13 \pm 0.01\%$ . El extracto combinado de cinco hongos presentó un contenido total de  $5.5 \pm 0.6\%$  de fibra dietaria, siendo su mayor componente los  $\beta$ -glucanos ( $5.2 \pm 0.1$  mg/100g). Nueve de diez extractos mostraron capacidad antioxidante alta (80% al 90%) en concentraciones de 0.2 mg/mL a 4.0 mg/mL, sobresaliendo la presencia del hongo reishi en todos los extractos. La concentración inhibitoria media se obtuvo con 0.2 mg/mL para extractos que contenían preferentemente el hongo reich (*Ganoderma lucidum*) combinado con plantas. De acuerdo a lo anterior, al conocimiento científico del efecto de los hongos y/o plantas y a las experiencias del uso en herbolaria tradicional, se proponen recomendaciones generales para su uso, siguiendo siempre la supervisión de un especialista de la salud.

**Palabras clave:** Actividad antioxidante,  $\beta$ -glucanos, hongos comestibles, plantas medicinales.**Abstract**

In this study, the chemical composition and antioxidant activity of ethanolic extracts of mushrooms and plants (individually or combined) recommended as dietary supplements to help with general imbalances were analyzed. Matsutake mushroom stood out for its protein content ( $46.0 \pm 3.0\%$ ). Shiitake mushroom showed a high carbohydrate concentration ( $52.0 \pm 1.0\%$ ). Shiitake and kawaratake mushrooms had a lipid concentration of  $0.13 \pm 0.01\%$ . The combined extract of five mushrooms presented a total dietary fiber content of  $5.5 \pm 0.6\%$ , with  $\beta$ -glucans being the main component ( $5.2 \pm 0.1$  mg/100 g). Nine out of ten extracts exhibited high antioxidant capacity (80% to 90%) at concentrations ranging from 0.2 mg/mL to 4.0 mg/mL, with the presence of reishi mushroom being predominant in all extracts. The median inhibitory concentration was obtained with 0.2 mg/mL for extracts containing mainly reishi mushroom (*Ganoderma lucidum*) combined with plants. Based on these findings, the scientific knowledge of the effects of mushrooms and/or plants, and the traditional herbal medicine practices, general recommendations for their use are proposed, always under the supervision of a health specialist.

**Keys words:** Antioxidant activity,  $\beta$ -glucans, edible mushrooms, medicinal plants.

## Introducción

Los productos de origen natural son vitales en la alimentación y por los aportes (metabolitos nutraceuticos) en el bienestar del humano, por lo que es necesario conocer los mejores métodos de obtención de las sustancias funcionales (Fonmboh *et al.*, 2020). En los últimos 10 años se han incrementado el 1.98 % anual los estudios científicos en componentes bioactivos (fitoquímicos) (flavonoides, alcaloides y terpenoides) con propiedad antiinflamatoria, antimicrobiana y antioxidante para atender desarmonías como cáncer, diabetes y neurodegenerativas (Jaramillo *et al.*, 2021; El Allaoui *et al.*, 2024). Así, conocer el origen y las partes de las especies vegetales es una consideración importante para el momento de la extracción de fitoquímicos (pureza y estabilidad estructural), para obtener el beneficio deseado y que no cause problemas de toxicidad o desarmonía adicional en el humano (Vicas y Mures, 2021; Kumar *et al.*, 2023). Además de las plantas, otros organismos como los hongos macromicetos (*Grifola frondosa*, *Lignosus rhinocerotis*, *Hericium erinaceus*) han mostrado el efecto benéfico de hongos en personas con disfunciones ocasionadas por la edad, por sus moléculas que contienen (polifenoles, terpenoides, alcaloides, sesquiterpenes, polisacáridos y agentes quelantes de metales pesados). Rai *et al.*, (2021) Una de las alternativas de conocer el efecto benéfico de los extractos de productos de plantas (familias Asteraceae, Combretaceae, Euphorbiaceae, Fabaceae, Lamiaceae, Moraceae y Malvaceae) es mediante su capacidad antioxidante debido a que el proceso de oxidación (proceso aeróbico) inicia una serie de reacciones que conduce al daño celular y una molécula o componentes fitoquímicos con alta capacidad antioxidante, retardaría a limitaría la aparición de desarmonías fatales (Nwoso *et al.*, 2023). Diversos estudios *in vivo* e *in vitro* que componentes como los  $\beta$ -glucanos y echinacea estimulan la respuesta inmune incrementando la habilidad del cuerpo para proteger contra infecciones y enfermedades (Anil-Pawase *et al.*, 2024). Entonces, los extractos herbolarios utilizados tradicionalmente, si tienen efecto en el bienestar de las personas. Considerando todo lo anterior, en este trabajo se determinó el contenido proximal y la capacidad antioxidante de extractos de hongos y plantas consideradas “como terapéuticos”.

## Materiales y métodos

### Estrategia de análisis de los extractos

Debido a la gran cantidad de extractos, por importancia de especies percibida en la bibliografía relacionada y por experiencia del efecto benéfico, se realizó el análisis diferenciado de los extractos como se indica a continuación.

### Extractos líquidos de hongos y plantas

Las especies de plantas y de hongos se deshidrataron bajo sombra y temperatura ambiente (región de Tzitzio, Mich.) por 5-10 días (dependiendo de la constitución de la especie), se molieron hasta obtener partículas pequeñas (0.5-2.0 mm), luego se colocaron de entre 150-250 g en un extractor tipo soxhlet de capacidad de 1 litro, se les adicionó alcohol de caña o agave (15 %) y se destiló entre 2-3 ocasiones. Los extractos obtenidos (entre 400 y 600 ml) se conservaron en frasco ámbar hasta su utilización. Para la elaboración de los líquidos, se combinaron en una proporción diferenciada de acuerdo al Cuadro 1.

### Análisis químico proximal

Los análisis químicos se realizaron en el laboratorio del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C. (CIAD, A.C.) bajo los siguientes protocolos:

#### *Determinación de proteína*

Se utilizó el método de Bradford (1976), el cual se basa en una reacción colorimétrica de las proteínas con Coomassie azul brillante G-250 y medición espectrofotométrica a 595 nm. Se generó una curva de calibración, utilizando concentraciones conocidas de la albúmina de suero bovino como proteína estándar.

#### *Determinación de lípidos*

Se realizó por gravimetría, de acuerdo con el método AOAC 7.060/84, 920.39/90, realizando un montaje Soxhlet, empleando éter de petróleo como solvente.

#### *Determinación de carbohidratos totales*

Se empleó el método de fenol-ácido sulfúrico de Dubois *et al.*, (1956). La reacción principal consistió en que el fenol, en presencia de ácido sulfúrico, modificó las pentosas en furfural y las hexosas en hidroximetil furfural. Estos furanos y sus derivados se condensaron con el fenol y desarrollaron un color amarillo-naranja, el cual, se midió a una absorbancia a 490 nm. Se empleó glucosa para hacer la curva de calibración.

#### *Determinación de fibra dietética total*

Se utilizó el método descrito por la AOAC (1995). Los datos de fibra dietética total son expresados como la media y desviación estándar de cuatro determinaciones y con un coeficiente de variación menor o igual al 10 % (Sotelo *et al.*, 2008).

#### *Determinación de β-glucanos*

Se determinó con el método McCleary del kit Megazyme (AOAC 995.16) colocando las muestras en una solución amortiguadora de pH 6.5, las cuales fueron incubadas con la enzima liquenasa purificada, para luego ser filtradas. Posteriormente, la muestra se hidrolizó con la enzima β-glucosidasa purificada. La D-Glucosa que fue liberada mediante estas enzimas, se analizó mediante cromatografía líquida de alta resolución, usando un estándar de glucosa oxidasa/peroxidasa.

#### *Determinación de la actividad antioxidante:*

Se utilizó el método DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) descrito por Brand-Williams *et al.* (1995) y modificado por Kim *et al.* (2002). La actividad antioxidante se expresó como porcentaje de inhibición (promedio de tres repeticiones ± desviación estándar), lo cual correspondió a la cantidad de radical DPPH neutralizado por el extracto a una determinada concentración, de acuerdo con la ecuación:  $% I = (A - A1) / A \times 100$ , donde I = % de inhibición; A = absorbancia del blanco y A1 = absorbancia de la muestra. Los porcentajes de inhibición obtenidos se graficaron contra la concentración de extracto y se calculó la concentración inhibitoria media (IC50) a partir de la ecuación generada por la regresión logarítmica en el gráfico (González-Morales *et al.*, 2021).

Cuadro 1. Proporción de extractos de hongos y plantas utilizados en herbolaria tradicional.

NUMERO	COMPONENTES (HONGO Y/O PLANTA)	Proporción (%) del producto de destilación	
		Hongos	Plantas
I	Shiitake ( <i>Lentinus edodes</i> ).	100	-
II	Kawaratake ( <i>Trametes versicolor</i> ).	100	-
III	Matsutake ( <i>Tricholoma matsutake</i> ).	100	-
IV	Reishi ( <i>Ganoderma lucidum</i> ).	100	-
V	Reishi, tomillo, sauco, diente de león, perejil, romero y cilantro.	50	8.5 de cada planta
VI	Reishi, pasiflora, tila, neem y valeriana.	50	10 de cada planta
VII	Saucu, gordolobo, eucalipto.		33 de cada planta
VIII	Reishi, shiitake, maitake, kawaratake y matsutake.	20 de cada hongo	
IX	Shiitake, reishi, boldo, diente de león, alcachofa y cardo mariano.	50 de cada hongo	10 de cada planta
X	Shiitake, matsutake, caterpillar, reishi, maitake, kawaratake, uña de gato, kalanchoe y taray.	10 de cada hongo	6.5 de cada planta

## Resultados y discusión

### Presentación de productos elaborados

En la Figura 1 se muestran algunos de los extractos líquidos del total de 10 elaborados con extractos de hongos y plantas, los cuales contienen 250 ml.

### Componentes de los extractos de hongos.

En el Cuadro 2 se muestran los valores del análisis químico proximal de los extractos de hongos comestibles/medicinales con base en materia seca.

Cuadro 2. Análisis químico proximal en extractos líquidos de hongos.

Nutriente (%)	Hongo			
	Shiitake	Kawaratake	Matsutake	Reishi
Proteína	36.0 ± 2.0	38.0 ± 6.0	46.0 ± 3.0	41.0 ± 3.0
Lípidos	0.13 ± 0.1	0.13 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.08 ± 0.01
Carbohidratos totales	52.0 ± 1.0	42.09 ± 0.3	50.0 ± 0.1	34.0 ± 0.5

### Contenido de proteínas.

En este trabajo los extractos de hongos alcohólicos mostraron porcentajes sobresalientes, siendo matsutake (46 %) con el mayor contenido. De manera general, los hongos poseen un contenido de proteínas entre 20 y 40 % de su peso seco (López, 1985). En especies silvestres comestibles de Durango, México, López (1985) encontró entre 7.3 % y 15.5 % de proteína; Sánchez y Mata, (2012) reportaron en hongos comestibles de Michoacán, de 19.20 a 41.88 % y Gómez-Flores *et al.*, (2019) indicaron que en cuatro especies de hongos de la sierra Tarahumara de México, el contenido de proteína fue de 1.6 a 15.9 %. España-Rodríguez *et al.*, (2021) encontraron 18.19 y 24.04 % de proteína en dos especies de *Pleurotus*.



Figura 1. Extractos etanólicos por destilación a base de hongos y plantas. a), *Cordyceps* spp., b), *Ericium* spp., d), *Trametes versicolor* y d), *Tricholoma matsutake*.

### Contenido de lípidos

El contenido de lípidos en los hongos es muy escaso, entre 1.3 y 5.8 % en base seca (Loria-Kohen *et al.*, 2014). Trabajos anteriores refirieron contenidos de lípidos de 0.43 a 4.9 % en hongos silvestres comestibles del Estado de Durango (López, 1985), de 0.59 a 8.55 % en hongos de Michoacán (Sánchez y Mata, 2012), de 1.9 a 15.1 % en hongos de la Sierra Tarahumara de México (Gómez-Flores *et al.*, 2019) y en un rango de 1.20 y 2.55 % en hongos europeos, (España-

Rodríguez *et al.*, 2021). En este trabajo se encontró un contenido de lípidos en los hongos bajo estudio, de 0.8 a 0.13 %.

#### *Contenido de carbohidratos totales.*

Se encontraron proporciones entre 34 y 52 %, sobresaliendo shiitake. El contenido de carbohidratos se encuentra dentro del rango de otros hongos como *Lactarius deliciosus* (43.8 %), *Romaria flava* (44.6 %) y *Amanita caesarea* (48.6 %); mientras que es un porcentaje menor con respecto a *Boletus* spp. (53.5 %), *Boletus edulis* (54.9 %) y *Pleurotus ostreatus* (55.9 %) (López, 1985). En otro reporte se mencionó para *Amanita caesarea* un 30.17 % de carbohidratos, para *Clitocybe gibba* 41.74 % y para *Hypomyces lactifluorum* 60.65 % (Sánchez y Mata, 2012). Los polisacáridos son las sustancias de los hongos mejor conocidas con propiedades antitumorales e inmunomoduladoras. Los reportados en hongos se refieren a ramnosa, xilosa, fucosa, arabinosa, fructosa, glucosa, manosa, manitol, sacarosa, maltosa y trealosa (Rahman *et al.*, 2021).

#### *Contenido de fibra total y de β-glucanos.*

En el extracto de hongos (reishi, shiitake, maitake, kawaratake y matsutake), mostró gran cantidad de β-glucanos (Cuadro 3). Los β-glucanos pueden representar desde un 4 hasta un 13 % de la fibra dietaria total (Loria-Kohen *et al.*, 2014). Los contenidos de β-glucanos varían desde 1.70-4.96% en *Cantharellus tubaeformis*, en *Craterellus cornucopioides* 5.36 % (Aldavero-Peña, 2014), hasta 42 mg/100 g de materia seca en el hongo *A. brasiliensis* (Camellini *et al.*, 2005) y de 22 a 53 mg/100 g (base seca) en hongos tipo *Pleurotus* (Rop *et al.*, 2009). En *Boletus* reportan de 2 % al 13 % de β-glucanos (base seca) y se les atribuye actividades antioxidantes, antitumorales e inmunoestimulantes (Aldavero-Peña, 2014) o hipocolesterolémica e hipoglucémica, (Duarte-Trujillo *et al.*, 2018).

#### **Actividad antioxidante de extractos por grupo de hongos y/o plantas**

En Cuadro 4 se presentan todos los valores encontrados en los diferentes extractos, lo cual podemos diferenciar por grupo de extractos hongos y los por extractos entre hongos con plantas, con valores de 20 hasta el 90 % inhibición de radicales libres con 0.1 hasta 5.3 mg/mL de DPPH. El extracto (IV) con hongo reich (*Ganoderma lucidum*) mostró la mayor actividad antioxidante (85 %) con 0.4 mg/mL de DPPH. La menor actividad antioxidante se encontró en el extracto (I) de shiitake (20 %) con 0.2 mg/mL, pero puede llegar hasta un 50 % de inhibición con 2.9 mg/mL de DPPH. Es sobresaliente mencionar que los extractos conteniendo contenido el hongo reichi más plantas (IV, V, VIII y IX respectivamente) mostraron los valores más altos y constantes de inhibición (entre un 80-90 %). Con lo anterior, referenciamos que la actividad antioxidante de 9 extractos (II a X) es alta, al capturar del 80 % al 90 % de los radicales libres, a concentraciones de 0.4 mg/mL a 2.0 mg/mL. Los resultados concuerdan con Ramírez-Anguiano *et al.* (2007), quienes encontraron en los extractos metanólicos de *Agaricus bisporus* y *Boletus edulis* una actividad antioxidante muy alta (90 %) a una concentración de 1.8 mg/mL. González-Morales *et al.*, (2021) encontraron que se incrementa la capacidad de inhibición en relación con la concentración del extracto (preferentemente acuosos y metanólicos) y de compuestos fenólicos totales.

Cuadro 3. Contenido de fibra y β-glucanos en el extracto VIII (reishi, shiitake, maitake, kawaratake y matsutake).

Fibra total (%)	β-glucanos (mg/100 g)
5.5 ± 0.6	5.2 ± 0.1

Datos en base seca.

#### **Concentración inhibitoria media (IC50)**

Los valores más altos (Cuadro 4) coincidieron con la presencia del hongo reishi combinado con hongos o plantas (Extracto IV, V y VI). Así coincide con Ramírez-Anguiano (2009), aunque el porcentaje para la curva de inhibición en su trabajo fue de 10 % para 0.2 mg/mL, 19% a 0.4 mg/mL y de 40% a 0.8 mg/mL; mientras que, en el presente trabajo, la curva de inhibición fue de 28% para 0.1 mg/mL, 38% para 0.2 mg/mL, 84% para 0.4 mg/mL y 85% para 0.8 mg/mL.

En relación con plantas, para extractos metanólicos García-Hernández *et al.*, (2015) reportaron para eucalipto 5.75 ( $\pm 0.3$ ), romero 6.9 ( $\pm 1.3$ ), tila 36.7 ( $\pm 7.7$ ), neem 45.1 ( $\pm 1.3$ ), gordolobo 51.91 ( $\pm 17.1$ ), pasiflora 79.0 ( $\pm 6.7$ ), valeriana 93.7 ( $\pm 25.3$ )  $\mu\text{g/mL}$  respectivamente. Es conveniente mencionar que González-Morales *et al.*, (2021) encontraron concentraciones más altas en hongos: *Amanita rubescens* (200  $\mu\text{g/mL}$ ), *Flammulina mexicana* (200  $\mu\text{g/mL}$ ), *Flocularia luteovirens* (42  $\mu\text{g/mL}$ ), *Gyromitra sp.* (78  $\mu\text{g/mL}$ ), *Morchella sp.* (41  $\mu\text{g/mL}$ ) y *Turbinellus floccosus* (160  $\mu\text{g/mL}$ ).

### Experiencias de la aplicación terapéutica de extractos de hongos y plantas

En el Cuadro 5 se indica de manera general el beneficio atribuido por la bibliografía científica y por experiencias de recomendaciones del uso de los extractos. Es conveniente mencionar que el efecto ha sido percibido por quien elabora los productos y que ha trabajado por más de 20 años. Se recomienda utilizar 60 gotas (una cuchara cafetera). Puede sugerirse hasta 3 veces por día, intermedio 2 veces/día y si va disminuyendo se baja la dosis a una toma por día. Su efecto de mejoría se ve a los 30-40 días. Es más recomendable en jóvenes y adultos. Para niños no sugeridos. Indudablemente, cada sugerencia será supervisada por el especialista de la salud.

### Conclusiones

Los extractos de hongos y plantas analizados son recomendables como uso herbolario y se encontró que buena actividad antioxidante sobresaliente, sobre todo el hongo reishi (*Ganoderma lucidum*). Los resultados apoyan al uso tradicional de hongos y plantas en la salud humana. No obstante, se sugiere continuar con la investigación sobre principios activos o actividad biológica para cada caso. Su consumo será responsabilidad del que lo use.

Cuadro 4. Comportamiento de la actividad antioxidante (%) en relación a la concentración (mg/ml) y determinación del C50.

Extracto líquido	Actividad antioxidante (%) en relación a la concentración mg/ml determinada por el método DPPH.										IC50 mg/ml*
	%	mg/ml.	%	mg/ml.	%	mg/ml.	%	mg/ml.	%	mg/ml.	
EXTRACTOS ETANOLICOS DE HONGOS											
I	20	0.2	28	0.5	65	1.0	60	2.0	50	2.9	0.8
II	20	0.1	20	0.2	60	0.4	70	0.1	80	1.1	0.5
III	36	0.4	53	0.9	83	1.7	50	3.5	45	5.2	0.8
IV	28	0.1	38	0.2	84	0.4	85	0.8	83	1.2	0.2
EXTRACTOS COMBINADOS ENTRE HONGOS Y PLANTAS											
V	45	0.2	68	0.4	90	0.8	86	1.6	80	2.4	0.2
VI	36	0.2	47	0.4	89	0.7	84	1.4	82	2.1	0.3
VII	40	0.3	60	0.6	87	1.3	75	2.5	60	3.8	0.8
VIII	24	0.2	34	0.3	66	0.6	86	1.2	82	1.9	0.5
IX	70	0.3	80	0.5	73	1.0	87	2.0	85	3.1	1.1
X	25	0.2	86	0.5	83	1.0	77	2.0	64	2.9	0.3

\*Concentración en la que se neutraliza el 50 % de los radicales libres del DPPH.

Cuadro 5. Inferencia del uso de extracto de hongos y plantas generada a partir de las funciones atribuidas en la bibliografía y experiencias de su uso por el autor principal de este manuscrito.

NUM	COMPONENTES (HONGO Y/O PLANTA)	EFFECTO INFERIDO
I	Shiitake ( <i>Lentinus edodes</i> ).	Depurador general
II	Kawaratake ( <i>Trametes versicolor</i> ).	Depurador general
III	Matsutake ( <i>Tricholoma matsutake</i> ).	Depurador general
IV	Reishi ( <i>Ganoderma lucidum</i> ).	Anti inflamatorio
V	Reishi, tomillo, sauco, diente de león, perejil, romero y cilantro.	Disminución del ácido úrico
VI	Reishi, pasiflora, tila, neem y valeriana.	Anti estres
VII	Sauco, gordolobo, Eucalipto.	Coadyuvante de vías respiratorias
VIII	Reishi, shiitake, maitake, kawaratake y matsutake.	Inmonomodulador
IX	Shiitake, reishi, boldo, diente de león, alcachofa y cardo mariano.	Coadyuvanmte del sistema circulatorio
X	Shiitake, matsutake, caterpillar, reishi, maitake, kawaratake, uña de gato, kalanchoe y taray	Coadyuvante del sistema inmune.

#### Agradecimientos

Dra. Elizabeth Carbajal-Millán y sus colaboradores M.C. K. G. Martínez-Robinson y Q.B. A. C. Campa-Mada del CIAD, A.C., al TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes y al INCYTEA (FEIT 2022) por la disposición de áreas y el apoyo económico para los análisis químicos.

#### Referencias

- Aldavero Peña, A. C. (2014). Estudio de la capacidad antioxidante y el contenido en  $\beta$ -(1,3 1,6-) glucanos de diversas setas comestibles de Castilla y León. Facultad de Medicina. Universidad de Valladolid. Pp. 119.
- Anil-Pawase P., Goswami C., Shams R., Kumar-Pandey V., Tripathi A., Rustagi S. and G Darshan. (2024). A conceptual review on classification, extraction, bioactive potential and role of phytochemicals in human health. *Future Foods* 9: 1-13.
- AOAC 7.060/84, 920.39/90. Determinación de lípidos. Official Method of Analysis of AOAC International (19th ed., Vol. II). Maryland, United States of America: AOAC International.
- AOAC International. (2000). Determinación de  $\beta$ -glucanos por el método McCleary del kit Megazyme, basado en el Método AOAC 995.16.
- AOAC, Official Methods of Analysis of AOAC International. 1995. 16<sup>th</sup> ed., Association of Official Analytical Chemists, Arlington, volumen II.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*. 72:248-254.
- Camellini, C.M., Maraskin, M., De Mendonca, M.M., Zucco, C., Ferreira, A.G. y Tavares, L.A. (2005). *Biotechnol Lett.* 27:1295-1299.
- Duarte-Trujillo, A., Pineda-Insuasti, J. y Juárez, M. (2018). Beta-glucanos de *Pleurotus* y sus efectos en la salud. *Revista Biorrefinería* Vol. 1 N°. 4: 26-36 ISSN: 2602-8530.
- Dubois, M., Hamilton, J., Rebers, P., y Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28. 3:350.
- El Allaoui, H., El Ahmadi K., El Abdouni A., Dira I., El Batrioui M., Bouhrim M., Eto B., Shahat A. A., Herqash R. N., Haboubi K. (2024). Trends and Insights in Medicinal Plant Extract Research: A Ten-Year Bibliometric and Visualization Study. *Horticulturae*, 10, 1163. [https:// doi.org/10.3390/horticulturae10111163](https://doi.org/10.3390/horticulturae10111163)

- España-Rodríguez, M., Hernández-Domínguez, E.M., Velázquez-De Lucio, B.S., Villa-García, M. y Álvarez-Cervantes, J. (2021). Productividad y análisis químico proximal de *Pleurotus spp.* Crecidos sobre bagazo de *Agave salmiana* como sustrato alternativo. *Agrociencia*. 55: 569-581. DOI: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i7.2604>.
- García-Hernández, D. G., Oranday-Cárdenas, A., Verde-Star, M. J., Quintanilla- Licea, R., Leos-Rivas, C., Garza-González, E. y Rivas-Morales, C. (2015). Actividad fungicida, antioxidante e identificación de los compuestos más activos de 20 plantas utilizadas en la medicina tradicional mexicana (García-Hernández *et al.*, 2015. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*. Vol. 46, núm. 3:73-79. ISSN: 1870-0195.
- Gómez-Flores, L., Martínez-Ruiz, N. Enríquez-Anchondo, I. Garza-Ocañas, F., Nájera-Medellín, J. y Quiñónez-Martínez, M. (2019). Análisis proximal y de composición mineral de cuatro especies de hongos ectomicorrízicos silvestres de la Sierra Tarahumara de Chihuahua. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. 22. 10.22201/fesz.23958723e.2019.0.184.
- González-Morales, A., Ribas-Aparicio, R.M. y Burrola-Aguilar, C. (2021). Actividad antioxidante de hongos silvestres consumidos tradicionalmente en el centro de México. *Scientia Fungorum*. Vol. 52:e1410. DOI: 10.33885/sf.2021.52.1410.
- Jaramillo-J.C., Armijos-A. J.C., Cedeño-S, R.; Campo-F. M. y Rojas de A, L. (2021). Comparación de la relación de fenoles totales, flavonoides y capacidad antioxidante en brácteas de dos variedades de *Bougainvillea glabrachoisy*. *InfoANALÍTICA*. 9:167-179.
- KimEun-Young, Baik In-Hee, Kim Jung-Hyun, Kim Sung-Ran y Rhyu Mee-Ra. (2004). Screening of the antioxidant activity of some medicinal plants. *Korean J. Food Sci. Technol*. 36(2):333-338.
- Kumar A., P N., Kumar M., Jose A., Tomer V., Oz E., Proestos C., Zeng M., Elobeid T., K S. and Oz F. (2023). Major Phytochemicals: Recent Advances in Health Benefits and Extraction Method. *Molecules* **2023**, 28, 887.
- López, R.A. (1985). Hongos, alimento del futuro. Cultive sus setas en casa. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz. Pp. 15.
- Loria-Kohen, V., Thais Lourenço-Nogueira, T., Espinosa-Salinas, I., Marín, F.R. Soler-Rivas, C. and Ramirez de Molina, A. (2014). Nutritional and Functional Properties of Edible Mushrooms: A Food with Promising Health Claims. *Journal of Pharmacy and Nutrition Sciences*.4:187-198.
- Fonmboh D. J., Abah E. R., Fokunang T. E., Herve B., Ngo Teke G., Mballa Rose N., Nono Borgia N., Benyella Fokunang L., Nyuyki Andrew B., Kaba N., Bathelemy N. and Ntungwen F. C. (2020). An Overview of Methods of Extraction, Isolation and Characterization of Natural Medicinal Plant Products in Improved Traditional Medicine Research. *Asian Journal of Research in Medical and Pharmaceutical Sciences*. (2): 31-57, 2020.
- Nwozo, O. S., Effiong E. M., Aja P. M. and Awuchi C. G. (2023). Antioxidant, phytochemical, and therapeutic properties of medicinal plants: a review, *International Journal of Food Properties*, 26:1, 359-388, DOI: 10.1080/10942912.2022.2157425
- Rai, S. N., Mishra D., Singh P., Vamanu E. and Singh M. P. . (2021). Therapeutic applications of mushrooms and their biomolecules along with a glimpse of in silico approach in neurodegenerative diseases.*Biomedicine & Pharmacotherapy* 137:1-14.
- Rahman, M. A., Rahman T., Rahman M. y Arif M. (2022). Usage of mushrooms in culinary and medicinal purposes. *Biomedical Research and Clinical Reviews*. 6(1): 1-7. DOI 10.31579/2692-9406/087.
- Ramírez-Anguiano, A. C., Santoyo S., Reglero G. y Soler-Rivas C. (2007). Radical scavenging activities, endogenous oxidative enzymes and total phenols in edible mushrooms commonly consumed in Europe. *J Sci of Food and Agric*, 87(12): 2272-2278.
- Rop, O., Mlcek, J. y Jurikova, T. (2009). Beta-glucans in higher fungi and their health effects *Nutrition reviews*. 67. 11:624-631.
- Sánchez, J.E. y Mata, G. (2012). Hongos comestibles y medicinales en Iberoamérica. El Colegio de la Frontera Sur. Primera edición. Tapachula, Chiapas. Impreso y hecho en México. ISBN 978-607-7637-73-8.
- Sotelo, A., Argote, R.M., Cornejo, L., Silvia Escalona, S., Ramos, M. Nava, A., Palomino, D. y Carreón, O. (2008). Medición de fibra dietética y almidón resistente: reto para alumnos del Laboratorio de Desarrollo Experimental de Alimentos (LabDEA). *Educ. Quím.* 19:42-49.
- Vicas, L.G.; Mures, an, M.E. (2021). Medicinal Plant Extracts. *Plants*, 10(1-2):10, 838. <https://doi.org/10.3390/plants10050838>

## HONGOS DE MAYOR PRODUCCIÓN Y CONSUMO EN PAÍSES ASIÁTICOS: REVISIÓN

### MUSHROOMS WITH THE HIGHEST PRODUCTION AND CONSUMPTION IN ASIAN COUNTRIES

Reyna Oliver González<sup>1\*</sup> y Héctor Silos Espino<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TecNM-Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla. Módulo de producción de hongos comestibles. Avenida José Luis Martínez Vázquez No. 2000, Jicolapa, Zacatlán, Puebla. <sup>2</sup>TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Laboratorio de Bioprocesos. Km 18 carretera Aguascalientes-San Luis Potosí, 20330. México.

Autor de correspondencia: [reyna.og@zacatlan.tecnm.mx](mailto:reyna.og@zacatlan.tecnm.mx)

ORCID: 0009-0001-5185-3893

#### Resumen

Los hongos comestibles y funcionales han sido parte fundamental de la cultura asiática desde hace miles de años, integrándose en la medicina tradicional y en la alimentación. China, Japón y Corea lideran la producción y consumo mundial, destacando especies como *Lentinula edodes* (shiitake), *Pleurotus ostreatus* (seta de ostra), *Ganoderma lucidum* (reishi), *Flammulina velutipes* (enoki) y *Tremella fuciformis* (hongo blanco de nieve). Estos organismos no solo enriquecen la gastronomía regional, sino que aportan compuestos bioactivos de gran interés científico, como polisacáridos, triterpenoides,  $\beta$ -glucanos, lovastatina, hericenonas y cordicepina, con actividades antioxidantes, inmunomoduladoras, antitumorales, neuroprotectoras, hipoglucemiantes y cardioprotectoras. La producción mundial está dominada por China, responsable de más del 70% de la oferta global, con volúmenes superiores a los 5 millones de toneladas anuales. Japón e India también aportan cifras relevantes. En particular, el shiitake concentra más del 95% de la producción mundial, seguido por *Pleurotus spp.* y *Auricularia spp.* Los estudios modernos han confirmado muchas de las propiedades atribuidas en la medicina tradicional. Por ejemplo, *Ganoderma lucidum* muestra efectos antidiabéticos, antioxidantes y antitumorales; *Hericium erinaceus* estimula el crecimiento neuronal y mejora la cognición; *Grifola frondosa* modula la glucosa y fortalece la respuesta inmune; mientras que *Cordyceps* mejora el rendimiento físico y la salud cardiovascular. En conjunto, los hongos comestibles y funcionales representan una fuente sostenible de nutraceuticos con potencial en la prevención y tratamiento de enfermedades crónicas. Su estudio y cultivo continúan expandiéndose, posicionándolos como un recurso clave para la salud, la alimentación y la biotecnología global.

**Palabras clave:** Hongos comestibles, *Pleurotus*, *Ganoderma*, Melena de león.

#### Abstract

Edible and functional mushrooms have been a fundamental part of Asian culture for thousands of years, integrated into traditional medicine and food. China, Japan, and Korea lead global production and consumption, with species such as *Lentinula edodes* (shiitake), *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom), *Ganoderma lucidum* (reishi), *Flammulina velutipes* (enoki), and *Tremella fuciformis* (snow fungus) standing out. These organisms not only enrich regional cuisine but also provide bioactive compounds of great scientific interest, such as polysaccharides, triterpenoids,  $\beta$ -glucans, lovastatin, hericenones, and cordycepin, with antioxidant, immunomodulatory, antitumor, neuroprotective, hypoglycemic, and cardioprotective activities. World production is dominated by China, which accounts for more than 70% of the global supply, with volumes exceeding 5 million tons per year. Japan and India also contribute significant figures. In particular, shiitake accounts for more than 95% of world production, followed by *Pleurotus spp.* and *Auricularia spp.* Modern studies have confirmed many of the properties attributed to them in traditional medicine. For example, *Ganoderma lucidum* exhibits antidiabetic, antioxidant, and antitumor effects; *Hericium erinaceus* stimulates neuronal growth and improves cognition; *Grifola frondosa* modulates glucose and strengthens the immune response, while *Cordyceps* improves physical performance and cardiovascular health. Together, edible and functional mushrooms represent a sustainable source of nutraceuticals with potential in the prevention and treatment of chronic

diseases. Their study and cultivation continue to expand, positioning them as a key resource for global health, nutrition, and biotechnology.

Keywords: Edible mushrooms, *Pleurotus*, *Ganoderma*, Lion's mane.

## Introducción

El uso de hongos comestibles y funcionales en Asia tiene una rica tradición que se remonta a miles de años. En la antigua China, durante la dinastía Han (202 a.C. - 220 d.C.), se documentó el uso de hongos como *Ganoderma lucidum* (reishi) en la medicina tradicional para promover la longevidad y la salud. Este hongo, conocido como "elixir de la inmortalidad", fue reservado para la nobleza debido a su rareza y valor (NAMYCO, 2023). A lo largo de los siglos, el conocimiento sobre los hongos medicinales se expandió a otras regiones asiáticas, como Japón y Corea, donde también se integraron en sus sistemas de medicina tradicional. En Japón, el shiitake (*Lentinula edodes*) se cultivó desde el siglo VIII, y en la década de 1930, se desarrollaron técnicas de cultivo más eficientes que permitieron su producción a gran escala (Song, 2025). En la actualidad, países como China, Japón y Corea continúan siendo líderes en la producción y consumo de hongos comestibles y funcionales (Cuadro 1). Estos hongos no solo enriquecen la gastronomía asiática, sino que también ofrecen diversos beneficios para la salud, como propiedades antioxidantes, inmunomoduladoras y antiinflamatorias (DE Cianni *et al.*, 2023).

Entre los hongos más reconocidos se encuentran *Flammulina velutipes* (enoki), *Pleurotus ostreatus* (seta de ostra), *Auricularia auricula-judae* (oreja de madera), *Tremella fuciformis* (hongo blanco de nieve), *Hericium erinaceus* (melena de león), y *Grifola frondosa* (maitake), que han sido cultivados y utilizados históricamente en sopas, guisos y suplementos medicinales (Cuadro 1). Su uso se ha extendido a la medicina moderna, donde se investigan propiedades como efectos hipoglucemiantes, neuroprotectores, adaptógenos e inmunoestimulantes (Zhang & Wang, 2020; Zhang *et al.*, 2013). Esta tradición milenaria ha permitido que Asia lidere el desarrollo de técnicas de cultivo y la investigación científica de hongos con fines nutricionales y terapéuticos, consolidando su importancia en la salud y la alimentación.

Entre ellos destaca *Lentinula edodes* (shiitake), cultivado principalmente en China y Japón, con una producción anual superior a 10,000 millones de kg, representando más del 95% de la producción mundial (Song *et al.*, 2025). *Pleurotus ostreatus* (seta de ostra) es ampliamente cultivado en China, India y Corea, con una producción global estimada en 1 millón de toneladas, siendo China responsable del 85% de esta producción, Market Data Forecast (2025). *Tremella fuciformis* (hongo blanco de nieve) es cultivado principalmente en China, con una producción anual de 130,000 toneladas (Cuadro 2).

## Beneficio atribuido al consumo de hongos comestibles

### ***Ganoderma lucidum* (Reishi, Lingzhi)**

Es un hongo medicinal utilizado en la medicina tradicional asiática desde hace más de 2,000 años. Su relevancia actual se debe a sus propiedades funcionales respaldadas por la investigación científica. Este hongo contiene compuestos bioactivos como triterpenoides y polisacáridos que le confieren propiedades antioxidantes, antiinflamatorias e inmunomoduladoras. Estudios han demostrado que los polisacáridos de *G. lucidum* pueden mejorar la sensibilidad a la insulina y reducir los niveles de glucosa en modelos animales de diabetes (Ekiz, 2023). Además, se ha observado que el hongo posee efectos antimicrobianos, mostrando actividad frente a diversas bacterias, hongos y virus (Ahmad, 2024). Investigaciones recientes también sugieren que *G. lucidum* puede regular la microbiota intestinal, lo que podría tener implicaciones en el tratamiento de enfermedades cardiovasculares, gastrointestinales y renales (Qin, 2024). Además, se ha identificado que *G. lucidum* tiene propiedades antitumorales y antioxidantes (Zhong, 2024).

### ***Lentinula edodes* (Shiitake)**

El shiitake (*Lentinula edodes*) es un hongo comestible originario de Asia Oriental, ampliamente reconocido por sus propiedades medicinales con respaldo científico. Su principal compuesto bioactivo, el lentinano, es un  $\beta$ -glucano que

ha demostrado efectos antitumorales y capacidad para estimular la respuesta inmunológica en modelos animales y humanos. Además, el shiitake presenta actividades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas. Diversos estudios han confirmado que los polisacáridos derivados de *L. edodes* poseen propiedades antioxidantes, anticancerígenas e inmunomoduladores (Roszczyk *et al.*, 2022). Asimismo, se ha observado que su consumo modula la respuesta inmune humana, modificando el patrón de citoquinas (Stanilka *et al.*, 2013).

### ***Grifola frondosa* (Maitake)**

*Grifola frondosa*, conocido como maitake, es un hongo comestible con propiedades medicinales reconocidas en la medicina tradicional asiática. Estudios científicos han respaldado sus beneficios en diversas áreas de la salud. Uno de los componentes activos más estudiados de maitake son los polisacáridos  $\beta$ -glucanos, que han demostrado efectos inmunomoduladores y anticancerígenos. Por ejemplo, un estudio encontró que los extractos de maitake aumentan la producción de anticuerpos en respuesta a la vacunación contra la influenza, activando tanto la inmunidad innata como la adaptativa (Nishihira *et al.*, 2017).

Cuadro 1. Especies de hongos comestibles y funcionales más utilizados en el mundo.

Nº	NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	PAÍSES PRINCIPALES	USO CULINARIO	BENEFICIOS FUNCIONALES PRINCIPALES
1	<i>Lentinula edodes</i>	Shiitake	China, Japón	Sopas, guisos, salsas	Inmunomodulador (lentinano)
2	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Seta de ostra	China, India	Salteados, frituras	Antioxidante, hipocolesterolémico
3	<i>Pleurotus eryngii</i>	Seta de cardo / King oyster	Japón, Corea	Platos gourmet, asados	Prebiótico, regulador metabólico
4	<i>Auricularia auricula-judae</i>	Oreja de madera (Mu-erh)	China, Tailandia	Sopas, ensaladas	Cardioprotector, anticoagulante
5	<i>Tremella fuciformis</i>	Hongo blanco de nieve	China	Postres, sopas dulces	Hidratante, antioxidante
6	<i>Flammulina velutipes</i>	Enoki / Enokitake	Japón, China	Sopas, ramen, salteados	Inmunoestimulante
7	<i>Volvariella volvacea</i>	Hongo de paja	China, Tailandia	Currys, sopas, guisos	Rico en proteínas y minerales
8	<i>Hericium erinaceus</i>	Melena de león	China, Japón	Suplementos, guisos medicinales	Neuroprotector, cognición
9	<i>Ganoderma lucidum</i>	Reishi / Lingzhi	China, Corea	Infusiones, cápsulas (medicinal)	Adaptógeno, inmunomodulador
10	<i>Grifola frondosa</i>	Maitake	Japón, China	Sopas, frituras, extractos	Hipoglucemiante, anticancerígeno
11	<i>Agaricus bisporus</i>	Champiñón de París	China, India	Ensaladas, guisos, pizzas	Antioxidante, prebiótico
12	<i>Cordyceps militaris</i>	Cordyceps (cultivado)	China, Corea	Infusiones, cápsulas	Energizante, regulador inmune
13	<i>Hypsizygus marmoreus</i>	Shimeji	Japón, Corea	Salteados, sopas, platos gourmet	Antioxidante, antimicrobiano

Nº	NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	PAÍSES PRINCIPALES	USO CULINARIO	BENEFICIOS FUNCIONALES PRINCIPALES
14	<i>Pholiota nameko</i>	Nameko	Japón	Sopas miso, guisos tradicionales	Antioxidante, inmunoprotector
15	<i>Coprinus comatus</i>	Hongo barbudo / Shaggy mane	China	Sopas, encurtidos, salteados	Hipoglucemiante, antidiabético
16	<i>Pleurotus citrinopileatus</i>	Seta amarilla	China, Corea	Salteados, guisos	Antioxidante, hepatoprotector
17	<i>Pleurotus djamor</i>	Seta rosa	India, Tailandia	Cocina regional, guisos	Antioxidante, antimicrobiano
18	<i>Schizophyllum commune</i>	Hongo de hendidura	India, China	Sopas, medicina tradicional	Inmunoestimulante (schizophyllan)
19	<i>Phellinus linteus</i>	Meshimakobu	Corea, Japón	Infusiones, extractos medicinales	Antitumoral, antioxidante
20	<i>Morchella esculenta</i>	Colmenilla	China, India	Platos gourmet, sopas, guisos	Antioxidante, estimulante inmune

Además, se ha observado que los  $\beta$ -glucanos de maitake inhiben la glucosidasa alfa, lo que contribuye a un efecto hipoglucemiante, siendo potencialmente útiles en el manejo de la diabetes tipo 2. En cuanto a la salud dérmica, un estudio evidenció que los extractos de maitake bloquean la inflamación y citotoxicidad en fibroblastos dérmicos inducidos por bisfenol A, un disruptor endocrino común (Kim *et al.*, 2022). Por otro lado, investigaciones han mostrado que maitake posee propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, que contribuyen a la protección celular y la reducción del estrés oxidativo (Tripodi *et al.*, 2022).

Cuadro 2. Producción mundial de hongos comestibles.

País	Producción anual (TM)	Especies principales cultivadas
China	5,150,000	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Lentinula edodes</i> , <i>Pleurotus</i> spp., <i>Auricularia</i> spp., <i>Flammulina velutipes</i> .
Italia	785,000	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> .
Estados Unidos	388,450	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Lentinula edodes</i> , <i>Pleurotus</i> spp.
Países Bajos	307,000	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> .
Polonia	220,000	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> .
España	146,000	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> .
Francia	116,574	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> .
Irán	87,675	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> .
Canadá	82,000	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> .
Reino Unido	73,100	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> .
Japón	50,000	<i>Lentinula edodes</i> , <i>Flammulina velutipes</i> , <i>Pleurotus</i> spp.
Corea del Sur	45,000	<i>Lentinula edodes</i> , <i>Pleurotus</i> spp., <i>Auricularia</i> spp.
India	240,000	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Pleurotus</i> spp., <i>Lentinula edodes</i> .
México	77,150	<i>Agaricus bisporus</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Lentinula edodes</i> .

Fuente: ResearchGate (2025); PMC (2023); Market Growth Reports (2025).

### ***Hericium erinaceus* (Melena de león)**

Es un hongo medicinal con propiedades neuroprotectoras respaldadas por investigaciones científicas. Contiene compuestos bioactivos como erinacinas y hericenonas, que estimulan la síntesis del factor de crecimiento nervioso (NGF), promoviendo el crecimiento y la reparación neuronal (Contato y Conte-Junior, 2025). Estos compuestos también exhiben propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, ayudando a mitigar el estrés oxidativo y la inflamación en el sistema nervioso (Szucko-Kociuba *et al.*, 2023). Estudios preclínicos han demostrado que el consumo de *Hericium erinaceus* puede mejorar la función cognitiva y la memoria, especialmente en individuos mayores. Por ejemplo, un estudio clínico reveló mejoras en la función cognitiva y el bienestar emocional en adultos mayores que consumieron suplementos de este hongo (Cha *et al.*, 2024). Además de sus beneficios neurológicos, *Hericium erinaceus* posee propiedades antimicrobianas y anticancerígenas. Investigaciones han mostrado que sus extractos pueden inhibir el crecimiento de diversas cepas bacterianas y fúngicas, así como reducir la proliferación de células cancerosas en modelos experimentales (Docherty *et al.*, 2023).

### ***Cordyceps militaris / sinensis* (Cordyceps)**

Es un hongo medicinal utilizado en la medicina tradicional china, ha sido objeto de numerosos estudios científicos que respaldan sus beneficios para la salud. Entre las especies más estudiadas se encuentran *Cordyceps sinensis* y *Cordyceps militaris*. Uno de los compuestos bioactivos más destacados de *Cordyceps* es la cordicepina (3'-desoxiadenosina), un análogo de la adenosina que exhibe propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y anticancerígenas. La cordicepina ha demostrado ser eficaz en la inhibición de la proliferación celular en diversos tipos de cáncer, incluyendo los de pulmón, riñón, colon y mama. Además, *Cordyceps* posee propiedades inmunomoduladoras. Estudios han mostrado que los polisacáridos derivados de *Cordyceps* estimulan la actividad de las células dendríticas y la activación de linfocitos T, mejorando la respuesta inmune del organismo (Chen *et al.*, 2024). En cuanto a la salud cardiovascular, *Cordyceps* ha demostrado efectos beneficiosos al reducir los niveles de colesterol LDL y triglicéridos, además de mejorar la función endotelial y la circulación sanguínea (Park *et al.*, 2025). Por último, *Cordyceps* ha sido utilizado para mejorar el rendimiento físico. Investigaciones han indicado que la suplementación con *Cordyceps* puede aumentar la capacidad aeróbica y reducir la fatiga en atletas y personas activas (Pinheiro *et al.*, 2025).

### ***Pleurotus ostreatus* (Seta de ostra)**

Son hongos comestibles que ofrecen una combinación única de nutrientes y compuestos bioactivos con potencial terapéutico. Estas setas son ricas en proteínas, fibra dietética, vitaminas del complejo B, minerales como potasio y fósforo, y antioxidantes naturales (Raman *et al.*, 2022). En términos de propiedades medicinales, *Pleurotus* spp. han demostrado actividades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas, antidiabéticas, antihipertensivas y antitumorales. Estudios han identificado compuestos bioactivos como lectinas, glucanos, lacasas y lovastatina, que contribuyen a estos efectos terapéuticos (Galappaththi *et al.*, 2021). Además, la fibra dietética presente en *Pleurotus* spp. desempeña un papel crucial en la salud digestiva y cardiovascular. La inclusión de estas setas en la dieta puede mejorar la función intestinal y contribuir a la reducción de los niveles de colesterol LDL (Gomes Corrêa *et al.*, 2016).

### ***Auricularia auricula-judae* (Oreja de Judas, mu-err)**

*Auricularia auricula-judae*, conocido como oreja de Judas o hongo oreja de madera, es un hongo comestible y medicinal ampliamente utilizado en la medicina tradicional. Este hongo destaca por su contenido en polisacáridos, proteínas, fibra dietética, vitaminas del complejo B, minerales como potasio y fósforo, y antioxidantes naturales (Kues y Navarro-González, 2015). Uno de los componentes bioactivos más estudiados de *A. auricula-judae* son los polisacáridos, que han demostrado propiedades inmunomoduladoras, antioxidantes y antiinflamatorias. Estos polisacáridos pueden regular la microbiota intestinal y mejorar la función metabólica en modelos animales (Zong *et al.*, 2023). Además, se ha observado que estos compuestos pueden reducir los niveles de colesterol y glucosa en sangre, contribuyendo a la prevención de enfermedades cardiovasculares y metabólicas (Fei *et al.*, 2025). En términos de salud cardiovascular, *A. auricula-judae* contiene adenosina, un compuesto con propiedades vasodilatadoras que estimula la circulación sanguínea, aliviando el dolor cardíaco y reduciendo la presión arterial (Mycobee Mushrooms, 2025).

### ***Tremella fuciformis* (Hongo blanco de nieve)**

También conocido como hongo oreja de nieve, es un hongo comestible y medicinal ampliamente utilizado en la medicina tradicional china. Este hongo destaca por su contenido en polisacáridos, proteínas, fibra dietética, vitaminas del complejo B, minerales como potasio y fósforo, y antioxidantes naturales. Uno de los componentes bioactivos más estudiados de *T. fuciformis* son los polisacáridos, que han demostrado propiedades inmunomoduladoras, antioxidantes y antiinflamatorias. Estos polisacáridos pueden regular la microbiota intestinal y mejorar la función metabólica en modelos animales. Además, se ha observado que estos compuestos pueden reducir los niveles de colesterol y glucosa en sangre, contribuyendo a la prevención de enfermedades cardiovasculares y metabólicas. En términos de salud cardiovascular, *T. fuciformis* contiene adenosina, un compuesto con propiedades vasodilatadoras que estimula la circulación sanguínea, aliviando el dolor cardíaco y reduciendo la presión arterial.

### ***Flammulina velutipes* (Enoki)**

Conocida como enoki o seta de aguja de oro, es un hongo comestible ampliamente utilizado en la gastronomía asiática. Además de su valor culinario, ha sido objeto de estudios científicos que respaldan sus beneficios para la salud humana. Uno de los principales componentes bioactivos de *F. velutipes* son los polisacáridos, que han demostrado propiedades inmunomoduladoras, antioxidantes y antiinflamatorias. Estos polisacáridos pueden regular la microbiota intestinal y mejorar la función metabólica en modelos animales (Su *et al.*, 2022). En términos de salud cardiovascular, *F. velutipes* contiene adenosina, un compuesto con propiedades vasodilatadoras que estimula la circulación sanguínea, aliviando el dolor cardíaco y reduciendo la presión arterial (Ming-Yei *et al.*, 2014). Además, se ha observado que los polisacáridos de *F. velutipes* pueden reducir los niveles de colesterol LDL y triglicéridos, contribuyendo a la prevención de enfermedades cardiovasculares (Hao *et al.*, 2021).

### ***Agaricus subrufescens* (*Agaricus blazei*, Himematsutake)**

Conocido como hongo de la almendra o *Agaricus blazei* Murill, es un hongo comestible y medicinal ampliamente utilizado en la medicina tradicional y alternativa. Este hongo destaca por su contenido en polisacáridos, especialmente  $\beta$ -glucanos, que han demostrado propiedades inmunomoduladoras, antioxidantes y antiinflamatorias. Estos polisacáridos pueden regular la microbiota intestinal y mejorar la función metabólica en modelos animales. Además, se ha observado que estos compuestos pueden reducir los niveles de colesterol y glucosa en sangre, contribuyendo a la prevención de enfermedades cardiovasculares y metabólicas. En términos de salud cardiovascular, *A. subrufescens* contiene adenosina, un compuesto con propiedades vasodilatadoras que estimula la circulación sanguínea, aliviando el dolor cardíaco y reduciendo la presión arterial. Además, estudios han demostrado que los polisacáridos de *A. subrufescens* pueden reducir los niveles de colesterol LDL y triglicéridos, contribuyendo a la prevención de enfermedades cardiovasculares.

### ***Poria cocos* (Fu-ling)**

Un hongo medicinal utilizado en la medicina tradicional china, ha sido objeto de numerosos estudios que respaldan sus beneficios para la salud humana. Uno de los principales componentes bioactivos de *Poria cocos* son los polisacáridos, que han demostrado propiedades inmunomoduladoras, antioxidantes y antiinflamatorias. Estos polisacáridos pueden regular la microbiota intestinal y mejorar la función metabólica en modelos animales (Duam *et al.*, 2023). En términos de salud cardiovascular, *Poria cocos* contiene adenosina, un compuesto con propiedades vasodilatadoras que estimula la circulación sanguínea, aliviando el dolor cardíaco y reduciendo la presión arterial (Verywell Health, 2025). Además, se ha observado que los polisacáridos de *Poria cocos* pueden reducir los niveles de colesterol LDL y

### ***Inonotus obliquus* (Chaga)**

Es un hongo medicinal utilizado en la medicina tradicional rusa y asiática. Este hongo destaca por su contenido en polisacáridos, triterpenoides, fenoles y melaninas, compuestos que han demostrado propiedades Inmunomoduladoras, antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas. Estudios han evidenciado que los polisacáridos de *I. obliquus* pueden mejorar la función inmunológica y reducir la inflamación. Además, se ha observado que estos compuestos pueden inhibir la proliferación de células cancerígenas y promover la apoptosis en modelos

celulares. Por ejemplo, un estudio indicó que el extracto de Chaga inhibe la progresión de células de cáncer oral al suprimir la glucólisis y el potencial de membrana mitocondrial, promoviendo la muerte celular mediada por autofagia (Yeo *et al.*, 2024). En términos de salud metabólica, *I. obliquus* ha mostrado efectos hipoglucemiantes y hepatoprotectores. Investigaciones han demostrado que los extractos de este hongo mejoran la resistencia a la insulina y restauran los niveles de glucógeno hepático en modelos de diabetes tipo 2 (Ern *et al.*, 2023).

### ***Fomitopsis pinicola***

Es un hongo común en zonas templadas de Europa, Asia, América del Norte y África. Se desarrolla principalmente sobre madera muerta de coníferas, como pinos y abetos, y puede fructificar en cualquier época del año, especialmente en árboles heridos o muertos. Este hongo tiene una cutícula resinosa con tonos que varían desde amarillentos en su juventud hasta negruzcos en su madurez, y presenta poros pequeños de color gris blanquecino que se oscurecen a la presión. Además, actúa como un agente descomponedor en los ecosistemas forestales, contribuyendo a la descomposición de la madera. Ravikumar *et al.*, (2021) mencionan que *F. pinicola* poseía una actividad antineoplásica significativa. La actividad anticancerígena observada podría atribuirse a los principales componentes químicos del extracto.

## **Ingredientes bioactivos de los principales hongos comestibles y funcionales**

Los hongos comestibles y funcionales han cobrado gran relevancia en la investigación científica debido a su riqueza en compuestos bioactivos con propiedades terapéuticas (Cuadro 3). Entre los principales metabolitos destacan los polisacáridos tipo  $\beta$ -glucanos, ampliamente estudiados por su capacidad inmunomoduladora y antitumoral, presentes en especies como *Lentinula edodes*, *Grifola frondosa* y *Ganoderma lucidum* (Zhang *et al.*, 2021). Asimismo, los triterpenoides identificados en *Ganoderma lucidum* poseen efectos hepatoprotectores, antiinflamatorios y reguladores del metabolismo de lípidos (Paterson, 2006). En *Pleurotus ostreatus* se ha descrito la presencia de lovastatina natural, con capacidad hipocolesterolémica y cardioprotectora, además de compuestos fenólicos con acción antioxidante (Jayachandran *et al.*, 2017). Por otro lado, *Hericium erinaceus* contiene hericenonas y erinacinas, metabolitos capaces de estimular la síntesis del factor de crecimiento nervioso, lo que lo convierte en un candidato prometedor para la salud cognitiva (Kawagishi y Zhuang, 2008). En *Cordyceps sinensis* destacan la cordicepina y la adenosina, compuestos asociados al aumento del rendimiento energético, a los efectos antiinflamatorios y a la protección renal (Das *et al.*, 2010). Finalmente, *Inonotus obliquus* y *Tremella fuciformis* son ricos en compuestos fenólicos, melanina y polisacáridos sulfatados, los cuales aportan actividades antioxidantes, regeneradoras de tejidos y protectoras frente al estrés oxidativo (Zhou *et al.*, 2019). En conjunto, los hongos comestibles y funcionales constituyen una fuente natural de metabolitos con amplio potencial en la prevención y tratamiento de enfermedades crónicas, lo que justifica su creciente incorporación en la nutraceutica y medicina funcional.

Cuadro 3. Ingredientes bioactivos de los principales hongos comestibles y funcionales.

Hongo	Ingredientes principales	bioactivos	Funciones / Actividades biológicas
<i>Ganoderma lucidum</i> (Reishi/Lingzhi)	Triterpenoides, polisacáridos $\beta$ -glucanos, esteroles		Inmunomodulador, antioxidante, hepatoprotector, antitumoral, regulador de glucosa y lípidos
<i>Lentinula edodes</i> (Shiitake)	Lentinano, eritadenina, fenólicos	( $\beta$ -glucano), compuestos	Estimula el sistema inmune, reduce colesterol, actividad antiviral y anticancerígena
<i>Pleurotus ostreatus</i> (Seta de ostra)	Polisacáridos, lovastatina, compuestos fenólicos	(pleuran),	Hipocolesterolémico, antioxidante, antiinflamatorio, antimicrobiano

<i>Agaricus bisporus</i> (Champiñón común)	Ergosterol (precursor de vitamina D), polisacáridos, compuestos fenólicos	Antioxidante, apoyo a salud ósea (vitamina D), modulación inmune, prebiótico
<i>Inonotus obliquus</i> (Chaga)	Ácidos fenólicos, triterpenoides, melanina, polisacáridos	Potente antioxidante, antiinflamatorio, protector gástrico, actividad antitumoral
<i>Tremella fuciformis</i> (Hongo blanco)	Polisacáridos sulfatados, ácido hialurónico natural, manitol	Hidratante y regenerador de piel, inmunoestimulante, antioxidante, neuroprotector
<i>Cordyceps sinensis</i>	Cordicepina, adenosina, polisacáridos, esteroides	Energizante, mejora metabolismo energético, inmunoestimulante, protector renal y pulmonar
<i>Grifola frondosa</i> (Maitake)	Polisacáridos (grifolan, $\beta$ -glucanos), proteínas bioactivas	Inmunomodulador, antidiabético, regulador de presión arterial y lípidos
<i>Hericium erinaceus</i> (Melena de león)	Hericenonas, erinacinas, polisacáridos	Neuroprotector, estimula crecimiento nervioso (NGF), mejora cognición, gastroprotector

Cuadro 4. Concentraciones de extractos de hongos que pueden tener un efecto en el organismo.

Número	Propiedad medicinal	Seta/Hongo	Concentración mínima
1	Actividad antioxidante.	<i>Inonotus obliquus.</i>	5 mg/ml
		<i>Ganoderma lucidum.</i>	1 mg/ml
		<i>Agaricus bisporus.</i>	6 GAE/ml
2	Actividad antiinflamatoria.	<i>Cordyceps militaris.</i>	300 $\mu$ g/ml
		<i>Hericium erinaceus.</i>	0,5 mg/l
		<i>Phellinus igniarius.</i>	100 $\mu$ mol/l
3	Actividad anticancerígena.	<i>Ramaria flava.</i>	200 $\mu$ g/ml
		<i>Phellinus linteus.</i>	250 $\mu$ g/ml
		<i>Pleurotus ostreatus.</i>	500 $\mu$ g/ml
4	Actividad antibiótica.	<i>Agrocybe aegerita.</i>	-
		<i>Ramaria flava.</i>	2 mg/ml
		<i>Lentinus edodes.</i>	-
5	Potencial inmunomodulador	<i>Pleurotus ostreatus.</i>	20 $\mu$ g/ml
		<i>Grifola frondosa.</i>	25 $\mu$ g/ml
		<i>Lactarius deliciosus.</i>	30 $\mu$ g/ml
6	Efecto neuroprotector	<i>Hericium erinaceus.</i>	100 $\mu$ g/ml
		<i>Phellinus rimosus.</i>	50 $\mu$ g/ml
		<i>Cantharellus cibarius</i>	100 $\mu$ g/ml
7	Propiedad antidiabética	<i>Ganoderma lucidum.</i>	100 $\mu$ g/ml
		<i>Inonotus obliquus.</i>	50 $\mu$ g/ml
		<i>Pleurotus florida.</i>	400 $\mu$ g/ml
8	Efecto cardioprotector	<i>Ganoderma lucidum.</i>	400 $\mu$ g/ml
		<i>Agaricus brasiliensis.</i>	200 $\mu$ g/ml
		<i>Cordyceps sinensis.</i>	10 $\mu$ g/ml
9	Efecto hepatoprotector	<i>Ganoderma lucidum.</i>	180 $\mu$ g/ml
		<i>Cordyceps militaris.</i>	400 $\mu$ g/ml
		<i>Morchella esculenta.</i>	500 $\mu$ g/ml
10	Efecto nefroprotector	<i>Pleurotus eous.</i>	500 $\mu$ g/ml
		<i>Ganoderma lucidum.</i>	500 $\mu$ g/ml
		<i>Pleurotus ostreatus.</i>	200 $\mu$ g/ml



Figura 1. Algunos de los hongos reconocidos por su actividad funcional que se comercializan y consumen en Japón y China.

## Conclusiones

Los hongos comestibles y funcionales representan un recurso biológico de alto valor nutricional, medicinal y económico. Su larga tradición de aprovechamiento en Asia, junto con el creciente interés científico a nivel mundial, evidencia su potencial como fuente sostenible de compuestos bioactivos con efectos benéficos para la salud humana. Más allá de su relevancia gastronómica, su estudio impulsa el desarrollo de productos nutracéuticos y biotecnológicos orientados a la prevención y manejo de enfermedades crónicas. En este sentido, la consolidación de su cultivo y la aplicación del conocimiento científico asociado constituyen una estrategia clave para fortalecer la seguridad alimentaria y promover un modelo de desarrollo sustentable basado en los recursos fúngicos. Futuras investigaciones deberán centrarse en la optimización de las técnicas de cultivo y en la caracterización molecular de los compuestos bioactivos, con el propósito de potenciar su aplicación en las industrias nutracéutica y farmacéutica.

## Referencias

- Ahmad, M. F. (2024). *Ganoderma lucidum*: Insight into antimicrobial and antioxidant activities. *Heliyon*. [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)01638-4](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)01638-4)
- Cha, S., Bell, L., Shukitt-Hale, B., & Williams, C. M. (2024). A review of the effects of mushrooms on mood and neurocognitive health across the lifespan. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 58, 1–14.
- Chen, L., Liu, X., Zheng, K., Wang, Y., Li, M., Zhang, Y., Cui, Y., Deng, S., Liu, S., Zhang, G., et al. (2024). *Cordyceps* polysaccharides: A review of their immunomodulatory effects. *Molecules*, 29, 5107. <https://doi.org/10.3390/molecules29215107>
- Contato, A. G., & Conte-Junior, C. A. (2025). Lion's Mane Mushroom (*Hericium erinaceus*): A neuroprotective fungus with antioxidant, anti-inflammatory, and antimicrobial potential—A narrative review. *Nutrients*, 17, 1307. <https://doi.org/10.3390/nu17081307>
- Dai, X., Stanilka, J. M., Rowe, C. A., Creasy, R. A., & Percival, S. S. (2013). Consumption of *Lentinula edodes* modulates human immune function by altering cytokine secretion of PBMC ex vivo. *The FASEB Journal*, 27(1), 643.15.
- De Cianni, R., Varese, G. C., & Mancuso, T. (2023). A further step toward sustainable development: The case of the edible mushroom supply chain. *Sustainability*, 15(10). <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10528148/>
- Docherty, S., Doughty, F. L., & Smith, E. F. (2023). The acute and chronic effects of Lion's Mane mushroom supplementation on cognitive function, stress and mood in young adults: A double-blind, parallel groups, pilot study. *Nutrients*, 15, 4842. <https://doi.org/10.3390/nu15224842>
- Duan, Y., Huang, J., Sun, M., Jiang, Y., Wang, S., Wang, L., Yu, N., Peng, D., Wang, Y., Chen, W., & Zhang, Y. (2023). Poria cocos polysaccharide improves intestinal barrier function and maintains intestinal homeostasis in mice. *International Journal of Biological Macromolecules*, 249, 125953. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125953>
- Ekiz, E. (2023). Exploring the potential medicinal benefits of *Ganoderma lucidum*. *Frontiers in Pharmacology*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10094145/>
- Ern, P. T. Y., Quan, T. Y., Yee, F. S., & Yin, A. C. Y. (2023). Therapeutic properties of *Inonotus obliquus* (Chaga mushroom): A review. *Mycology*, 15(2), 144–161. <https://doi.org/10.1080/21501203.2023.2260408>
- Fei, Y., Zhang, J., Yuan, S., Liu, Y., Wang, X., Wang, M., Zhao, H., & Liu, Q. (2025). Ameliorating potential of *Auricularia auricula-judae* polysaccharides in mitigating hypercaloric diet-induced behavioral disorders through gut microbiota regulation. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1585778. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1585778>
- Galappaththi, M. C. A., Dauner, L., Madawala, S., & Karunarathna, S. C. (2021). Nutritional and medicinal benefits of Oyster (*Pleurotus*) mushrooms: A review. *Fungal Biotechnology*, 1(2), 65–87. <https://doi.org/10.5943/FunBiotec/1/2/5>
- Gomes Corrêa, R. C., Brugnari, T., Bracht, A., Marina Peralta, R., & Ferreira, I. C. F. R. (2016). Biotechnological, nutritional and therapeutic uses of *Pleurotus* spp. related with its chemical composition: A review on the past decade findings. *Trends in Food Science & Technology*, 50, 103–117. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.012>

- Hao, Y., Wang, X., Yuan, S., Wang, Y., Liao, X., Zhong, M., He, Q., Shen, H., Liao, L., & Shen, J. (2023). *Flammulina velutipes* polysaccharide improves C57BL/6 mice gut health through regulation of intestinal microbial metabolic activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 167, 1308–1318.
- Kim, J.-H., Lim, S.-R., Jung, D.-H., Kim, E.-J., Sung, J., Kim, S. C., Choi, C.-H., Kang, J.-W., & Lee, S.-J. (2022). *Grifola frondosa* extract containing bioactive components blocks skin fibroblastic inflammation and cytotoxicity caused by bisphenol A. *Nutrients*, 14, 3812. <https://doi.org/10.3390/nu14183812>
- Kües, U., & Navarro-González, M. (2015). How do Agaricomycetes shape their fruiting bodies? Morphological aspects of development. *Fungal Biology Reviews*, 29(2), 63–97. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2015.05.001>
- Market Growth Reports. (2025). Edible fungus market share & trends [2033]. <https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/edible-fungus-market-111202>
- Micobee Mushrooms. (2025). Jelly Ears (*Auricularia auricula-judae*). Mycobee Library, No. 22.
- Ming-Yei, Y., Wen-Ching, K., & Li-Yun, L. (2014). Hypolipidemic and antioxidant activity of Enoki mushrooms (*Flammulina velutipes*). *BioMed Research International*, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2014/352385>
- NAMYCO. (2023). North American Mycological Association. <https://namyco.org>
- Nishihira, J., Sato, M., Tanaka, A., Okamatsu, M., Azuma, T., Tsutsumi, N., & Yoneyama, S. (2017). Maitake mushrooms (*Grifola frondosa*) enhance antibody production in response to influenza vaccination in healthy adult volunteers concurrent with alleviation of common cold symptoms. *Functional Foods in Health and Disease*, 7(7), 462–482.
- Park, H.-J. (2025). The genus *Cordyceps* sensu lato: Their chemical constituents, biological activities, and therapeutic effects on air pollutants related to lung and vascular diseases. *Life*, 15, 935. <https://doi.org/10.3390/life15060935>
- Pinheiro Savioli, F., Zogaib, P., Franco, E., Cezar Alves de Salles, F., Vieira Giorelli, G., & Vicente Andreoli, C. (2022). Effects of *Cordyceps sinensis* supplementation during 12 weeks in amateur marathoners: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Journal of Herbal Medicine*, 34, 100570. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2022.100570>
- Qin, X. (2024). Regulatory effect of *Ganoderma lucidum* and its active components on gut flora. *Frontiers in Microbiology*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2024.1362479/full>
- Raman, J., Jang, K. Y., Oh, Y. L., Oh, M., Im, J. H., Lakshmanan, H., & Sabaratnam, V. (2020). Cultivation and nutritional value of prominent *Pleurotus* spp.: An overview. *Mycobiology*, 49(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/12298093.2020.1835142>
- Ravikumar, K. S., Ramya, H., Ajith, T. A., Shah, M. A., & Janardhanan, K. K. (2021). Bioactive extract of *Fomitopsis pinicola* rich in 11- $\alpha$ -acetoxykhiovorin mediates anticancer activity by cytotoxicity, induction of apoptosis, inhibition of tumor growth, angiogenesis and cell cycle progression. *Journal of Functional Foods*, 78, 104372. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104372>
- Roszczyk, A., Turło, J., Zagożdżon, R., & Kaleta, B. (2022). Immunomodulatory properties of polysaccharides from *Lentinula edodes*. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16), 8980. <https://doi.org/10.3390/ijms23168980>
- Song, X., Shang, X., Zhang, M., Yu, H., Zhang, D., Tan, Q., & Song, C. (2025). Cultivation methods and biology of *Lentinula edodes*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 109(1), 63. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13387-w>
- Su, A., Ma, G., Ma, N., Pei, F., Yang, W., & Hu, Q. (2022). Effects of *Flammulina velutipes* polysaccharides on gut microbiota composition and metabolism in vitro fermentation. *Food Science and Biotechnology*, 32(3), 361–369. <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01192-y>
- Szućko-Kociuba, I., Trzeciak-Rydzek, A., Kupnicka, P., & Chlubek, D. (2023). Neurotrophic and neuroprotective effects of *Hericium erinaceus*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24, 15960. <https://doi.org/10.3390/ijms242115960>
- Tripodi, F., Falletta, E., Leri, M., Angeloni, C., Beghelli, D., Giusti, L., Milanese, R., Sampaio-Marques, B., Ludovico, P., & Goppa, L. (2022). Anti-aging and neuroprotective properties of *Grifola frondosa* and *Hericium erinaceus* extracts. *Nutrients*, 14, 4368. <https://doi.org/10.3390/nu14204368>
- Very Well. (2025). Poria mushrooms: Benefits, side effects, dosage, and interactions. <https://www.verywellhealth.com>
- Yeo, D., Yun, Y. G., Shin, S. J., *et al.* (2024). Chaga mushroom extract suppresses oral cancer cell growth via inhibition of energy metabolism. *Scientific Reports*, 14, 10616. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61125-z>

- Zhang, Y., et al. (2013). Medicinal mushrooms: Their therapeutic properties and current clinical usage. *Journal of Clinical Oncology*, 31(1), 1–8. <https://doi.org/10.1200/JCO.2012.45.0135>
- Zhang, L., & Wang, Y. (2020). Medicinal mushrooms in East Asia: A review of their therapeutic potential. *Journal of Ethnopharmacology*, 263, 113254. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113254>
- Zhong, Y. (2024). A review of *Ganoderma lucidum* polysaccharide. *Foods*, 13(17), 2665. <https://www.mdpi.com/2304-8158/13/17/2665>
- Zong, X., Zhang, H., Zhu, L., Deehan, E. C., Fu, J., Wang, Y., & Jin, M. (2023). Auricularia auricula polysaccharides attenuate obesity in mice through gut commensal *Papillibacter cinnamivorans*. *Journal of Advanced Research*, 52, 203–218. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.08.003>

## PANORAMA DE LA MOLIENDA DE ALTA ENERGÍA COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE A LA NIXTAMALIZACIÓN DEL MAÍZ: REVISION

[OVERVIEW OF HIGH-ENERGY MILLING AS A SUSTAINABLE ALTERNATIVE TO CORN NIXTAMALIZATION: REVIEW]

Fernando Martínez-Bustos <sup>1</sup>, José de Jesús Luna Ruiz <sup>2</sup>, Héctor Silos-Espino<sup>3</sup> y Karla Yuritz Amador-Rodríguez<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-QUERÉTARO IPN), Juriquilla, Querétaro. <sup>2</sup>Centro de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Jesús María, Aguascalientes. <sup>3</sup>Depto. De Investigación y Posgrado, TecNM-Instituto Tecnológico El Llano, El Llano, Aguascalientes.

\*Autor de correspondencia email: [karla.amador@edu.uaa.mx](mailto:karla.amador@edu.uaa.mx)  
8421-2275

ORCID: 0000-0002-

### Resumen

La nixtamalización es un proceso ancestral fundamental en la alimentación basada en maíz; sin embargo, enfrenta retos de sostenibilidad debido a su alto consumo de agua y energía, así como a la generación de efluentes contaminantes. En este trabajo se revisaron tres estudios experimentales realizados entre 2019 y 2020 en México, que evaluaron la molienda de alta energía (HEM, por sus siglas en inglés) como alternativa ecoeficiente para producir harinas de maíz con propiedades similares o superiores a las obtenidas por nixtamalización tradicional. Se empleó un molino planetario de bolas con adición controlada de hidróxido de calcio (0.7–1.4%) y variación en tiempos de molienda (15–45 min), utilizando maíces duros y criollos (Comercial, Ahualulco y Negritas). Los análisis incluyeron propiedades fisicoquímicas, térmicas, reológicas, microestructurales y nutraceuticas. Los resultados mostraron que la HEM incrementó la viscosidad máxima de las harinas (hasta 4294 cP frente a 2454 cP en el método tradicional), redujo la entalpía de gelatinización y mejoró la cohesividad de la masa, favoreciendo su calidad tecnológica. Asimismo, se observó una mayor retención de compuestos bioactivos, particularmente antocianinas en maíz azul (759.55 mg/kg en HEM frente a 252.53 mg/kg en nixtamalización), lo que se correlacionó con una capacidad antioxidante superior. Estos hallazgos evidencian que la molienda de alta energía conserva atributos funcionales y nutricionales, elimina la producción de nejayote y reduce el consumo de agua y energía, posicionándose como una alternativa sostenible e innovadora para la industria del maíz.

**Palabras clave:** maíz, nixtamalización, tortilla, molino de martillos.

### Abstract

Nixtamalization is an ancient process fundamental to corn-based diets; however, it faces sustainability challenges due to its high water and energy consumption, as well as the generation of polluting effluents. This paper reviews three experimental studies conducted between 2019 and 2020 in Mexico, which evaluated high-energy milling (HEM) as an eco-efficient alternative for producing corn flours with properties similar to or superior to those obtained by traditional nixtamalization. A planetary ball mill was used with controlled addition of calcium hydroxide (0.7–1.4%) and varying grinding times (15–45 min), using hard and native corn varieties (Comercial, Ahualulco, and Negritas). The analyses included physicochemical, thermal, rheological, microstructural, and nutraceutical properties. The results showed that HEM increased the maximum viscosity of the flours (up to 4294 cP compared to 2454 cP in the traditional method),

reduced the enthalpy of gelatinization, and improved the cohesiveness of the dough, favoring its technological quality. Likewise, greater retention of bioactive compounds was observed, particularly anthocyanins in blue corn (759.55 mg/kg in HEM versus 252.53 mg/kg in nixtamalization), which correlated with superior antioxidant capacity. These findings show that high-energy milling preserves functional and nutritional attributes, eliminates the production of nejayote, and reduces water and energy consumption, positioning itself as a sustainable and innovative alternative for the corn industry.

**Key words:** corn, tortilla, nixtamalization, mill.

## Introducción

La nixtamalización es una de las aportaciones biotecnológicas más relevantes de Mesoamérica, ya que permite transformar los granos de maíz en masa con propiedades funcionales y nutricionales superiores (Martínez-Bustos *et al.*, 2001). No obstante, el proceso tradicional implica un consumo excesivo de agua (2-3 L por kg de grano) y energía, además de generar el “nejayote”, un efluente alcalino con alta demanda bioquímica de oxígeno que representa un riesgo ambiental (Velasco-Martínez *et al.*, 1997). Ante estas limitaciones, diversas tecnologías alternativas han sido exploradas, como la extrusión, el calentamiento por microondas y la nixtamalización asistida por ultrasonido (Escalante-Aburto *et al.*, 2020; Garmendia, 2015; Rojas-Molina *et al.*, 2024). Sin embargo, estas no han sustituido de manera integral el método tradicional. La molienda de alta energía (HEM) se presenta como una opción novedosa, capaz de inducir cambios fisicoquímicos y estructurales en el almidón sin requerir grandes volúmenes de agua. El objetivo de esta revisión es analizar el estado del arte de la molienda de alta energía como alternativa sostenible a la nixtamalización del maíz. Para ello, se aborda la base tecnológica del proceso tradicional, se comparan tecnologías emergentes, se examina el principio y efectos de la HEM, y se discuten los beneficios, limitaciones y perspectivas para su escalamiento e implementación industrial.

### Nixtamalización tradicional: fundamentos, sostenibilidad y limitaciones

La nixtamalización es un proceso termoalcalino que consiste en cocinar el maíz en una solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  al 1-2% durante 20-40 minutos, seguido de reposo de 8-14 horas. Posteriormente, el grano se lava para eliminar el exceso de alcalinidad y cutículas, obteniendo el nixtamal, el cual se muele para producir masa o se seca para elaborar harina nixtamalizada (Flores-Farías *et al.*, 2000).

*Cambios fisicoquímicos y funcionales durante el proceso:*

- El calcio se difunde al endospermo, fortaleciendo la red de almidón-proteína.
- Se solubilizan hemicelulosas del pericarpio, facilitando su desprendimiento.
- Se modifica la cristalinidad del almidón, lo cual mejora su digestibilidad y funcionalidad en masa.
- Se incrementa la disponibilidad de niacina y aminoácidos esenciales.
- 

*Impacto ambiental.* A pesar de sus beneficios, la nixtamalización tradicional presenta limitaciones importantes:

- Consumo de 2-3 L de agua/kg de grano.
- Uso intensivo de energía térmica (cocción prolongada).
- Generación de nejayote: efluente alcalino rico en materia orgánica, calcio, almidón solubilizado y pigmentos, con alta demanda bioquímica de oxígeno (Velasco-Martínez *et al.*, 1997).
- Problemas de disposición final, ya que pocas industrias realizan tratamiento previo.
- 

*Retos tecnológicos y económicos*

- Variabilidad en calidad de masa y tortilla según tipo de maíz y condiciones del proceso.

- Costos vinculados al tratamiento de aguas residuales.
- Limitada adaptabilidad a procesos automáticos y economía circular.

Estos desafíos han impulsado la exploración de tecnologías que disminuyan el uso de agua, residuos y consumo energético, sin comprometer la calidad sensorial y funcional del producto final.

### Molienda de alta energía (hem): principios y aplicaciones

La molienda de alta energía es un proceso mecánico intensivo (Cuadro 1) en el cual el grano de maíz, previamente acondicionado en humedad (14–23%) y con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (0.6–1.4%) (Amador-Rodríguez *et al.*, 2019; Amador-Rodríguez *et al.*, 2019), es sometido a colisiones repetidas dentro de un molino planetario de bolas. Esta energía mecánica provoca fractura del endospermo, reducción de tamaño de partícula, desestructuración de gránulos de almidón y exposición de proteínas.

#### Principio de funcionamiento

- Se utilizan molinos planetarios o attritores con esferas de acero o zirconia.
- Las bolas impactan el grano a 300–400 rpm generando fricción, compresión y cizalla (Amador-Rodríguez *et al.*, 2019).
- No se requiere cocción previa.
- Se puede aplicar en grano entero o molido a 0.5 mm.
- No genera nejayote.

Cuadro 1. Cambios inducidos en la estructura con la nixtamalización de alta energía.

Nivel	Efecto principal
Macroscópico	Ruptura del grano y disminución de tamaño de partículas.
Microscópico	Fractura de la matriz almidón-proteína; exposición de zeínas.
Cristalinidad	Reducción parcial de la ordenación del almidón.
Composición	Incorporación homogénea de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y mejor retención de pigmentos (maíz azul).

#### Investigaciones reportadas

- Estudios realizados entre 2019 y 2024 en México reportan lo siguiente:
- Viscosidades RVA superiores a 4000 cP (vs. 2000–2500 cP en nixtamal tradicional).
- En maíz azul, retención de 2–3 veces más antocianinas que con nixtamalización convencional (Amador-Rodríguez *et al.*, 2019).
- Eliminación total de nejayote y reducción de hasta 90% en uso de agua.

### Comparación tecnológica entre hem y nixtamalización tradicional

El contraste entre la molienda de alta energía (HEM) y la nixtamalización tradicional permite identificar diferencias clave en términos de propiedades fisicoquímicas, funcionalidad tecnológica, conservación de compuestos bioactivos y sostenibilidad. A continuación, se analizan los principales parámetros comparativos (Cuadro 2 y 3).

**Propiedades fisicoquímicas y reológicas.** Estudios han demostrado que las harinas obtenidas por HEM presentan una mayor viscosidad pico en los viscoamilogramas (4000–4300 cP) en comparación con las harinas nixtamalizadas tradicionales (2200–2500 cP) (Amador-Rodríguez *et al.*, 2020). Esta mayor viscosidad se asocia a una desorganización

parcial del almidón y al incremento de su capacidad de absorción de agua. La entalpía de gelatinización también disminuye en HEM, lo que indica una estructura más susceptible a la hidratación.

Cuadro 2. Cambios en diversos parámetros durante la nixtamalización tradicional vs. la nixtamalización de alta energía.

Parámetro	Nixtamalización tradicional	Nixtamalización de alta energía (HEM)
Viscosidad pico (RVA)	2000–2500 cP	3800–4300 cP
Entalpía de gelatinización	Mayor (almidón intacto)	Menor (almidón parcialmente desestructurado)
Absorción de agua	Dependiente del reposo y lavado	Aumentada por reducción de partícula

**Textura de masa.** Las masas producidas por HEM presentan mayor cohesividad y menor adhesividad que las masas provenientes de nixtamalización. Esto favorece el laminado industrial y reduce pérdidas por adherencia. La cohesión se explica por una mayor interacción entre almidón gelatinizado parcialmente y proteínas expuestas (Martínez-Bustos *et al.*, 2001).

**Microestructura.** El análisis por microscopía electrónica (ESEM) revela diferencias notables: HEM: gránulos de almidón fracturados, superficies rugosas y exposición de matriz proteica. Nixtamalización tradicional: gránulos más íntegros, matriz menos fragmentada, presencia de pericarpio parcialmente solubilizado.

**Compuestos bioactivos.** Una de las ventajas más relevantes de HEM es la mayor conservación de antocianinas y compuestos fenólicos en maíces pigmentados. En maíz azul, se reportan valores de hasta 750 mg/kg de antocianinas en HEM, frente a 250 mg/kg en nixtamal tradicional (Amador-Rodríguez *et al.*, 2019). Esto se debe a la ausencia de lixiviación en agua alcalina y a temperaturas más bajas de procesamiento.

Cuadro 3. Comparativo general del proceso de nixtamalización tradicional vs. la nixtamalización de alta energía.

Criterio	Nixtamalización tradicional	HEM
Agua utilizada	2–3 L/kg grano	<0.2 L/kg
Energía	Calor (cocción prolongada)	Mecánica (molino de bolas planetario)
Efluentes	Sí (nejayote)	No genera efluente
Conservación de pigmentos	Baja	Alta
Escalabilidad industrial	Alta	Baja – requiere pruebas de escalamiento a nivel industrial

### Impacto ambiental, energético y viabilidad industrial

#### Consumo de recursos

- Agua: La HEM utiliza 80–90% menos agua que la nixtamalización convencional.
- Energía: Mientras el método tradicional depende de energía térmica, la HEM requiere energía mecánica eléctrica. En estudios piloto, se estima un consumo energético 15–30% menor por kilogramo de harina producida (Amador-Rodríguez *et al.*, 2020).

*Eliminación del nejayote.* Uno de los principales beneficios de la HEM es que elimina totalmente la generación de nejayote, lo cual reduce la carga ambiental y los costos de tratamiento de residuos.

#### *Viabilidad industrial*

- La nixtamalización está ampliamente integrada a la infraestructura industrial y artesanal.
- La HEM requiere molinos planetarios, control de humedad y mezclado de calcio, lo cual implica inversión inicial.
- Su escalamiento es viable mediante molinos de bolas industriales horizontales de mayor capacidad que existen en la industria, aunque se destinan más para la industria metalúrgica o de materiales de construcción (Cuadro 4).

#### *Oportunidades industriales*

- Producción de harinas funcionales enriquecidas.
- Aplicación en botanas, masa deshidratada, tostadas y snacks.
- Integración en plantas con enfoque de economía circular.

Cuadro 3. Retos y desafíos para el escalamiento industrial de la nixtamalización por alta energía.

<b>Reto / vacío</b>	<b>Descripción</b>
Escalamiento industrial	Adaptar molinos planetarios a sistemas continuos industriales.
Consumo energético exacto	Faltan análisis de ciclo de vida comparativos con datos industriales reales.
Estabilidad de masas y tortillas	Evaluar vida de anaquel en refrigeración y almacenamiento.
Normativa y aceptación	Definir si puede llamarse legalmente tortilla o nixtamal.
Aplicación en otras gramíneas	Evaluar uso en sorgo, amaranto, trigo y arroz.

### **Conclusiones**

La molienda de alta energía representa (Figura 1) una alternativa ecoeficiente a la nixtamalización tradicional del maíz. Permite obtener harinas con mayor viscosidad, cohesividad, menor adhesividad y una notable conservación de compuestos bioactivos, especialmente en maíces pigmentados. Elimina la generación de nejayote y reduce significativamente el consumo de agua y energía. No obstante, enfrenta desafíos relacionados con su escalamiento industrial, aceptación normativa y validación sensorial. La evidencia científica disponible indica que no sustituye por completo a la nixtamalización tradicional, pero sí constituye una tecnología emergente con alto potencial para la producción de harinas funcionales, sostenibles e innovadoras.



Figura 1. Molino, elaboración de harina y tortillas obtenidas con el proceso de molino de alta energía.

### Referencias

- Amador-Rodríguez, K. Y., Martínez-Bustos, F., & Silos-Espino, H. (2019). Effect of High-Energy Milling on Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity in Nixtamalized Creole Corn Flours. *Plant Foods for Human Nutrition*. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00727-9>
- Amador-Rodríguez, K. Y., Silos-Espino, H., Perales-Segovia, C., Flores-Benitez, S., Valera-Montero, L. L., & Martínez-Bustos, F. (2020). High-energy alkaline milling as a potential physical and chemical cornstarch eco-friendly treatment to produce nixtamalized flours. *International Journal of Biological Macromolecules*, *164*, 3429–3437. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.132>
- Amador-Rodríguez, K. Y., Silos-Espino, H., Valera-Montero, L. L., Perales-Segovia, C., Flores-Benitez, S., & Martínez-bustos, F. (2019). Physico-chemical, thermal, and rheological properties of nixtamalized creole corn flours produced by high-energy milling. *Food Chemistry*, *283*(November 2018), 481–488. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.044>
- Escalante-Aburto, A., Mariscal-Moreno, R. M., Santiago-Ramos, D., & Ponce-García, N. (2020). An Update of Different Nixtamalization Technologies, and Its Effects on Chemical Composition and Nutritional Value of Corn Tortillas. *Food Reviews International*, *36*(5), 456–498. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1649693>
- Flores-Farias, R., Martínez-Bustos, F., Salinas-Moreno, Y., Chang, Y. K., Hernandez, J. G., & Rios, E. (2000). Physicochemical and rheological characteristics of commercial nixtamalised Mexican maize flours for tortillas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *80*(6), 657–664. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(20000501\)80:6<657::AID-JSFA576>3.0.CO;2-J](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(20000501)80:6<657::AID-JSFA576>3.0.CO;2-J)
- Garmendia, H. W. T. C. and. (2015). Determinación de humedad en harina precocida de maíz blanco utilizando un horno de microondas doméstico. *Instituto Nacional de Higiene "Rafael Rangel,"* *45*(2), 30–31.
- Martínez-Bustos, F., Martínez-Flores, H. E., San Martín-Martínez, E., Sánchez-Sinencio, F., Chang, Y. K., Barrera-Arellano, D., & Rios, E. (2001). Effect of the components of maize on the quality of masa and tortillas during the traditional nixtamalisation process. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *81*(15), 1455–1462. <https://doi.org/10.1002/jsfa.963>
- Rojas-Molina, I., Nieves-Hernandez, M. G., Gutierrez-Cortez, E., Barrón-García, O. Y., Gaytán-Martínez, M., & Rodriguez-Garcia, M. E. (2024). Physicochemical changes in starch during the conversion of corn to tortilla in the traditional nixtamalization process associated with RS2. *Food Chemistry*, *439* (November 2023). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138088>
- Velasco-Martínez, M., Angulo, O., Vazquez-Couturier, D. L., Arroyo-Lara, A., & Monroy-Rivera, J. A. (1997). Effect of dried solids of nejayote on broiler growth. *Poultry Science*, *76*(11), 1531–1534. <https://doi.org/10.1093/ps/76.11.1531>

## EFFECTO DEL MUCÍLAGO DE *PERESKIA ACULEATA* MILLER EN LA PÉRDIDA DE PESO Y CAMBIO DE COLOR DE *PERSEA AMERICANA* HASS.

[EFFECT OF *PERESKIA ACULEATA* MILLER MUCILAGE ON WEIGHT LOSS AND COLOR CHANGE OF *PERSEA AMERICANA* HASS.]

Karina Denise Álvarez-Contreras<sup>1</sup>, Ana Laura Reyes-Robles<sup>1</sup>, Margarita Martínez- García<sup>1</sup>, Julián López-Tinoco<sup>1</sup>, y Andrés Alejandro Damián-Reyna<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México /Instituto Tecnológico Superior de Puruándiro. División de Ingeniería en Industrias Alimentarias. Puruándiro, Michoacán, México. <sup>2</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. División de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química. Morelia, Michoacán, México.

\*Autor de correspondencia: andres.damian@puruandiro.tecnm.mx  
4729-1477.

ORCID:0000-0003-

### Resumen

El uso de recubrimientos en la actualidad ha tomado una mayor relevancia ya que sirven para incrementar la vida útil de productos hortofrutícolas. En esta investigación se utilizó el mucílago de *Pereskia aculeata* Miller, debido a sus propiedades plastificantes y antimicrobianas, para evitar la pérdida de peso, así como el cambio de color de *Persea americana* Hass en las diferentes condiciones de almacenamiento a las que fue sometido. Se probaron 3 temperaturas de almacenamiento de las frutas recubiertas (4, 24 y 37 °C), monitoreando el peso de cada fruta y el color superficial de acuerdo a la escala CieLAB. Se encontró que el uso de *Pereskia aculeata* Miller tuvo un efecto positivo en la preservación de las características de peso (hasta 4% menos pérdida) y color (hasta 8%) en las condiciones de prueba. Estos resultados sugieren que el recubrimiento elaborado con mucílago de *Pereskia aculeata* Miller tiene un potencial en su uso sustentable para prolongar la vida de anaquel de de *Persea americana* Hass, así como de frutas y vegetales.

Palabras clave: Recubrimiento, microbicida, vida de anaquel, biopolímero.

### Abstract

The use of coatings has become increasingly important today as they serve to increase the shelf life of fruit and vegetable products. In this research, the mucilage of *Pereskia aculeata* Miller was used, due to its plasticizing and antimicrobial properties, to prevent weight loss and color change in *Persea americana* Hass under different storage conditions. Three storage temperatures were tested for the coated fruits (4, 24, and 37 °C), monitoring the weight of each fruit and the surface color according to the CieLAB scale. The use of *Pereskia aculeata* Miller was found to have a positive effect on the preservation of weight (up to 4% less loss) and color (up to 8%) under the test conditions. These results suggest that the coating made from *Pereskia aculeata* Miller mucilage has potential for sustainable use in extending the shelf life of *Persea americana* Hass, as well as other fruits and vegetables.

Key words: Coating, microbicidal, shelf life, biopolymer.

### Introducción

El uso de películas y recubrimientos comestibles ha cobrado mayor importancia en la actualidad porque contribuyen a extender la vida útil de los productos hortofrutícolas, que son muy consumidos y tienen un alto valor económico, pero son también extremadamente perecederos (FAO, 2018). Por esta razón, es necesario crear métodos para alargar su vida útil sin añadir conservantes químicos ni empaques que empeoren los problemas de contaminación plástica.

De esta manera, se desarrolla el concepto de películas comestibles. Cerdas-Araya *et al.*, (2014) señalan que existe una relación entre los índices de madurez de cosecha y la calidad poscosecha de los frutos. Actualmente, se utilizan indicadores de madurez de cosecha como longitud y diámetro de los frutos, presencia o ausencia de brillo en la cáscara, color de la cáscara, tiempo de desarrollo del fruto, número de días restantes para alcanzar la madurez, respiración y producción de etileno, firmeza de la pulpa, materia seca y contenido de aceite, entre otros (Cerdas-Araya *et al.*, 2006; Herrera-González *et al.*, 2017). El mucílago, una sustancia viscosa que secretan algunas suculentas (*Aloe vera*) y las pencas de las cactáceas (*Pereskia aculeata*, *Opuntia ficus*, entre otras), es un componente clave para la industria alimentaria porque proporciona fibra dietética. El mucílago del nopal es un polisacárido fibroso y muy ramificado, con un peso molecular que aproxima  $13 \times 10^6$  g/mol. De acuerdo con Gibson y Nobel (1990), contiene alrededor del 35 al 40 % de arabinosa, el 20 al 25 % de galactosa y xilosa respectivamente, y entre el 7 y el 8 % de ácido galacturónico y ramnosa cada uno. El mucílago de nopal es considerado relevante para la industria alimentaria por sus características viscosas (Sepúlveda *et al.*, 2006). Es capaz de crear redes moleculares y retener con firmeza grandes volúmenes de agua (Ruíz y Guerrero, 2009), así como de alterar características como la viscosidad, la elasticidad, la textura y la retención de agua. Además, es un gelificante, espesante y emulsificante eficaz (Álvarez *et al.*, 2007). Se entiende que las películas comestibles son una capa delgada y continua de un material polimérico capaz de funcionar como una barrera física para la protección del producto (Gonzalez *et al.*, 2015), a la que se le pueden agregar compuestos de origen vegetal con características antimicrobianas. Hoy en día, existe un interés creciente por los compuestos naturales que exhiben actividad microbicida y que se obtienen de fuentes biológicas de bajo costo, de forma inocua, con técnicas que permiten su ejecución en corto tiempo (Vollmerhausen *et al.*, 2013; Papetti, 2012) y que contribuyen a aumentar la vida útil de los productos alimenticios (Knorr *et al.*, 2011), como las frutas y verduras. Una forma de satisfacer la necesidad de ampliar la vida útil del anaquel es a través de la investigación de extracción, purificación y caracterización de extractos obtenidos en el sector de la industria alimentaria (Damián-Reyna *et al.*, 2016).

## Materiales y métodos

### Lugar donde se realizó la investigación

Los experimentos fueron realizados en el laboratorio de biotecnología del Instituto Tecnológico Superior de Puruándiro, carretera Puruándiro Galeana km 4.3, 58532 Puruándiro, Michoacán, 20.09°N, 101.52°W, 1891 m.s.n.m., temperatura anual promedio 20.9 °C, precipitación anual 828.25 mm. El material vegetal empleado (*Pereskia aculeata*) fue adquirido del huerto de la institución. Los frutos empleados fueron adquiridos en una comunidad perteneciente al municipio, en un punto de maduración incompleto (Astudillo-Ordóñez *et al.*, 2018) y pertenecen a la variedad "Hass".

### Obtención del mucílago

Para la extracción de mucílago la hoja se maceró con agua, en una proporción de 1:4. Posteriormente se filtró y pasteurizó el mucílago, y se mantuvo en refrigeración a 4 °C hasta su posterior uso, para el recubrimiento se tomó mucílago previamente pasteurizado, se le adiciono almidón de maíz y glicerina (100:5:3), se agito hasta homogenizar y posteriormente se aplicó de manera uniforme sobre los frutos.

### Procedimiento para recubrimiento de frutos

Se realizó un diseño de experimentos de superficie de respuesta, para el monitoreo de pérdida de peso y cambios en la coloración a frutos de aguacate, con 2 factores, tipo de recubrimiento CR (Con Recubrimiento) y SR (Sin Recubrimiento), y temperatura de almacenamiento (4 °C, 24 °C y 37 °C), determinando 3 réplicas independientes para cada tratamiento, por un tiempo de 17 días. El nivel de CO<sub>2</sub> y humedad en las condiciones de almacenamiento se determinó con un detector de dióxido de carbono Marca DJETCo JD-112. Se analizó el color mediante un colorímetro Marca FRU WR-10QC, con la escala CIELab (coordenadas L, a\* y b\*). La coordenada L\* muestra el nivel de claridad del color, en un intervalo de 0 – 100, mientras más próximo el valor a cero más oscuro es el tono. La coordenada a\* en números > 0 muestra la tendencia a rojo y en números < 0 tiende al verde. La coordenada b\* en valores > 0 muestra la tendencia del amarillo y en valores < 0 tiende al azul (Moysén-Chávez, 2006), siguiendo las instrucciones del manual del equipo. El cambio de color se expresó como  $\Delta L$ ,  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$ , respectivamente, de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$\Delta L = L_{final} - L_{inicial}$$

$$\Delta a = a_{final} - a_{inicial}$$

$$\Delta b = b_{final} - b_{inicial}$$

### Análisis de datos

Para identificar los resultados significativamente diferentes, se realizaron las comparaciones en parejas, utilizando el método de Tukey y una confianza del 95%.

## Resultados y discusión

### Condiciones de conservación de frutos

Los frutos de *P. americana* fueron sometidos a condiciones de almacenamiento estables durante el período de observación, como se muestra en la Figura 1.

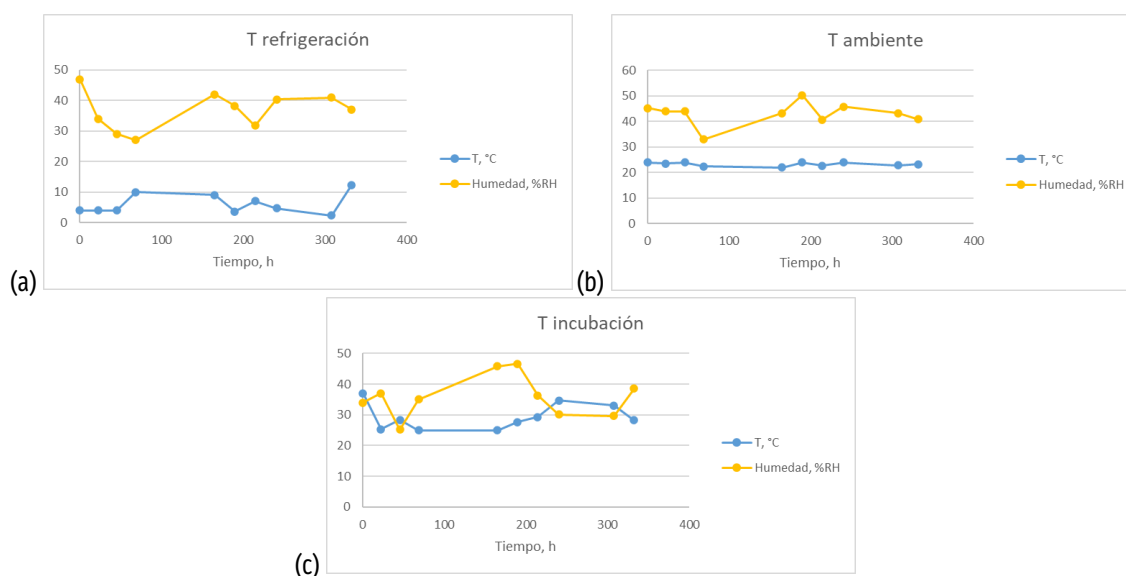


Figura 1. Condiciones de almacenamiento (Temperatura y humedad ambientales) de frutos de *P. americana* en temperatura de 4 °C (a), 24 °C (b) y 37 °C (c), durante el período de observación.

### Comportamiento climatérico de frutos de aguacate

Los frutos tratados mostraron un patrón climatérico típico, alcanzado un máximo el día 8, en el que se observó un pico en la presencia de CO<sub>2</sub> de 2404 ppm (Figura 2), lo que concuerda con López y Cajuste (1999) y Tochihuitl-Martiñón (2018).

En el Cuadro 1 se muestra porcentaje de descenso de peso que tuvieron los frutos a las distintas temperaturas, de los cuales los tratamientos CR (Con recubrimiento) y SR (Sin Recubriendo) para las temperaturas 37°C y 24°C no presentaron diferencias significativas, mientras que para la temperatura de 4°C los frutos CR (con recubrimiento) si presentaron una diferencia significativa siendo este tratamiento el más indicado para conservar la humedad del fruto. En un estudio relacionado publicado por Magaña *et al.* (2013) se hace mención acerca de la pérdida de peso en frutos y cómo este está asociado a la pérdida de agua. Cuando los frutos son cosechados, son expuestos a temperatura ambiente por varios días, lo cual ocasiona una pérdida de peso, siendo un efecto no deseado para los productores. En el cambio del color, se observó que el recubrimiento permitió disminuir el descenso en el nivel de claridad de la

muestra (Figura 3) observando el mayor efecto a la temperatura de 24 °C; los resultados en la coordenada a\* indican también que el recubrimiento de los frutos permitió mantener el color verde, observando el mayor efecto a la temperatura de 37 °C; la coordenada b\* confirma también el retardo en la aparición de tonos amarillos (Cuadro 2). Estos resultados sugieren que el uso de *Pereskia aculeata* Miller en frutos de *P. americana* Hass permite mantener el color por un tiempo más prolongado que en aquellos frutos sin tratamiento.

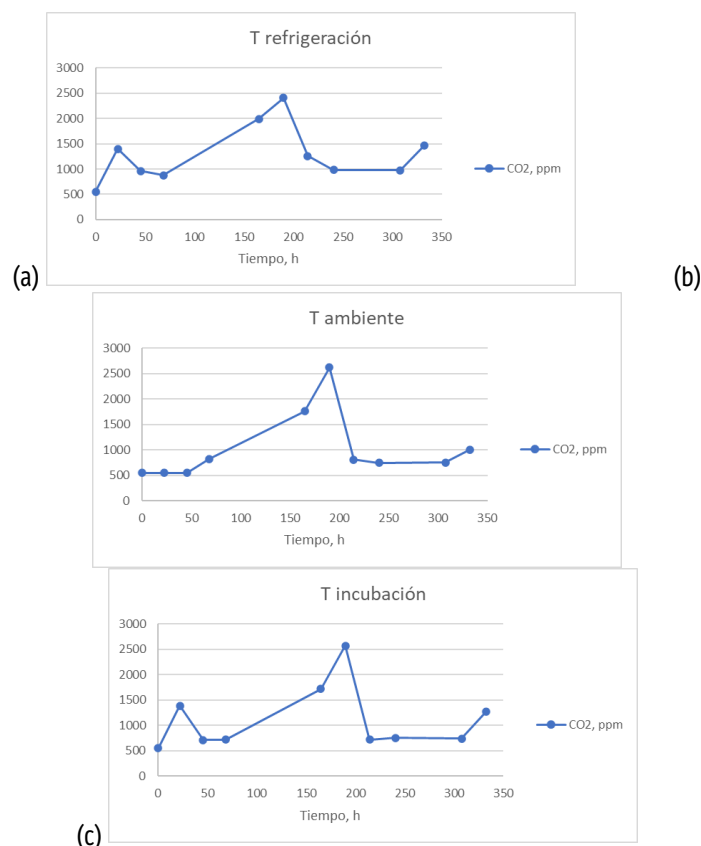


Figura 2. Comportamiento de la respiración de frutos de *P. americana* a temperatura de 4°C (a), 24 °C(b) y 37 °C (c).

Cuadro 1. Porcentaje de descenso en peso en el aguacate sin recubrimiento (SR) y con recubrimiento (CR) a distintas temperaturas de almacenamiento (TR 4°C, TA 24 °C, TI 37 °C), promedio +/- SD. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

	% peso	
	SR	CR
TR	4.8 +/- 0.37 <sup>A</sup>	6.1 +/- 0.45 <sup>B</sup>
TA	36.4 +/- 3.03 <sup>A</sup>	37.3 +/- 2.42 <sup>A</sup>
TI	47.7 +/- 3.57 <sup>A</sup>	43.3 +/- 3.47 <sup>A</sup>

Cuadro 2. Cambio en color en el aguacate sin recubrimiento (SR) y con recubrimiento (CR) a distintas temperaturas de almacenamiento (TR 4 °C, TA 24 °C, TI 37 °C), promedio +/- SD. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

	$\Delta L$		$\Delta a^*$		$\Delta b^*$	
	SR	CR	SR	CR	SR	CR
TR	-4.4 +/- 0.22 <sup>A</sup>	-4.6 +/- 0.28 <sup>A</sup>	3.2 +/- 0.10 <sup>A</sup>	0.5 +/- 0.04 <sup>AB</sup>	-2.1 +/- 0.07 <sup>A</sup>	1.1 +/- 0.11 <sup>A</sup>
TA	-5.8 +/- 0.17 <sup>A</sup>	-3.9 +/- 0.16 <sup>A</sup>	-2.6 +/- 0.12 <sup>B</sup>	-3.1 +/- 0.11 <sup>B</sup>	-1.9 +/- 0.07 <sup>A</sup>	-2.6 +/- 0.09 <sup>A</sup>
TI	-6.4 +/- 0.30 <sup>A</sup>	-5.4 +/- 0.19 <sup>A</sup>	-0.6 +/- 0.06 <sup>B</sup>	-2.1 +/- 0.09 <sup>B</sup>	-0.9 +/- 0.07 <sup>A</sup>	-3.4 +/- 0.12 <sup>A</sup>

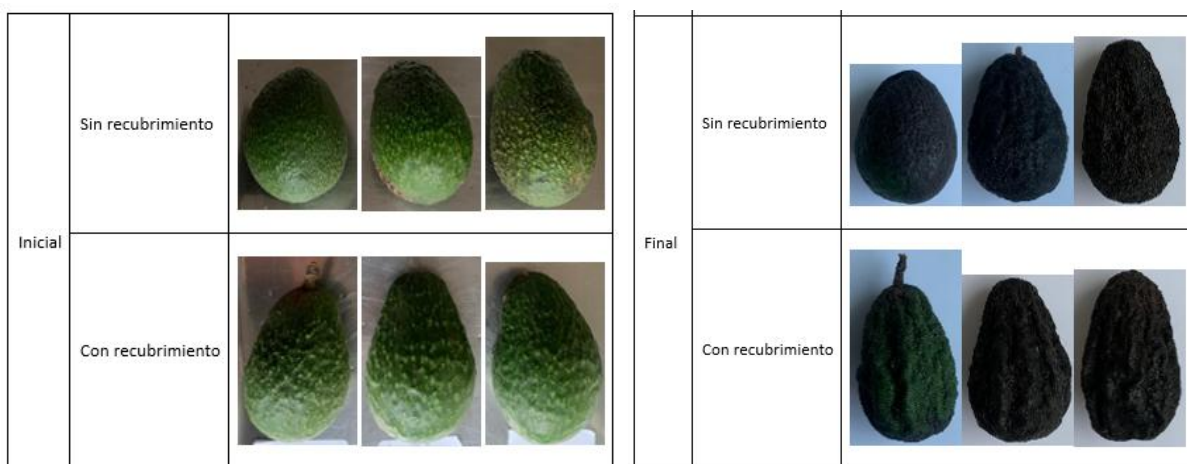


Figura 3. Frutos de aguacate (*Persea americana*) con y sin recubrimiento de mucílago de *Pereskia aculeata* Miller.

### Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se confirma que la aplicación del recubrimiento elaborado de *Pereskia aculeata* Miller en frutos *Persea americana* Hass efectivamente ayuda a prolongar la vida de anaquel del fruto, para temperaturas de 4°C ±2 mientras que el uso de este para temperaturas más altas (37°C, 24°C) no presenta diferencias estadísticamente significativas, por lo cual la aplicación más óptima de este recubrimiento podría estar en frutos cosechados que se encuentren expuestos a temperaturas de refrigeración de alrededor de 4°C.

### Referencias

- Álvarez, O. C., Díaz S. C., Ramírez V. D. y Yáñez F.J. (2007). "Secado por Aspersión de Mucílago de Nopal". IX Congreso de ciencia de los alimentos y V Foro de ciencia y tecnología de alimentos. Departamento de Bioingeniería. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. IPN. Guanajuato, Gto. 277.
- Andrews, J. (2001). Determination of minimum inhibitory concentrations. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 48(S1), 5-16.
- FAO. (2018, 18 mayo). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: Fortalece México marco legal para evitar las pérdidas y el desperdicio de alimentos | FAO en México | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/mexico/noticias/detail-events/es/c/1127184/>

- Damián-Reyna, A., González-Hernández, J., & Chávez-Parga, M. (2016). Current procedures for extraction and purification of *Citrus* flavonoides. *Revista Colombiana de biotecnología*, XVIII(1), 135-147.
- Espino-Díaz, M.; Ornelas-Paz, J.; Martínez-Tellez, M.; Santillan C.; Barbosa-Canovas, G.; Zamudio-Flores, P.B. y Olivas, I. (2010). Development and Characterization of Edible Films Based on Mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.). *Journal of Food Science*. 75: 347-352.
- Gibson, C. A., Nobel, S. P. (1990). *The cactus primer*. First Harvard University Press paperback edition. 196-199.
- González-Cuello, R.E., Urbina Suarez, N., Morón Alcázar, L.B. (2015). Caracterización Viscoelástica de Biopelículas Obtenidas a Base de Mezclas Binarias, *Inf tecnol*, 26(3): 71-76
- Klančnik, A., Piskernik, S., Jeršek, B., & Možina, S. (2010). Evaluation of diffusion and dilution methods to determine the antibacterial activity of plant extracts. *Journal of Microbiological Methods*, 81, 121-126.
- Knorr, D., Froehling, A., Jaeger, H., Reineke, K., Schlueeter, O., & Schoessler, K. (2011). Emerging Technologies in Food Processing. *Annual Reviews of Food Science Technology*, 2, 203-235.
- Papetti, A. (2012). Isolation and characterization of antimicrobial food components. *Current Opinion in Biotechnology*, 23, 168-173.
- Ruiz, H. F., Guerrero, B. J. A. (2009). "Aplicación de las películas comestibles a base de quimostato y mucílago de nopal en fresa (*Fragaria ananasa*) en refrigeración". Tesis de maestría. Ciencia en alimentos. Universidad de las Américas Puebla. Puebla. 21-23.
- Tochihuitl-Martíñón, Anahi, Chávez-Franco, Sergio Humberto, Saucedo-Veloz, Crescenciano, Suarez-Espinosa, Javier, & Guerra-Ramírez, Diana. (2018). Extractos de *Persea americana* Mill. que retrasan la maduración en frutos de aguacate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(8), 1639-1650. Epub 06 de octubre de 2020. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.1720>
- USDA. 2016. Nutrient values and weights are for edible portion. <http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome>
- Sepúlveda, E., Saenz, C. Aliaga, E. & Aceituno, c. (2006). "Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp". Dto. de Agroindustria y Enología, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago Chile.
- Vollmerhausen, T., Ramos, N., Thi, D., Dzung, N., & Brauner, A. (2013). Decoctions from *Citrus reticulata* Blanco seeds protect the uroepithelium against *Escherichia coli* invasion. *Journal of Ethnopharmacology*, 150, 770-774.
- Zhang, W., Jiang, S., Qian, D., Shang, E., & Duan, J. (2014). Determination of Metabolism of Neohesperidin by Human Intestinal Bacteria by UPLC-Q-TOF/MS. *Chromatographia*, 77, 439-445.

## SECCIÓN BIOTECNOLOGÍA DE PLANTAS



## OBTENCION DE ADN GENOMICO DE CHILE YAHUALICA PARA CARACTERIZACIÓN GENOTÍPICA Y CONSERVACIÓN (*Capsicum annuum* L.)

[OBTAINING GENOMIC DNA FROM YAHUALICA CHILE FOR GENOTYPIC CHARACTERIZATION AND CONSERVATION (*Capsicum annuum* L.)]

S. L. Cárdenas-Limón<sup>1</sup>, L. F. Guzmán<sup>2\*</sup>, M. A. Aragón-Magadán<sup>2</sup>, Carlos Iván Cruz-Cárdenas<sup>2</sup>, B. A. Amaro-González<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Centro Universitario de los Lagos-Universidad de Guadalajara. Av. Enrique Díaz de León No. 1144, Colonia Paseos de la Montaña, C.P. 47460, Lagos de Moreno, Jalisco, México. <sup>2</sup>Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP. Boulevard de la Biodiversidad 400, Colonia Rancho de Las Cruces. Km 8 carretera Tepatitlán-Lagos de Moreno, C. P. 47600, Tepatitlán de Morelos, Jal., México.

\*Autor para correspondencia: guzman.luis@inifap.gob.mx

ORCID: 0000-0002-1663-3457

### Resumen

El chile Yahuallica (*Capsicum annuum* L.) es una especie endémica de México con denominación de origen y alto valor cultural. La conservación de la información genética como método complementario de preservación del germoplasma requiere protocolos eficientes de extracción de ADN que garanticen la concentración y calidad de los ácidos nucleicos. El objetivo de este estudio fue obtener DNA genómico de chile Yahuallica para caracterización genotípica y conservación. El ADN se obtuvo de 128 plántulas de 11 accesiones de chile Yahuallica mediante el método convencional con solución buffer de CTAB con modificaciones. La concentración promedio obtenida fue de 166.4 ng/μL, con valores promedio de las relaciones  $A_{260/280}$  y  $A_{260/230}$  de  $1.76 \pm 0.003$  y  $1.63 \pm 0.013$ , respectivamente. En el análisis estadístico se observaron diferencias significativas en la concentración entre accesiones ( $p < 0.0001$ ), mientras que en las relaciones de pureza no se presentó significancia. La integridad del ADN se verificó con la observación de bandas a 46 kb de tamaño molecular por electroforesis en agarosa al 1 % y la funcionalidad se confirmó con la amplificación del gen *rbcl* por PCR punto final. Con los resultados se concluye que el DNA obtenido es adecuado para su resguardo en la Colección de Ácidos Nucleicos del CNRG y para caracterización genotípica posterior.

**Palabras clave:** Chile, DNA, conservación, caracterización, Yahuallica.

### Abstract

The Yahuallica chili pepper (*Capsicum annuum* L.) is a species endemic to Mexico with designation of origin and high cultural value. The conservation of genetic information as a complementary method of germplasm preservation requires efficient DNA extraction protocols that guarantee the concentration and quality of nucleic acids. The objective of this study was to obtain genomic DNA from Yahuallica chili peppers for genotypic characterization and conservation. DNA was obtained from 128 seedlings from 11 Yahuallica chili pepper accessions using the conventional method with CTAB buffer solution with modifications. The average concentration obtained was 166.4 ng/μL, with average values for the  $A_{260/280}$  and  $A_{260/230}$  ratios of  $1.76 \pm 0.003$  and  $1.63 \pm 0.013$ , respectively. Statistical analysis revealed significant differences in concentration between accessions ( $p < 0.0001$ ), while no significance was found in purity ratios. DNA integrity was verified by observing bands at 46 kb molecular size by 1% agarose electrophoresis, and functionality was confirmed by amplification of the *rbcl* gene by endpoint PCR. The results conclude that the DNA obtained is suitable for storage in the CNRG Nucleic Acid Collection and for subsequent genotypic characterization.

**Keywords:** Capsicum, DNA, conservation, characterization, Yahuallica.

## Introducción

El Chile Yahuallica es una especie endémica de la región de los Altos de Jalisco perteneciente al género *Capsicum*, reconocida con denominación de origen y con relevancia gastronómica, económica y cultural de la región (García-Moreira *et al.*, 2024). Las especies endémicas presentan características fenotípicas y genotípicas únicas, que pueden analizarse mediante el estudio de la fisiología, morfología y genotipo (Arteaga *et al.*, 2015). La caracterización permite determinar rasgos genéticos para medir la variabilidad genética de la especie (Aranguren-Díaz *et al.*, 2018).

En la conservación de este recurso genético y preservación de la diversidad genética, se emplean protocolos de aislamiento de ADN que permitan obtener ácidos nucleicos en concentraciones suficientes y con parámetros adecuados de calidad (Nath *et al.*, 2022). La calidad se evalúa mediante indicadores de pureza, integridad y funcionalidad del ADN (Guzmán *et al.*, 2018). La extracción rápida y eficiente de ADN de alta calidad es un requisito previo para técnicas de caracterización genotípica como secuenciación masiva, mapeo genético, huella genética, selección asistida por marcadores moleculares y autenticación de especies, incluyendo las variedades de Chile destinadas a la exportación (Abdel-Latif & Osman, 2017). Previo al proceso de extracción, el manejo de las plantas o plántulas resulta determinante en la preparación de muestras, ya que el estrés oxidativo compromete la integridad y funcionalidad a largo plazo de los productos obtenidos (Lucena-Aguilar *et al.*, 2016). Además, en hojas de *Capsicum* se ha reportado la presencia de metabolitos secundarios principalmente compuestos fenólicos y flavonoides, los cuales pueden precipitar junto con los ácidos nucleicos y disminuir la pureza o incluso inhibir reacciones de amplificación por PCR (Kim *et al.*, 2014; Xu & Wang, 2025). Este comportamiento metabólico resalta la importancia de optimizar los protocolos de extracción en función del tejido utilizado. El objetivo de este estudio fue obtener ADN genómico de plántulas de Chile Yahuallica para caracterización genotípica y conservación a largo plazo.

## Materiales y métodos

### Material vegetal de Chile

Se incluyeron 128 plántulas de 11 accesiones de Chile Yahuallica conservadas en la colección de semillas ortodoxas del Centro Nacional de Recursos Genéticos - INIFAP. Se utilizó tejido foliar de plántulas en etapa previa a la floración. El material vegetal fue liofilizado y posteriormente pulverizado. A partir de 20 mg de tejido seco se obtuvo ADN genómico mediante el método convencional con solución amortiguadora de bromuro de cetil-trimetil-amonio CTAB (Saghai-Marooif *et al.*, 1984), con modificaciones en la concentración de los agentes de la solución buffer de extracción (100 mM de Tris-HCl pH=7.5, 1,400 mM de NaCl, 20 mM de EDTA, 280 mM de BME, CTAB al 2% y PVP al 1%) y la purificación se realizó con alcohol isopropílico en lugar de etanol, para optimizar la pureza y rendimiento.

### Calidad del ADN de Chile

La concentración, pureza, integridad y funcionalidad del ADN se evaluaron con el fin de obtener ácidos nucleicos adecuados para caracterización genotípica y conservación. La concentración y pureza del ADN se determinaron mediante espectrofotometría en un equipo Nanodrop2000 (Thermo Scientific) registrando la absorbancia a 260 nm de longitud de onda y las relaciones  $A_{260/280}$  y  $A_{260/230}$ , respectivamente (Nath *et al.*, 2022). La integridad del material genético se comprobó mediante electroforesis en gel de agarosa al 1% a 100 V por 30 min (Guzmán *et al.*, 2018). La funcionalidad del DNA se evaluó por amplificación de un fragmento de 606 pb del gen *rbcl* por PCR punto final (Lopes *et al.*, 1995) y se visualizaron los productos amplificados mediante electroforesis en gel de agarosa al 2 % teñido con GelRed (Biotium Inc., Hayward, CA, USA) a 100 V durante 90 min.

### Análisis de datos

El diseño experimental aplicado fue simple, completamente al azar. El análisis estadístico comprendió el análisis de varianza, considerando como variables dependientes la concentración de DNA y los valores de las relaciones  $A_{260/280}$  y  $A_{260/230}$ . La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) empleando el programa RStudio con la librería *agricolae* (Posit team, 2025).

## Resultados y discusión

### Concentración y pureza del DNA

En el Cuadro 1, se presentan los resultados de la concentración y relaciones  $A_{260/280}$  y  $A_{260/230}$  de todas las extracciones de ADN realizadas. El promedio de la concentración de DNA fue  $166.4 \pm 5.36$  ng/ $\mu$ L. En el presente estudio, con el método convencional con solución buffer con CTAB, se obtuvieron concentraciones mayores a 100 ng/ $\mu$ L, lo cual es lo recomendado en (Guzmán *et al.*, 2018) para el uso del ADN en secuenciación y conservación. Por otra parte, la pureza de los ácidos nucleicos fue determinada con las relaciones  $A_{260/280}$  y  $A_{260/230}$ . La relación  $A_{260/280}$  se observó dentro del rango aceptado de 1.7–2.0 (Lucena-Aguilar *et al.*, 2016) en todas las accesiones, con un promedio de  $1.76 \pm 0.003$ . En la Figura 1 se presenta la gráfica de caja y línea con una distribución homogénea de los valores entre accesiones, lo que confirma la obtención de ADN con pureza adecuada para aplicaciones moleculares.

Cuadro 1. Resultados de concentración y pureza del ADN obtenido a partir de plántulas de chile Yahualica.

Muestra	Concentración [ng/ $\mu$ L]	Relación $A_{260/280}$	Relación $A_{260/230}$	Muestra	Concentración [ng/ $\mu$ L]	Relación $A_{260/280}$	Relación $A_{260/230}$
003-1	204	1.75	1.78	009-3	121	1.75	1.55
003-1	140	1.74	1.64	009-3	121	1.73	1.39
003-1	99	1.70	1.67	009-3	117	1.74	1.52
004-1	190	1.75	1.44	011-1	190	1.79	1.58
004-1	177	1.78	1.71	011-1	169	1.79	1.69
004-1	120	1.68	1.03	011-1	163	1.83	1.96
004-1	107	1.77	1.39	011-1	145	1.78	1.54
004-1	100	1.77	1.51	011-1	140	1.76	1.49
004-1	79	1.76	1.41	011-1	100	1.79	1.61
004-2	227	1.76	1.55	011-1	99	1.76	1.48
004-2	169	1.78	1.65	011-2	218	1.77	1.68
004-2	164	1.77	1.59	011-2	198	1.79	1.74
004-2	133	1.77	1.46	011-2	125	1.80	1.66
004-3	278	1.81	1.64	011-2	106	1.78	1.71
004-3	228	1.79	1.57	011-2	101	1.76	1.41
004-3	225	1.77	1.53	011-2	92	1.80	1.62
004-3	104	1.77	1.55	011-3	164	1.46	0.49
005-1	113	1.77	1.53	011-3	137	1.80	1.61
005-2	177	1.79	1.66	011-3	121	1.75	1.67
005-2	175	1.77	1.59	011-3	96	1.76	1.60
005-2	153	1.76	1.52	013-1	171	1.76	1.44
005-2	149	1.77	1.61	013-1	158	1.75	1.46
005-2	144	1.75	1.51	013-1	154	1.77	1.59
006-1	185	1.76	1.52	013-1	129	1.73	1.68
006-1	183	1.77	1.56	013-2	150	1.76	1.73
006-1	179	1.78	1.64	013-2	148	1.76	1.64
006-1	167	1.76	1.55	013-2	79	1.79	1.66

006-1	166	1.77	1.60	013-3	134	1.81	1.85
006-2	150	1.74	1.36	013-3	130	1.72	1.49
006-2	137	1.71	1.50	013-3	125	1.71	1.49
006-2	122	1.75	2.26	014-1	177	1.80	1.60
006-3	223	1.79	1.68	014-1	152	1.78	1.95
006-3	182	1.78	1.57	014-1	132	1.75	1.53
006-3	165	1.75	1.44	014-1	102	1.76	1.47
007-1	144	1.75	1.54	014-1	63	1.77	1.45
007-1	131	1.73	1.29	014-1	47	1.78	2.19
007-1	125	1.77	1.41	014-2	398	1.80	1.78
007-1	125	1.67	0.97	014-2	378	1.77	1.42
007-1	118	1.75	1.35	014-2	372	1.79	1.67
007-1	115	1.75	1.71	014-2	306	1.79	1.66
007-1	99	1.75	1.65	014-2	291	1.78	1.67
007-1	95	1.74	1.36	014-2	286	1.79	1.69
008-1	242	1.77	1.71	014-2	277	1.78	1.55
008-1	216	1.77	1.53	014-2	275	1.78	1.70
008-1	206	1.76	1.63	014-2	274	1.79	1.69
008-1	185	1.73	1.43	014-2	269	1.79	1.67
008-2	155	1.77	1.62	014-2	265	1.79	1.72
008-3	231	1.75	1.56	014-3	223	1.78	1.56
008-3	229	1.73	1.52	014-3	167	1.77	1.60
008-3	181	1.78	1.62	014-3	128	1.78	1.47
008-3	178	1.76	1.60	014-3	124	1.76	1.72
008-3	175	1.78	1.57	014-3	111	1.75	1.38
008-3	161	1.75	1.58	015-1	194	1.72	1.89
009-1	159	1.79	1.63	015-1	193	1.76	1.61
009-1	157	1.78	1.63	015-1	175	1.77	1.99
009-1	151	1.77	1.43	015-2	209	1.79	1.74
009-1	125	1.71	1.24	015-2	167	1.80	1.79
009-1	83	1.73	2.37	015-2	157	1.78	1.61
009-2	232	1.78	1.63	015-2	148	1.78	1.53
009-2	198	1.78	1.80	015-3	182	1.76	1.67
009-2	160	1.76	1.85	015-3	172	1.78	1.70
009-2	118	1.76	1.76	015-3	166	1.78	1.77
009-3	176	1.77	1.56	015-3	163	1.80	1.82
009-3	145	1.74	1.61	015-3	127	1.77	1.58

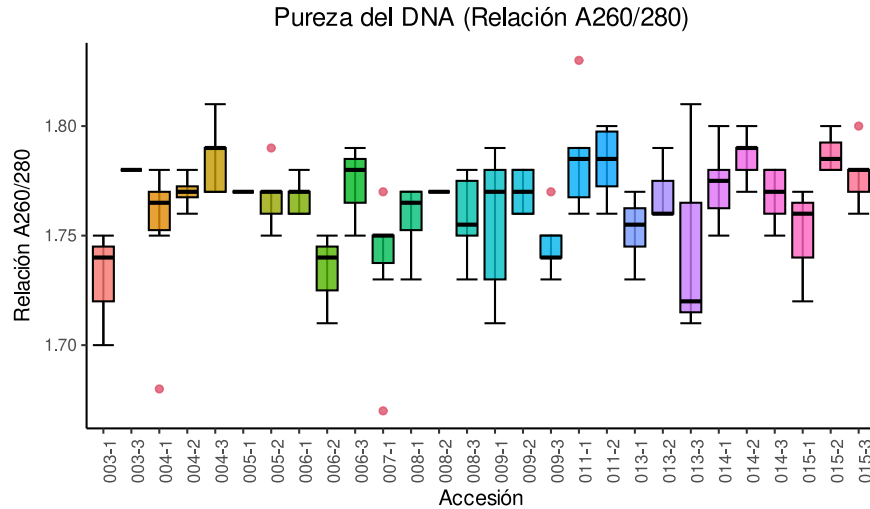


Figura 1. Gráfico de caja y línea de la relación  $A_{260/280}$  del ADN genómico obtenido a partir de tejido foliar de 11 accesiones de Chile Yahualica.

En el gráfico de caja y línea de la Figura 2 se presentan los valores de la relación  $A_{260/230}$  del ADN genómico de 11 accesiones de Chile Yahualica. El valor promedio de la relación  $A_{260/230}$  fue de  $1.63 \pm 0.013$ , no obstante, el valor promedio se encuentra por debajo del rango ideal de 2.0-2.2, lo cual sugiere la posible presencia de compuestos fenólicos o polisacáridos residuales (Guzmán *et al.*, 2018). Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza del tejido foliar de *Capsicum*, caracterizado por la acumulación de flavonoides y fenoles como parte de sus mecanismos de defensa (Kim *et al.*, 2014). La presencia de contenido fenólico en hojas de Chile resalta la importancia de optimizar protocolos de extracción de ADN específicamente para este género. La modificación de las concentraciones de agentes como PVP o  $\beta$ -mercaptoetanol o incluir más lavados con alcohol isopropílico podrían mejorar la eliminación de fenoles y, por ende, aumentar la pureza sin comprometer la integridad del ADN (Lucena-Aguilar *et al.*, 2016).

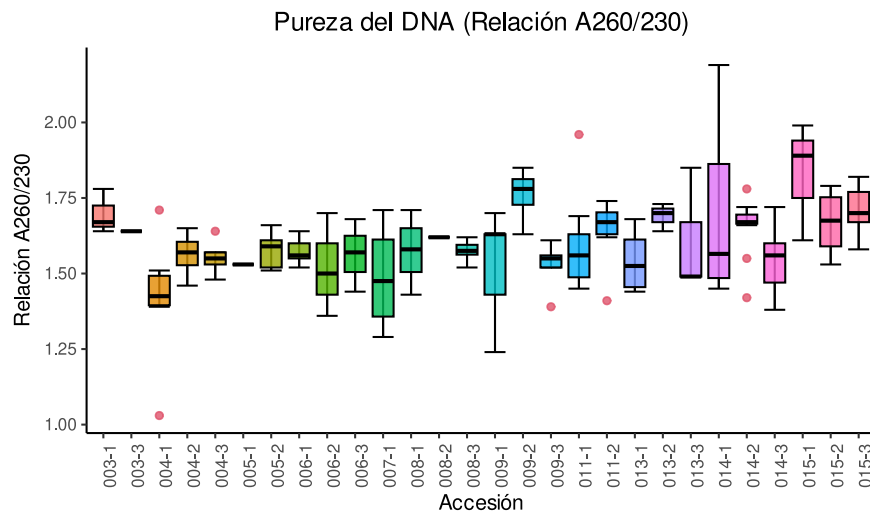


Figura 2. Gráfico de caja y línea de la relación  $A_{260/230}$  del ADN genómico obtenido a partir de tejido foliar de 11 accesiones de Chile Yhualica.

### Integridad del DNA

En la Figura 3, se observa la integridad del ADN en el gel de agarosa al 1 %. Las bandas migraron a la misma distancia que el marcador de peso molecular  $\lambda$ DNA, el cual corresponde a 46 Kb. Además, no se observan bandas con tamaño molecular menor que puede sugerir la presencia de degradación o un barrido, el cual, característico de la presencia de sales contaminantes (Lopez *et al.*, 2025).

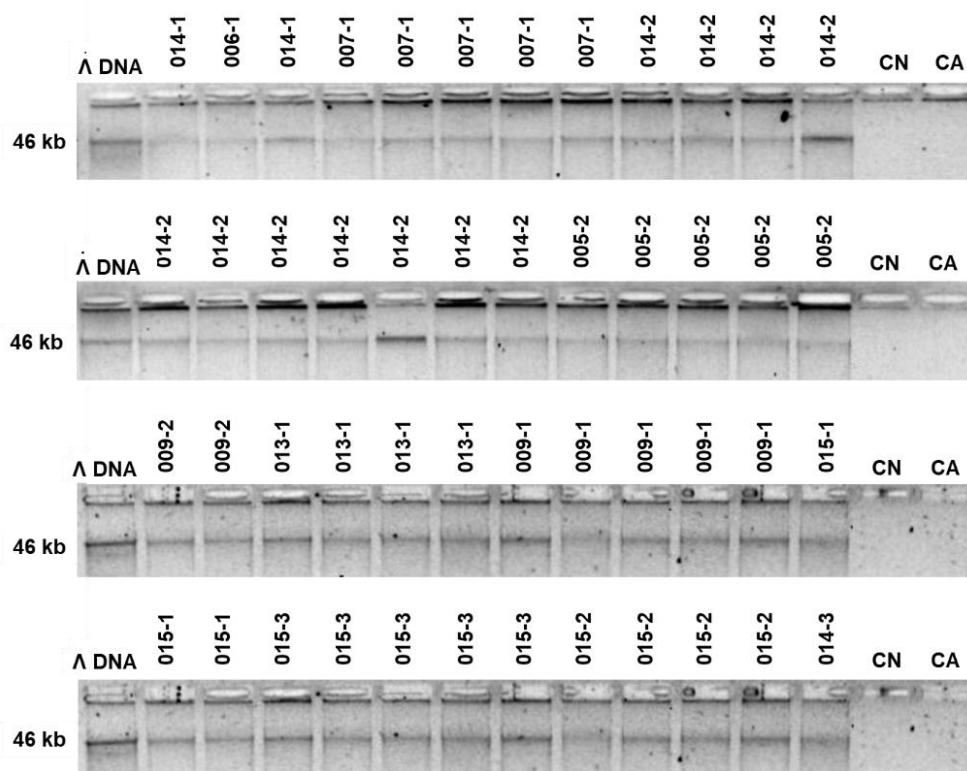


Figura 3. Electroforesis en gel de agarosa al 1% del ADN genómico de Chile Yhualica.  $\lambda$ DNA: marcador de peso molecular. CN: Control negativo. CA: Control ambiental.

### Funcionalidad del DNA

En la Figura 4 se observa la electroforesis en gel de agarosa al 2% del producto amplificado de un fragmento de 606 pb del gen *rbcL*. En dicha figura, el producto amplificado presenta buen rendimiento a una distancia correspondiente a 606 pb en todas las muestras, lo cual, coincide con el marcador de peso molecular y el control positivo (Lopes *et al.*, 1995). Los resultados obtenidos sugieren que las muestras de ADN no presentan sustancias residuales inhibitoras de PCR. A pesar de la posible presencia de contaminantes en bajas concentraciones, de acuerdo con los resultados de las relaciones  $A_{260/230}$ , las pruebas de calidad de integridad y funcionalidad permiten observar que se obtuvo DNA adecuado para caracterización genotípica y conservación, siguiendo el método de aislamiento empleado.

A pesar de la posible presencia de contaminantes en bajas concentraciones, de acuerdo con los resultados de las relaciones  $A_{260/230}$ , las pruebas de calidad de integridad y funcionalidad permiten observar que se obtuvo DNA adecuado para caracterización genotípica y conservación, siguiendo el método de aislamiento empleado.

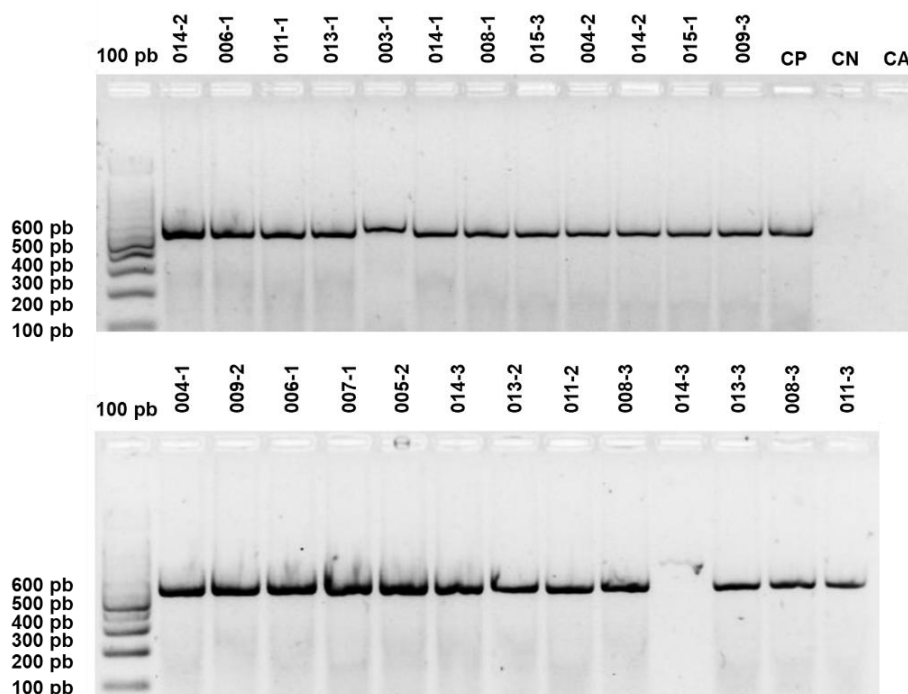


Figura 4. Electroforesis de productos amplificados del gen *rbd* en gel de agarosa al 2 %. 100 pb: marcador de peso molecular escalera de 100 pb. CP: Control positivo. CN: Control negativo. CA: Control ambiental.

### Interpretación estadística

En el análisis de varianza, la variable concentración presentó diferencias significativas entre las diferentes accesiones de Chile Yahuallica ( $p < 0.0001$ ), mientras que en las relaciones  $A_{260/280}$  y  $A_{260/230}$  no se observaron diferencias significativas entre las accesiones ( $p = 0.0003$  y  $p = 0.0438$ , respectivamente). La comparación de medias con la prueba Tukey de la variable concentración se presenta en el Cuadro 2. En dicho cuadro se observan dos grupos, en el cual, la accesión número 14 presentó la media más alta con  $218.9 \text{ ng}/\mu\text{L}$  y fue significativamente diferente con las accesiones 09, 11, 13 y 07, mientras que, la accesión con el número 07 presentó la media más baja con  $119.0 \text{ ng}/\mu\text{L}$  y fue significativamente diferente con la accesión 14.

### Conclusiones

El ADN genómico de Chile Yahuallica (*Capsicum annuum* L.) obtenido a partir de tejido foliar mediante la estandarización del protocolo reportado previamente por Saghai-Marooif *et al.* (1984) con modificaciones es adecuado para caracterización genotípica y conservación. Además, se generaron 128 unidades de germoplasma de ADN correspondientes a 11 accesiones de Chile Yahuallica, con concentraciones y parámetros de calidad adecuados para incluirse en la Colección de Ácidos Nucleicos del CNRG y su aplicación en futuros estudios moleculares.

Los análisis de pureza evidenciaron la posible presencia de compuestos fenólicos residuales, típicos del tejido foliar de *Capsicum*, lo que sugiere la oportunidad de optimizar aún más los protocolos de extracción para este género. No obstante, la integridad y funcionalidad comprobadas por amplificación del gen *rbcL* confirman que el ADN obtenido cumple con los requerimientos para técnicas de caracterización genotípica.

Los resultados de este estudio pueden servir de base metodológica para la aplicación a otras especies del género *Capsicum*, fortaleciendo las estrategias de preservación y aprovechamiento de recursos fitogenéticos con denominación de origen.

Cuadro 2. Comparación de medias de la concentración de ADN con la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ).

Accesión	Media y error estándar de la concentración de ADN [ng/ $\mu$ L]	
14	218.9 $\pm$ 11.79	a
08	200.5 $\pm$ 17.49	a, b
15	171.2 $\pm$ 15.97	a, b
06	168.8 $\pm$ 16.68	a, b
04	160.2 $\pm$ 14.28	a, b
05	159.6 $\pm$ 24.74	a, b
03	147.8 $\pm$ 31.93	a, b
09	147.3 $\pm$ 14.78	b
11	143.0 $\pm$ 13.04	b
13	137.7 $\pm$ 17.49	b
07	119.0 $\pm$ 19.56	b

\*Los valores presentados son media  $\pm$  error estándar.

† Las letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ )

## Referencias

- Abdel-Latif, A., & Osman, G. (2017). Comparison of three genomic DNA extraction methods to obtain high DNA quality from maize. *Plant Methods*, 13(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13007-016-0152-4>
- Aranguren-Díaz, Y. C., Varani, A. M., Michael, T. P., & Miranda, V. F. O. (2018). Development of microsatellite markers for the carnivorous plant *Genlisea aurea* (Lentibulariaceae) using genomics data of NGS. *Molecular Biology Reports*, 45(1), 57-61. <https://doi.org/10.1007/s11033-017-4140-1>
- Arteaga, M. C., Bello-Bedoy, R., León-de La Luz, J. L., Delgadillo, J., & Dominguez, R. (2015). Phenotypic variation of flowering and vegetative morphological traits along the distribution for the endemic species *Yucca capensis* (Agavaceae). *Botanical Sciences*, 93(4), 765-770. <https://doi.org/10.17129/botsci.214>

- García-Moreira, D. P., Pacheco, N., Hernández-Guzmán, H., Bahammou, Y., Tagnamas, Z., Moreno, I., & López-Vidaña, E. C. (2024). Evaluation of various drying methods for mexican Yhualica chili: drying characteristics and quality assessment. *Processes*, *12*(9), 1969. <https://doi.org/10.3390/pr12091969>
- Guzmán, L. F., Cortés Cruz, M. A., Pichardo González, J. M., Arteaga Garibay, R. I., Guzmán Rodríguez, L. F., Cortés Cruz, M. A., Pichardo González, J. M., & Arteaga Garibay, R. I. (2018). Comparación de protocolos de aislamiento de DNA a partir de semilla de soya. *Revista Mexicana de ciencias Agrícolas*, *9*(8), 1691-1701. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.872>
- Kim, W.-R., Kim, E. O., Kang, K., Oidovsambu, S., Jung, S. H., Kim, B. S., Nho, C. W., & Um, B.-H. (2014). Antioxidant activity of phenolics in leaves of three red pepper (*Capsicum annuum*) Cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *62*(4), 850-859. <https://doi.org/10.1021/jf403006c>
- Lopes, M., Koichi, T., Bostwick, Dwight E., Helentjaris, Tim, & Larkins, Brian A. (1995). Identification of two opaque2 modifier loci in Quality Protein Maize. *Molecular and General Genetics MGG*, *247*(5), 603-613.
- Lopez, L. M. S., Gonzales, H. L., Garcia, W. E. V., De Jesus Velez Chicoma, R. L., & Greta, M. C. (2025). Rapid and efficient DNA extraction protocol from peruvian native cotton (*Gossypium barbadense* L.) Lambayeque, Peru. *Methods and Protocols*, *8*(3), 50. <https://doi.org/10.3390/mps8030050>
- Lucena-Aguilar, G., Sánchez-López, A. M., Barberán-Aceituno, C., Carrillo-Ávila, J. A., López-Guerrero, J. A., & Aguilar-Quesada, R. (2016). DNA source selection for downstream applications based on DNA quality indicators analysis. *Biopreservation and Biobanking*, *14*(4), 264-270. <https://doi.org/10.1089/bio.2015.0064>
- Nath, O., Fletcher, S. J., Hayward, A., Shaw, L. M., Agarwal, R., Furtado, A., Henry, R. J., & Mitter, N. (2022). A comprehensive high-quality DNA and RNA extraction protocol for a range of cultivars and tissue types of the woody crop avocado. *Plants*, *11*(3), 242. <https://doi.org/10.3390/plants11030242>
- Posit team. (2025). Studio: Integrated Development Environment for R [Software]. Posit Software, PBC. <http://www.posit.co/>
- Saghai-Maroo, M. A., Soliman, K. M., Jorgensen, R. A., & Allard, R. W. (1984). Ribosomal DNA spacer-length polymorphisms in barley: Mendelian inheritance, chromosomal location, and population dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *81*(24), 8014-8018. <https://doi.org/10.1073/pnas.81.24.8014>
- Xu, L., & Wang, X. (2025). A comprehensive review of phenolic compounds in horticultural plants. *International Journal of Molecular Sciences*, *26*(12), 5767. <https://doi.org/10.3390/ijms26125767>

## PARIENTES SILVESTRES, LA AGROBIODIVERSIDAD DE AGUASCALIENTES, MÉXICO

[WILD RELATIVES, THE AGROBIODIVERSITY OF AGUASCALIENTES, MEXICO]

Francisco Fabián Calvillo Aguilar<sup>1</sup>, Marco Aurelio Aragón Magadán<sup>2</sup>, Gabriela Sandoval Cancino<sup>2</sup> y Carlos I. Cruz Cárdenas<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitario de los Lagos-Universidad de Guadalajara. Av. Enrique Díaz de León No. 1144, Colonia Paseos de la Montaña, C.P. 47460, Lagos de Moreno, Jalisco, México. <sup>2</sup>Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP. Boulevard de la diversidad 400, Colonia Rancho de Las Cruces. Km 8 carretera Tepatitlán-Lagos de Moreno, C. P. 47600, Tepatitlán de Morelos, Jal., México.

\*Autor de correspondencia: cruz.ivan@inifap.gob.mx

ORCID: 0000-0002-1952-0191

### Resumen

Los parientes silvestres de cultivos, además de su valor inherente como biodiversidad, son una fuente importante en el desarrollo de los sistemas agropecuarios y la soberanía alimentaria, el primer paso para establecer estrategias para su conservación y aprovechamiento es la identificación de las especies que conforman el grupo, dónde se distribuyen en el espacio y cuál es el estado de su conservación. Con la finalidad de determinar el grupo de especies, su distribución y la riqueza que conforman los parientes silvestres de cultivos en el Estado de Aguascalientes, México; se ha desarrollado una revisión de los catálogos de especies determinadas como parientes silvestres, homologando el listado y generando los modelos de distribución espacial de las especies que no contaban con mapas de distribución. Se encontraron 72 especies de 18 géneros reportados, sin embargo, el análisis espacial determinó que solo 15 géneros de 58 especies se encuentran distribuidas en el estado de Aguascalientes, cuya riqueza mostró un patrón evidente con un mayor número de especies en la región Noroeste, probablemente debido al área natural protegida Sierra Fría que comparte la misma ubicación.

**Palabras clave:** parientes silvestres, agrobiodiversidad, Aguascalientes.

### Abstract

Wild relatives of crops, beyond their inherent biodiversity value, represent an important resource for the development of agricultural systems and the promotion of food sovereignty. The first step in designing strategies for its conservation and use is to identify the species that comprise this group, determine their spatial distribution, and assess their conservation status. To identify the group of species, their distribution, and the richness of crop wild relatives in the State of Aguascalientes, Mexico, a review of species catalogs was conducted. The list was standardized, and spatial distribution models were generated for species lacking distribution maps. A total of 72 species from 18 reported genera were identified; however, spatial analysis revealed that only 58 species belonging to 15 genera are distributed within the state of Aguascalientes. Species richness showed a clear pattern, with a greater number of species occurring in the northwestern region, likely due to the presence of the Sierra Fría protected natural area located in that area.

**Keywords:** crop wild relatives, agrobiodiversity, Aguascalientes.

### Introducción

Los parientes silvestres de cultivos son las especies que comparten ancestros comunes con los cultivos agrícolas tradicionales, albergan una gran variedad de genes y rasgos adaptativos, que pueden ser relevantes para mejorar los sistemas productivos (Maxted *et al.*, 2013), son recursos invaluables para la agricultura, principalmente en países en desarrollo como México que además posee un gran capital natural (CONABIO, 2008). Sin embargo, esta diversidad se encuentra amenazada por la pérdida de hábitat, la degradación del suelo, el abandono del campo y las prácticas de

producción intensiva, por lo que realizar acciones para su conservación es primordial para la soberanía alimentaria (Mota, 2019). La Planificación Sistemática de la Conservación establece que los modelos de distribución espacial son una herramienta importante para determinar qué hay y dónde está (TNC, 2020), y en el marco de los recursos fitogenéticos como los parientes silvestres, los modelos de distribución espacial permiten identificar estrategias de conservación *in situ*, así como los sitios para la recolecta de germoplasma para su conservación *ex situ* (Parra *et al.*, 2012). Convencionalmente cuando se habla de biodiversidad, incluida la agrobiodiversidad, lo primero que se piensa es en los bosques tropicales y la agricultura tradicional como el RTQ, que en México se localizan principalmente en la región sur y sureste del país. No obstante, existe una gran agrobiodiversidad en los ecosistemas áridos y semiáridos, así como en los sistemas productivos tradicionales adaptados a estos ambientes. En este sentido, el estado de Aguascalientes, México; que se localiza al centro del país, en la ecorregión del desierto chihuahuense, cuenta con una representación de dos regiones florísticas, Sierra Madre Oriental y Altiplanicie (Rzendowski y Reyna, 1999) y cuya superficie con uso o vocación agropecuario asciende al 56% de su territorio (INEGI, 2023), puede ser un buen ejemplo de la revalorización de la agrobiodiversidad nacional. En el presente estudio se desarrolla el conjunto de parientes silvestres de cultivos presentes en el estado de Aguascalientes, su distribución espacial y riqueza, con la finalidad de resaltar la agrobiodiversidad del estado y ofrecer una herramienta útil para establecer estrategias de aprovechamiento y conservación.

## Materiales y métodos

### Parientes silvestres

Las especies consideradas como parientes silvestres de cultivos presentes en el estado de Aguascalientes, México; se obtuvieron de la unión de la base de datos alojada en GBIF-CWR (Crop Wild Relatives data consortia, 2024) y el catálogo de Parientes Silvestres de Cultivos del Portal de Geoinformación de la CONABIO (2025). Los datos del GBIF-CWR se filtraron espacialmente con las herramientas de búsqueda avanzada del portal, generando un recuadro con coordenadas máximas que abarcan el límite político del estado. Las capas de CONABIO se seleccionaron explorando visualmente los metadatos. Posteriormente, ambos conjuntos de datos fueron filtrados espacialmente con software de información geográfica (SIG). La selección no consideró el centro de origen o diversificación, solo ocurrencias y distribución potencial.

### Taxonomía

Cada uno de los nombres científicos de las especies reportadas en ambos conjuntos de datos, GBIF-CWR y CONABIO, fue revisado para su validación taxonómica en WFO (2025), con la finalidad de corroborar su escritura, estado de aceptación, sinonimias y registro de la autoridad taxonómica correspondiente (previamente no reportada). Se identificó solo una especie, *Persea podadenia* S.F. Blake con estado de sinonimia, la cual fue actualizada a *Persea liebmanni* Mez. que es el nombre reportado como aceptado a la fecha de revisión.

### Distribución espacial

Se utilizaron los modelos de distribución espacial (MDE), ráster o vectorial, de las especies incluidas en la base de datos de CONABIO (2025), realizando el geoprocesamiento respectivo para su sobreposición con software SIG. Los MDE de las especies del GBIF-CWR (2024) no incluidas en CONABIO (2025) fueron generados con el paquete Wallace 2.2 (Kass *et al.*, 2023) en el software RStudio v. 2025.09.1 utilizando el algoritmo MaxEnt y las 19 capas del WorldClim (Fick y Hijmans, 2017), la extensión del área de movilidad (M) fue determinada para cada especie incluyendo la extensión de Aguascalientes. Obtenidos los MDE de cada especie, se seleccionó el mejor modelo considerando los parámetros de rendimiento: mayor predictibilidad (Area Under the Curve - AUC), menor tasa de omisión (Omission Rate - OR) y menor valor de AICc (Criterio de información de Akaike corregido).

### Mapas de biodiversidad

Los mapas de idoneidad se obtuvieron reclasificando (binarización) los MDE, considerando como umbral 0.7 de la probabilidad de ocurrencia ( $Q < 0.7 < 1$ ). La riqueza de especies se determinó como la suma de todas las capas de idoneidad, agrupadas por género y el total de las especies. Algunas especies no fueron incluidas en los mapas de riqueza dado que no contaron con registros para obtener su MDE, obtuvieron bajos rendimientos de modelado ( $< 0.7$ )

y/o no presentaron área idónea en la extensión de Aguascalientes. Las especies no incluidas en los mapas de riqueza fueron representadas en un mapa base que muestra la ubicación de sus registros.

### Geoprocesamiento

El procesamiento de las diferentes capas, ráster y vectorial, reclasificación y diseño cartográfico se realizó en el software de información geográfica QGIS v.3.40.8. Los MDS en formato ráster fueron remuestreados a una resolución de 30 segundos y alineados utilizando como referencia la capa de Elevación 30s del WorldClim (Fick y Hijmans, 2017). Los MDS en formato vectorial fueron rasterizados a la misma resolución y extensión. La sumatoria de las capas para determinar riqueza total y por género fueron procesadas con el paquete Terra v.1.8 en el software RStudio v. 2025.09.1

### Resultados y discusión

El análisis de los conjuntos de datos registró un total de 72 especies de parientes silvestres de cultivos con presencia en el estado de Aguascalientes, México (Cuadro 1); representando 18 géneros, siendo los más diversos en especies: *Physalis* (26 sp.), *Solanum* (18 sp.), *Phaseolus* (4 sp.), *Cucurbita* (3 sp.) y *Setaria* (3 sp.). Sin embargo, el geoprocesamiento mostro que el hábitat idóneo de las especies *Phaseolus coccineus* L., *Phaseolus maculatus* Scheele y *Psidium guajava* L. no contenía el total o parte del estado de Aguascalientes, probablemente debido a que el umbral del MDE publicado en la fuente de datos fue menor del utilizado en el presente estudio (0.7). Estas especies no fueron incluidas en la cartografía y cálculo de riqueza.

Cuadro 1. Parientes silvestres de cultivos con presencia reportada en el Estado de Aguascalientes, México; su fuente de datos y rendimiento del modelo de distribución espacial.

Especie	Fuente		MDE*		
	CONABIO (2025)	GBIF-CWR (2024)	AUC	OR	AICc
<i>Allium longifolium</i> (Kunth) Spreng.		X	0.7	0.14	6.02
<i>Citrullus lanatus</i> (Thunb.)	X	X			
<i>Echinochloa oplismenoides</i> (E.Fourn.) Hitchc.		X	0.85	0.11	0
<i>Ficus petiolaris</i> Kunth	X	X			
<i>Cucurbita foetidissima</i> Kunth	X				
<i>Cucurbita pedatifolia</i> L.H.Bailey	X				
<i>Cucurbita radicans</i> Naudin	X				
<i>Gossypium hirsutum</i> L.		X	0.912	0.12	0
<i>Gossypium aridum</i> (Rose & Standl.) Skovsted	X				
<i>Ipomoea hartwegii</i> Benth.		X	0.82	0.12	0
<i>Lepidium virginicum</i> L.		X			
<i>Manihot caudata</i> Greenm.	X	X			
<i>Manihot rhomboidea</i> Müll.Arg.		X	0.73	0.22	0
<i>Panicum lepidulum</i> Hitchc. & Chase		X	0.72	0.13	0
<i>Panicum vaseyanum</i> Scribn. ex Beal		X	0.75	0.13	2.16
<i>Phaseolus coccineus</i> L.	X	X			
<i>Phaseolus maculatus</i> Scheele	X	X			
<i>Phaseolus venosus</i> Piper		X			
<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	X	X			
<i>Persea americana</i> Mill.	X				
<i>Persea liebmannii</i> Mez (Sin. <i>Persea podadenia</i> )	X				
<i>Physalis acutifolia</i> (Miers) Sandwith	X				
<i>Physalis angulata</i> L.	X				

Especie	Fuente		MDE*		
	CONABIO (2025)	GBIF-CWR (2024)	AUC	OR	AICc
<i>Physalis angustiphysa</i> Waterf.	X				
<i>Solanum bulbocastanum</i> Dunal	X				
<i>Physalis campechiana</i> L.	X				
<i>Physalis crassifolia</i> Benth.	X				
<i>Physalis caudella</i> Standl.	X				
<i>Physalis chenopodifolia</i> Lam.	X				
<i>Physalis cinerascens</i> (Dunal) Hitchc.	X				
<i>Physalis cordata</i> Mill.	X				
<i>Physalis coztomatl</i> Dunal	X				
<i>Physalis glutinosa</i> Schltld.	X				
<i>Physalis gracilis</i> Miers	X				
<i>Physalis hederifolia</i> A.Gray	X				
<i>Physalis lagascae</i> Roem. & Schult.	X				
<i>Physalis leptophylla</i> B.L.Rob. & Greenm.	X				
<i>Physalis nicandroides</i> Schltld.	X				
<i>Physalis orizabae</i> Dunal	X				
<i>Physalis patula</i> Mill.	X				
<i>Physalis philadelphica</i> Lam.	X				
<i>Physalis pruinosa</i> L.	X				
<i>Physalis solanacea</i> (Schltld.) Axelius	X				
<i>Physalis sordida</i> Fernald	X				
<i>Physalis sulphurea</i> (Fernald) Waterf.	X				
<i>Physalis virginiana</i> Mill.	X				
<i>Physalis volubilis</i> Waterf.	X				
<i>Physalis waterfallii</i> O.Vargas, M.Martínez & Dávila	X				
<i>Psidium guajava</i> L.	X	X			
<i>Setaria grisebachii</i> E.Fourn.		X	0.72	0.14	7.7
<i>Setaria leucopila</i> (Scribn. & Merr.) K.Schum.		X			
<i>Setaria parviflora</i> (Poir.) Kerguélen		X			
<i>Solanum americanum</i> Mill.		X			
<i>Solanum angustifolium</i> Mill.		X	8.17	0.13	0
<i>Solanum cardiophyllum</i> Lindl.	X	X			
<i>Solanum demissum</i> Lindl.	X	X			
<i>Solanum ehrenbergii</i> (Bitter) Rydb.	X	X			
<i>Solanum elaeagnifolium</i> Cav.		X			
<i>Solanum iopetalum</i> (Bitter) Hawkes		X	0.94	0.12	0
<i>Solanum hjertingii</i> Hawkes	X				
<i>Solanum morelliforme</i> Bitter & Münch	X				
<i>Solanum oxycarpum</i> Schiede	X				
<i>Solanum pinnatisectum</i> Dunal	X				
<i>Solanum polyadenium</i> Greenm.	X				
<i>Solanum schenckii</i> Bitter	X				
<i>Solanum stenophyllidium</i> Bitter	X	X			

Especie	Fuente		MDE*		
	CONABIO (2025)	GBIF-CWR (2024)	AUC	OR	AICc
<i>Solanum stoloniferum</i> Schlttdl.	X	X			
<i>Solanum umbellatum</i> Mill.		X	0.85	0.11	0
<i>Solanum verrucosum</i> Schlttdl.	X				
<i>Sorghum halepense</i> (L.) Pers.		X			
<i>Tripsacum lanceolatum</i> E.Fourn.	X				
<i>Tripsacum pilosum</i> Scribn. & Merr.	X				

\*MDE (modelo de distribución espacial), parámetros de evaluación de los modelos: área bajo la curva (AUC), tasa de omisión (OR) y Criterio de información de Akaike (AICc).

Se generó el MDE de once especies, de las cuales cuatro no presentaron hábitat idóneo en el Estado de Aguascalientes, estas fueron: *Gossypium hirsutum* L., *Solanum angustifolium* Mill., *Solanum iopetalum* (Bitter) Hawkes y *Solanum umbellatum* Mill. Además, por el limitado número de registros, cuatro especies no fueron modeladas, *Lepidium virginicum* L., *Phaseolus venosus* Piper, *Setaria leucopila* (Scribn. & Merr.) K.Schum y *Sorghum halepense* (L.). La ubicación de las especies con presencia reportada en el estado de Aguascalientes, que por su área de idoneidad o limitado número de ocurrencias no fueron representadas en formato ráster se muestran en la Figura 1.

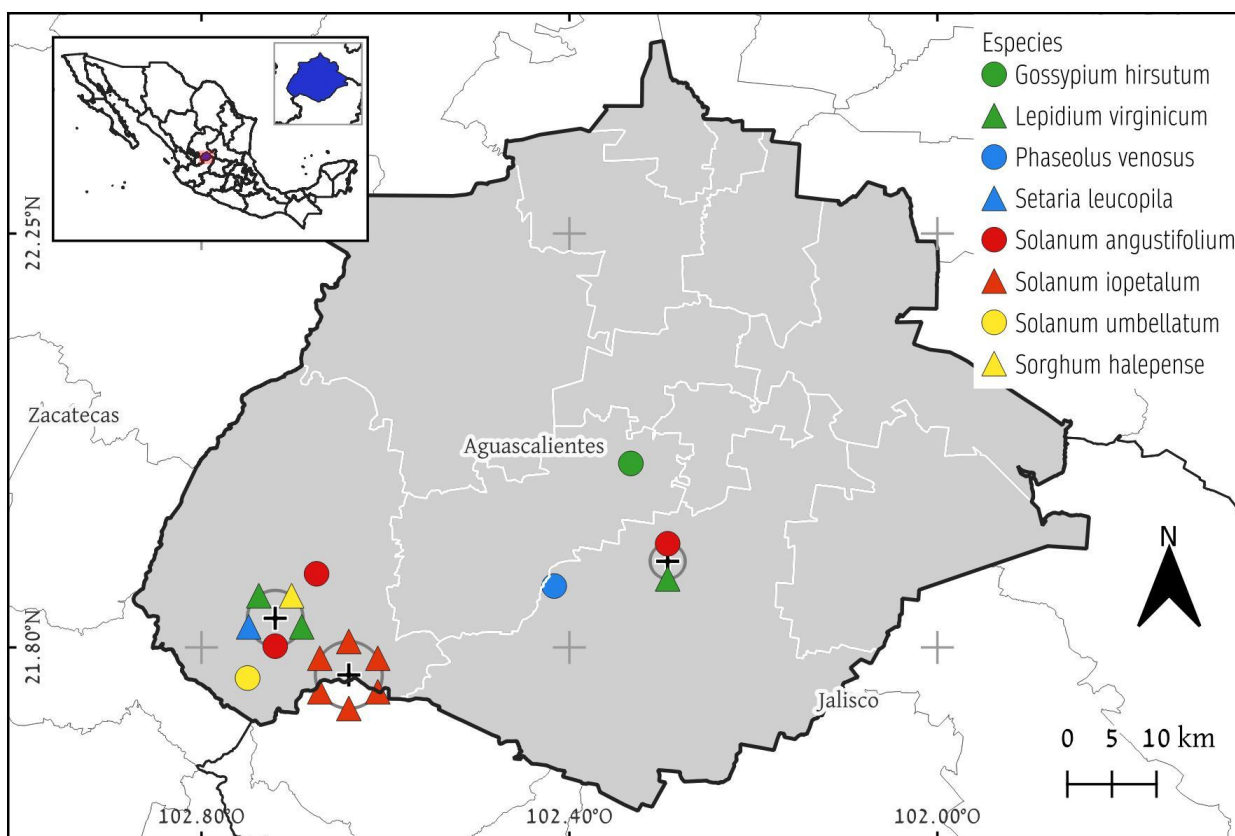


Figura 1. Localización de los parientes silvestres de cultivos en Aguascalientes, México, con mapa de distribución espacial no modelada.

Del listado de 72 especies y 18 géneros (Cuadro 1), solo 58 especies contaron con MDE y mapa idoneidad, representando 15 géneros (Figura 2), siendo *Physalis* spp. (21 sp.) y *Solanum* spp. (10 sp.) los géneros de mayor riqueza y amplia distribución. Por el contrario, *Echinochloa oplismenoides* (E.Fourn.) Hitchc. e *Ipomoea hartwegii*

Benth, son las especies con una disponibilidad de hábitat más limitada, ambas endémicas de México. Además, es de observar que el género *Solanum* spp. muestra un parche sin presencia al centro del estado (color gris), explicable en estudios futuros a través de la caracterización ecogeográfica y la identificación del factor limitante.

La riqueza biológica de parientes silvestres se conformó de la sumatoria de las 58 especies con MDE (Figura 3), observándose un patrón contrastante entre una mayor agrobiodiversidad en el noroeste y una menor diversidad en el noreste. Este patrón es consistente con la geodiversidad comprendida en la orografía del estado, precisamente la región este es la zona serrana del estado, y cuenta con el Área Natural Protegida Sierra Fría (Sosa *et al.*, 2014).

Exceptuando la Ciudad de México, Aguascalientes es la tercera entidad con la menor extensión territorial (5615 km<sup>2</sup>), representado aproximadamente el 0.3% del territorio continental mexicano (INEGI, 2020). Sin embargo, considerando las especies reportadas en GBIF-CWR (2024), Aguascalientes representa en su territorio el 8% de la agrobiodiversidad de parientes silvestres de México. Además, aproximadamente el 59.3% de la superficie del estado tiene un uso o vocación del suelo apropiada para los parientes silvestres, agropecuaria y forestal (INEGI, 2023). Estos datos reflejan la importancia de la contribución potencial de Aguascalientes en el conocimiento, conservación y aprovechamiento de los parientes silvestres de cultivos.

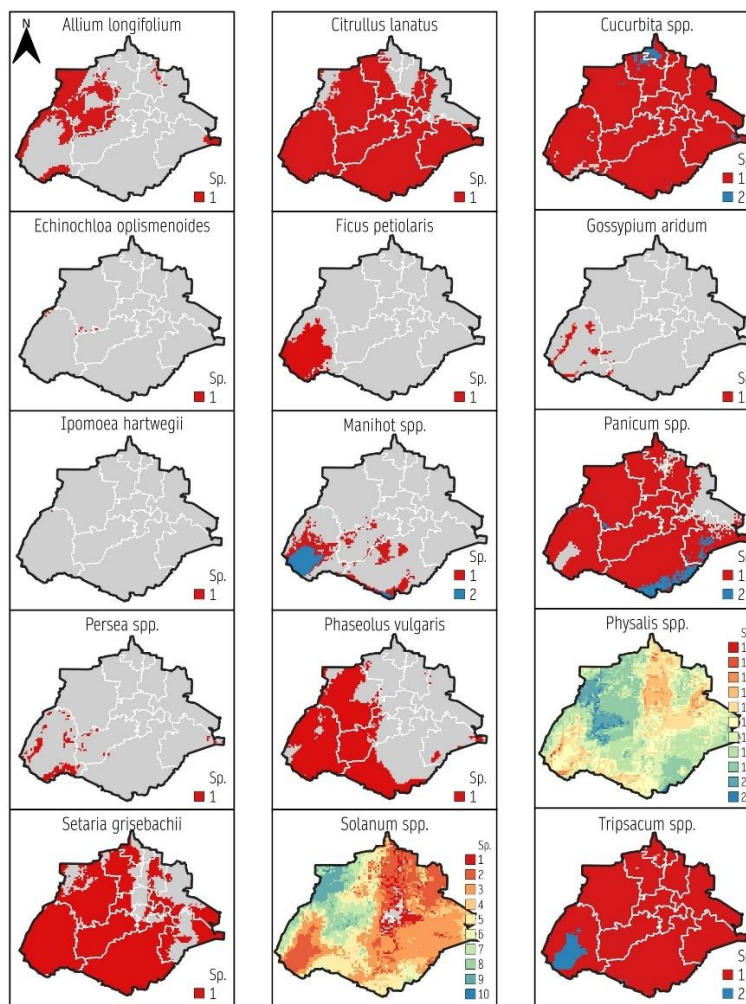


Figura 2. Distribución espacial de los parientes silvestres de cultivos en el estado de Aguascalientes, México; por especie o género.

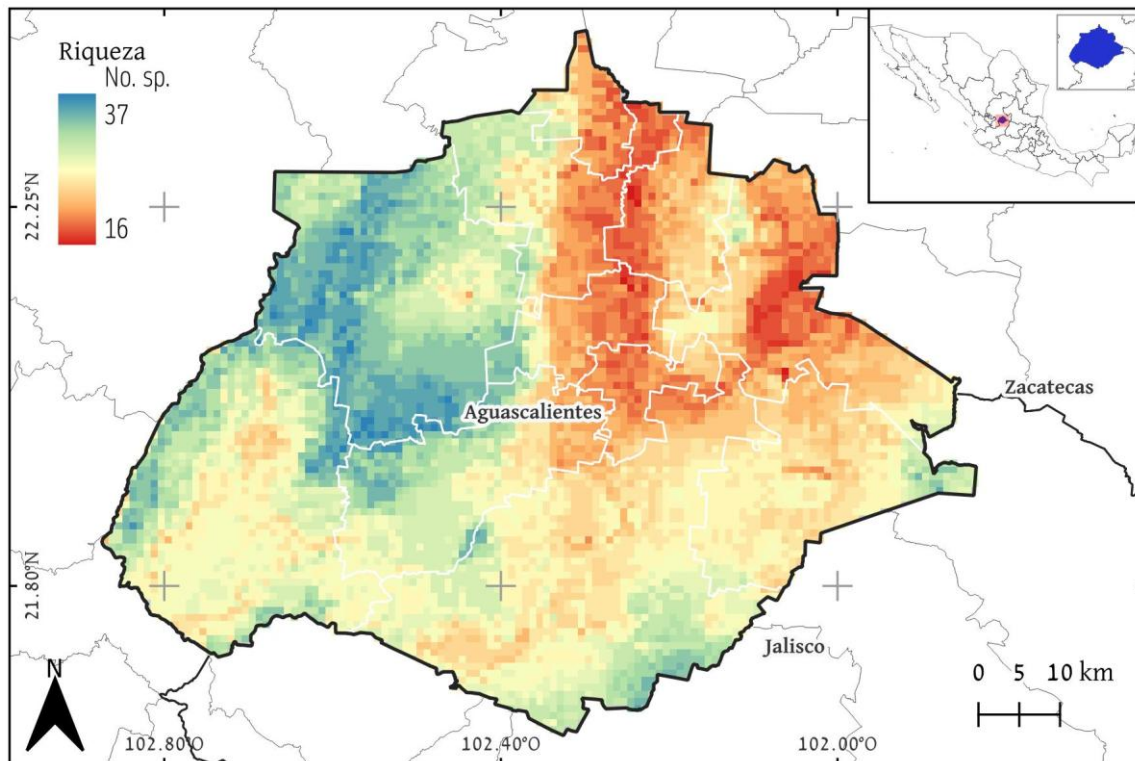


Figura 3. Distribución de la riqueza de parientes silvestres de cultivos en el estado de Aguascalientes, México.

## Referencias

- CONABIO (2008). Capital natural de México, vol. I: conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/capitalnatmex.html>
- Crop Wild Relatives Occurrence data consortia. (2024). A global database for the distributions of crop wild relatives. Version 1.13. Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT. GBIF. Occurrence dataset: <https://doi.org/10.15468/jyrthk>
- Fick, S. y Hijmans, R. (2017). WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37(12):4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- INEGI (2020). Extensión territorial de México. Cuéntame de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [https://cuentame.inegi.org.mx/descubre/geografia/extension\\_territorial/](https://cuentame.inegi.org.mx/descubre/geografia/extension_territorial/)
- INEGI (2023). Resultados definitivos del Censo Agropecuario 2022 en el estado de Aguascalientes. Comunicado de prensa número 668/23, 21 de noviembre de 2023. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA\\_Def/CA\\_Def2022\\_Ags.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_Def/CA_Def2022_Ags.pdf)
- Kass, J., Pinilla, G., Paz, A., Johnson, B., Grisales, V., Meenan, S., Attali, D., Broennimann, O., Galante, P., Maitner, B., Owens, H., Varela, S., Aiello, M., Merow, C., Blair, M., Anderson, R. (2023). wallace 2: a shiny app for modeling species niches and distributions redesigned to facilitate expansion via module contributions. *Ecography*, Volume 2023(3), e06547. <https://doi.org/10.1111/ecog.06547>
- Maxted, N., Magos, B. y Kell, S. (2013). Resource book for preparation of national conservation plans for crop wild relatives and landraces. University of Birmingham. United Kingdom. [http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/PGR/PubPGR/ResourceBook/TEXT\\_ALL\\_251\\_1.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/PGR/PubPGR/ResourceBook/TEXT_ALL_251_1.pdf)
- Mota Ivette. 2019. Salvar la diversidad genética de los parientes silvestres de cultivos de Mesoamérica. Prensa. Dirección General de Comunicación de la Ciencia. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la

- Biodiversidad. México. <https://www.gob.mx/conabio/prensa/salvaguardar-la-diversidad-genetica-de-los-parientes-silvestres-de-cultivos-de-mesoamerica?idiom=es>
- Parra, M., Iriondo, J. y Torres, E. (2012). Review. Applications of ecogeography and geographic information systems in conservation and utilization of plant genetic resources. Spanish Journal of Agricultural Research, 10(2), 419. <https://doi.org/10.5424/sjar/2012102-303-11>
- Portal de Geoinformación. (2025). Biodiversidad. Distribución potencial y registros de presencia. Portal de Geoinformación 2025. Sistema Nacional de Información Sobre Biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- QGIS (2025). QGIS Geographic Information System (Version3.40.8). QGIS Development Team. <https://qgis.org/>
- Rzendowski, J. y Reyna, T. (1990). Divisiones florísticas. 1:8000000. En. Tópicos fitogeográficos. Atlas Nacional de México Vol. II. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- RStudio (2025). RStudio (Versión 2025.09.01). RStudio Team. <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>
- Sosa, J., Breceda, A., Jiménez, C., Íñiguez L., & Ortega, A. (2014). Manejo del Área Natural Protegida Sierra Fría, Aguascalientes: situación actual y desafíos. Investigación y Ciencia, 22(60),71-77. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67431160009>
- TNC (2020). Ruta metodológica para la planificación sistemática de la conservación. The Nature Conservancy. Bogotá, Colombia. ISBN: 978-958-53050-7-6.
- WFO (2025). World Flora Online. <http://www.worldfloraonline.org/>

**ANOTACIÓN DE VARIACIONES GENÉTICAS Y PREDICCIÓN DE EFECTOS FUNCIONALES EN ACCESIONES DE FRIJOL**

[ANNOTATION OF GENETIC VARIATIONS AND PREDICTION OF FUNCTIONAL EFFECTS IN BEAN ACCESSIONS]

Samadhi Lucía Cárdenas Limón<sup>1</sup>, Luis Felipe Guzmán Rodríguez<sup>2\*</sup>, Marco Aurelio Aragón Magadán<sup>2</sup>, Carlos Iván Cruz Cárdenas<sup>2</sup> y Blanca Amalia Amaro González<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara. Enrique Díaz de León 1144, CP. 47463, Lagos de Moreno, Jalisco, Méx. <sup>2</sup>Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP. Boulevard de la diversidad 400, Colonia Rancho de Las Cruces. Km 8 carretera Tepatitlán-Lagos de Moreno, C. P. 47600, Tepatitlán de Morelos, Jal., México.

\*Autor de correspondencia: guzman.luis@inifap.gob.mx  
1663-3457

ORCID:0000-0002-

**Resumen**

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) constituye un cultivo de alta relevancia económica y cultural en México; sin embargo, su producción ha disminuido en los últimos años debido a factores ambientales y de manejo agrícola. La caracterización de la variabilidad genética en las accesiones conservadas del Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG-INIFAP) permite comprender los mecanismos evolutivos y adaptativos que podrían contribuir a su conservación y mejoramiento. En este estudio se analizaron 50 accesiones de frijol mediante secuenciación RAD-seq, seguida de llamado y anotación de variantes con las herramientas GATK y SnpEff, respectivamente. Se identificaron 12,350 sitios variantes, de los cuales 6,660 SNP bialélicos fueron retenidos tras el filtrado de calidad. La mayoría de las variantes se localizaron en regiones no codificantes (82.1 %), principalmente aguas abajo y aguas arriba de los genes, en concordancia con estudios de genoma completo en frijol y otros modelos vegetales. Este patrón refleja tanto la alta proporción de regiones intergénicas en el genoma como la posible influencia de elementos reguladores en la variabilidad observada. En las regiones codificantes (11.8 %), el 55.6 % de las mutaciones fueron sinónimas y el 44.4 % no sinónimas, con una razón dN/dS de 0.79, indicativa de selección purificadora. Estos resultados sugieren que las accesiones analizadas mantienen la conservación de genes esenciales, aunque el efecto de la selección artificial durante los programas de mejoramiento podría haber reducido la diversidad adaptativa.

Palabras clave: Frijol, anotación, variantes, regiones codificantes, RAD-seq.

**Abstract**

Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) are a crop of great economic and cultural importance in Mexico; however, their production has declined in recent years due to environmental and agricultural management factors. The characterization of genetic variability in the accessions conserved at the National Center for Genetic Resources (CNRG-INIFAP) provides insight into the evolutionary and adaptive mechanisms that could contribute to their conservation and improvement. In this study, 50 bean accessions were analyzed using RAD-seq sequencing, followed by variant calling and annotation with the GATK and SnpEff tools, respectively. A total of 12,350 variant sites were identified, of which 6,660 biallelic SNPs were retained after quality filtering. Most variants were located in non-coding regions (82.1 %), mainly downstream and upstream of genes, in agreement with whole-genome studies in beans and other plant models. This pattern reflects both the high proportion of intergenic regions in the genome and the possible influence of regulatory elements on the observed variability. In coding regions (11.8 %), 55.6 % of mutations were synonymous and 44.4 % were non-synonymous, with a dN/dS ratio of 0.79, indicative of purifying selection. These results suggest

that the accessions analyzed maintain the conservation of essential genes, although the effect of artificial selection during breeding programs may have reduced adaptive diversity.

Keywords: Beans, annotation, coding regions, RAD-seq.

## Introducción

El frijol es una de las principales exportaciones del país y es la base de muchas industrias que van desde la elaboración de alimentos para animales hasta aceites vegetales. Aunque es una parte esencial de la economía mexicana y contribuye significativamente al PIB del país, en los últimos años ha habido una disminución en la producción (Aguilar-Lopez *et al.*, 2024; Guzmán-Soria *et al.*, 2019; Prieto-Cornejo *et al.*, 2019). Esto se debe a varios factores como la falta de tierras adecuadas, la pérdida de cultivos debido a la sequía y el cambio climático. Estos factores negativos pueden ser contrarrestados gracias a una de las características más importantes de las plantas, que es la capacidad de adaptarse al entorno y esto es ocasionado en gran medida por cambios en su genoma (Munns y Millar 2023). Los polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) son el tipo más común de variación genética y pueden tener una amplia gama de efectos fisiológicos y morfológicos, estos pueden ser causados por una variedad de mecanismos, incluidos errores durante la replicación, cambios en la secuencia del ADN o la selección natural (Mammadov *et al.*, 2012). Los SNP que se encuentran en las regiones codificantes pueden alterar potencialmente la secuencia de aminoácidos de una proteína y cambiar la función, mientras que los que ocurren en regiones reguladoras pueden afectar la expresión de un gen y ocasionar cambios en el fenotipo de la planta (Korsa, 2022). Comprender los efectos de los SNP es importante para comprender la historia evolutiva de las plantas, así como los mecanismos por los cuales se adaptan a su entorno. Debido a esto y a la importancia tanto cultural como económica del frijol el Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG)-INIFAP ha realizado trabajos de conservación a largo plazo y estimación de la diversidad genética. En el presente trabajo se muestran algunos de esos resultados, enfocados principalmente a los cambios que pueden ser ocasionados por polimorfismos de un solo nucleótido en el genoma de frijol.

## Materiales y métodos

### Material vegetal

En el Laboratorio de la Colección de Ácidos Nucleicos del Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG-INIFAP) se extrajo ADN nuclear a partir de semillas de 50 accesiones de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) pertenecientes al proyecto "Regeneración, caracterización y conservación a largo plazo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en el INIFAP". La extracción se realizó mediante el método CTAB.

### Extracción de ADN

El ADN obtenido fue enviado al laboratorio Floragenex para su secuenciación mediante la tecnología RAD-seq. Las librerías crudas generadas fueron posteriormente analizadas en el CNRG-INIFAP.

### Pre procesamiento de los datos

Se procesaron 50 librerías en formato FASTQ provenientes de dos carriles de secuenciación. Los archivos crudos fueron demultiplexados utilizando STACKS v2.68 (Catchen *et al.*, 2013). Posteriormente, se eliminaron los adaptadores de secuenciación y las lecturas con calidad inferior a Q20 mediante fastp (Chen *et al.*, 2018). Las librerías depuradas se emplearon en los análisis subsecuentes.

### Llamado de variantes

El llamado de variantes de polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) se realizó siguiendo el flujo de trabajo descrito en el Manual de buenas prácticas para el descubrimiento de variantes en datos de secuenciación de alto rendimiento de GATK (McKenna *et al.*, 2010). El procedimiento incluyó:

- Alineamiento de las lecturas contra el genoma de referencia de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), con número de acceso GCF\_000499845.2).
- Marcado de duplicados.
- Llamado de variantes.

Este proceso fue automatizado mediante la aplicación BEANS, desarrollada internamente para este propósito (Aragón-Magadán, 2024). Posteriormente se realizó un filtrado de variantes con VCF tolos para retener los SNPs bialélicos y con un máximo de pérdida del 10 % por posición.

La anotación de variantes, así como la identificación de cambios sinónimos y no sinónimos, se efectuó con SnpEff v5.3 (Cingolani *et al.*, 2012), utilizando como referencia el genoma GCF\_000499845.2 de frijol.

## Resultados y discusión

### Determinación de variantes

El llamado de variantes realizado por GATK arrojó un total de 12,350 sitios variantes en las 50 accesiones de frijol. Después del filtrado, se retuvieron 6660 sitios variables bialélicos presentes en al menos el 90 % de las muestras (Figura 1).

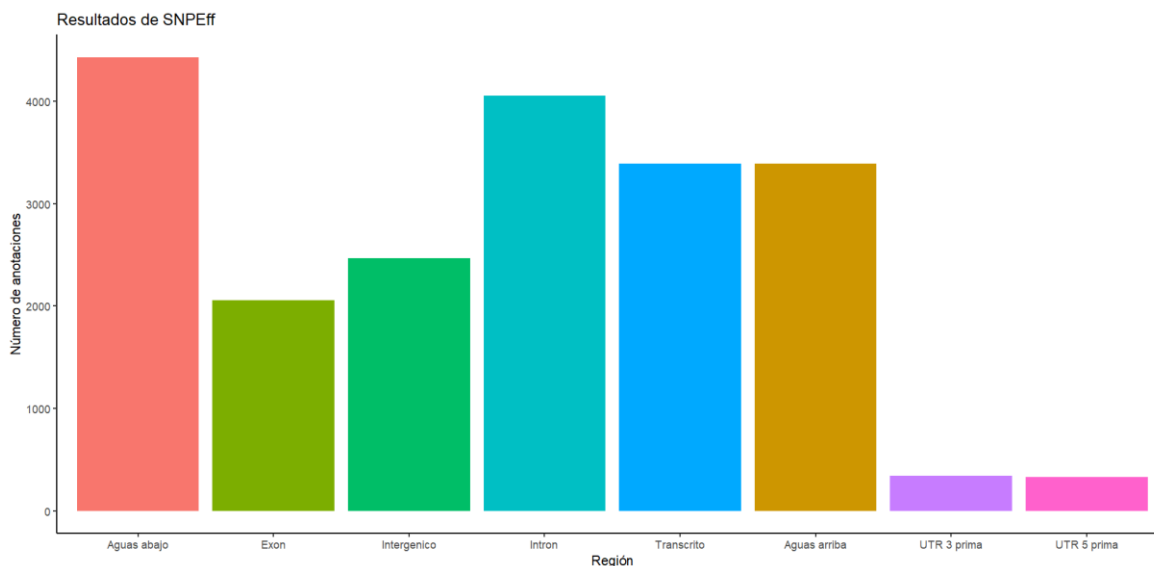


Figura 1. Resultados de la anotación con SNPEff de 50 accesiones de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.).

### Determinación de anotaciones

La anotación de los sitios variables realizada con SnpEff indicó que los 6,660 sitios polimórficos generaron un total de 17,474 anotaciones. El tamaño efectivo anotado fue de 521,609,243 pb, lo que representa el 97 % de la longitud total del genoma de referencia (537,700,155 pb). En promedio, se obtuvo una anotación cada 78,319 pb, lo cual refleja una

alta cobertura y representatividad de los datos de secuenciación de las 50 accesiones a lo largo de todos los cromosomas del genoma de frijol.

La mayoría de las anotaciones se concentraron en regiones no codificantes: 4,430 (25.352 %) en aguas debajo de los genes, 4,054 (23.2 %) en intrones, 3,394 (19.423 %) en aguas arriba y 2,467 (14.118 %) en regiones intergénicas. En total el 82.093 % de anotaciones se encuentran en estas regiones. En estudios de genoma completo de variedades elite de frijol (de Souza et al., 2023), los autores reportan que un 94.68 % de las variantes encontradas corresponden a regiones no codificantes. En otros modelos más estudiados como el genoma humano, donde gracias al GWAS, se ha encontrado que hasta un 90 % de las variantes encontradas corresponden a sitios no codificantes (Singh y Kumar 2023), lo que resulta muy similar con los resultados obtenidos.

### **Explicación de variantes en regiones no codificantes**

Los altos porcentajes de variantes localizadas en regiones no codificantes pueden explicarse por la amplia proporción que estas ocupan en los genomas. En maíz, por ejemplo, se ha estimado que hasta un 86 % del genoma corresponde a secuencias conservadas no codificantes (Song *et al.*, 2021), por lo que es esperable que la mayoría de los SNP se ubiquen en dichas zonas. Al comparar el porcentaje de variantes identificado en este estudio con los resultados obtenidos mediante secuenciación de genoma completo en variedades elites de frijol (de Souza *et al.*, 2023), se observa una proporción similar de SNPs en regiones no codificantes. Considerando que la técnica RAD-seq emplea enzimas de restricción para reducir la complejidad genómica y obtener datos a menor costo (Davey y Blaxter 2010; Herry *et al.*, 2023), la concordancia entre ambos métodos sugiere que el enfoque utilizado proporciona una representación confiable de la variabilidad genómica, a pesar de no cubrir la totalidad del genoma.

Aunque se sabe que la mayoría de los cambios aparecen en regiones no codificantes, aun no se sabe a ciencia cierta que funciones cumplen estos en la expresión génica. Los estudios enfocados sobre este tema resaltan que estas mutaciones juegan un papel muy importante en los ARN largos no codificantes (lncRNA) y su papel crucial en la síntesis y expresión de genes (He *et al.*, 2024; Minotti *et al.*, 2018; Singh y Kumar 2023).

### **Anotaciones en regiones codificantes**

Por otro lado, las anotaciones en regiones codificantes fueron de 2,057 (11.772 %). A nivel funcional el 55.556 % corresponde a mutaciones sinónimas. Tradicionalmente este tipo de mutaciones han sido consideradas como silenciosas, debido a que su presencia modifica el codón de mRNA utilizado para la síntesis de proteínas, pero no alteran el aminoácido codificado. No obstante, nueva evidencia sugiere que este tipo de cambios pueden tener consecuencias benéficas o perjudiciales de la misma forma en que las variantes no sinónimas las tienen sobre el gen (Lebeuf-Taylor *et al.*, 2019). Una serie de experimentos en bacterias en donde se utilizó modificación genética dirigida demostró que cambios sinónimos pueden generar adaptación y que, de hecho, este proceso puede ser muy común (Lebeuf-Taylor *et al.*, 2019). Este efecto puede estar relacionado con cómo las proteínas se pliegan in vivo, evidencia experimental ha demostrado que algunas proteínas son incapaces de plegarse in vitro pero lo hacen eficientemente dentro de la célula y que este efecto está relacionado directamente a los cambios no sinónimos en el mRNA (Walsh *et al.*, 2020). En el otro sentido, el 44.44 % de cambios corresponden a mutaciones no sinónimas, por definición, este tipo de mutaciones modifican aminoácidos codificados por el mRNA y por lo tanto cambian el sentido, función y estructura de la proteína sintetizada. Cuando este tipo de cambios son deletéreos y provocan mutaciones que comprometen la supervivencia del individuo, generalmente son eliminados del acervo genético (Bitocchi *et al.*, 2017), por lo que su conservación sugiere que son beneficiosas para la población. Sobre este punto trabajos como los de Bitocchi *et al.*, 2017 sugieren que el alto número de mutaciones no sinónimas presentes en plantas cultivadas comparadas con sus parientes silvestres, son producto de la domesticación, la cual ha creado nuevas mutaciones funcionales que han sido seleccionadas de forma dirigida por el ser humano. Según los resultados obtenidos por SNPEff, el ratio entre mutaciones sinónimas ( $d_s$ ) y no sinónimas ( $d_n$ ) es de 0.7918. Este valor sugiere que la población, en su conjunto, se

encuentra bajo presión de selección purificadora, es decir, la selección natural tiende a eliminar mutaciones deletéreas y a conservar aquellas variantes que mantienen funciones esenciales (Kryazhimskiy y Plotkin 2008). Sin embargo, dado que se trata de plantas cultivadas, este patrón podría estar influido por la selección artificial ejercida en los programas de mejoramiento genético. En dichos procesos, la selección recurrente de individuos con características agronómicas deseables puede haber reducido la frecuencia de alelos neutrales o ligeramente deletéreos, contribuyendo así a una disminución de la variabilidad genética y adaptativa dentro de la población.

Aunque este trabajo fue *in silico*, los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre la estructura genética y la variabilidad de las poblaciones de frijol analizadas. El enfoque computacional permitió identificar patrones de polimorfismo y posibles señales de selección que serían difíciles de detectar mediante metodologías tradicionales.

## Referencias

- Aragón-Magadán, M. A., Cruz-Cárdenas C. I., Calvillo-Aguilar F. F., Pichardo-González J. M. y Guzmán Luis F. (2024). RADseq datasets of native beans from Mexico. Data in Brief 55: 110759
- Aguilar-Lopez, Antonio, Enrique Melo-Guerrero, Miguel Ángel Martínez-Damian, Juan Hernández-Ortiz, Luis Manuel Valenzuela-Nuñez, Antonio Aguilar-Lopez, Enrique Melo-Guerrero, y col. 2024. "Transmisión horizontal de precios en el mercado de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México." *Ecosistemas y recursos agropecuarios* 11(1). doi:10.19136/era.a11n1.3533.
- Bitocchi, Elena, Domenico Rau, Andrea Benazzo, Elisa Bellucci, Daniela Goretti, Eleonora Biagetti, Alex Panziera, y col. 2017. "High Level of Nonsynonymous Changes in Common Bean Suggests That Selection under Domestication Increased Functional Diversity at Target Traits." *Frontiers in Plant Science* 7: 2005. doi:10.3389/fpls.2016.02005.
- Catchen, Julian, Paul A. Hohenlohe, Susan Bassham, Angel Amores, and William A. Cresko. 2013. "Stacks: An Analysis Tool Set for Population Genomics." *Molecular ecology* 22(11): 3124-40. doi:10.1111/mec.12354.
- Chen, Shifu, Yanqing Zhou, Yaru Chen, y Jia Gu. 2018. "Fastp: An Ultra-Fast All-in-One FASTQ Preprocessor." *Bioinformatics (Oxford, England)* 34(17): i884-90. doi:10.1093/bioinformatics/bty560.
- Davey, John W., y Mark L. Blaxter. 2010. "RADSeq: Next-Generation Population Genetics." *Briefings in Functional Genomics* 9(5-6): 416-23. doi:10.1093/bfpg/elq031.
- Guzmán-Soria, Eugenio, María Teresa de-la-Garza-Carranza, José Alberto García-Salazar, Samuel Rebolgar-Rebolgar, y Juvencio Hernández-Martínez. 2019. "Análisis económico del mercado de frijol grano en México." *Agronomía Mesoamericana* 30(1): 131-46. doi:10.15517/am.v30i1.33760.
- He, Ni, Liting Tian, Jingnan Jin, Yue Liu, Lifang Li, Xiaokun Wang, Danyang Li, y col. 2024. "Identification and Validation of lncRNA Mutation Hotspot SNPs Associated with Myasthenia Gravis Susceptibility." *Non-coding RNA Research* 11: 209-19. doi:10.1016/j.ncrna.2024.12.012.
- Herry, Florian, Frédéric Héroult, Frédéric Lecerf, Laëtizia Lagoutte, Mathilde Doublet, David Picard-Druet, Philippe Bardou, y col. 2023. "Restriction Site-Associated DNA Sequencing Technologies as an Alternative to Low-Density SNP Chips for Genomic Selection: A Simulation Study in Layer Chickens." *BMC Genomics* 24(1): 271. doi:10.1186/s12864-023-09321-5.
- Korsa, Fekadu. 2022. "Effects of Functional Single Nucleotide Polymorphisms on Plant Phenotypes." *Archives of Crop Science* 5(2): 185-92. doi:10.36959/718/619.
- Kryazhimskiy, Sergey, y Joshua B. Plotkin. 2008. "The Population Genetics of dN/dS." *PLoS genetics* 4(12): e1000304. doi:10.1371/journal.pgen.1000304.
- Lebeuf-Taylor, Eleonore, Nick McCloskey, Susan F. Bailey, Aaron Hinz, y Rees Kassen. 2019. "The Distribution of Fitness Effects among Synonymous Mutations in a Gene under Directional Selection." *eLife* 8: e45952. doi:10.7554/eLife.45952.
- Mammadov, Jafar, Rajat Aggarwal, Ramesh Buyyarapu, y Siva Kumpatla. 2012. "SNP Markers and Their Impact on Plant Breeding." *International Journal of Plant Genomics* 2012: 728398. doi:10.1155/2012/728398.

- McKenna, Aaron, Matthew Hanna, Eric Banks, Andrey Sivachenko, Kristian Cibulskis, Andrew Kernytsky, Kiran Garimella, y col. 2010. "The Genome Analysis Toolkit: A MapReduce Framework for Analyzing next-Generation DNA Sequencing Data." *Genome Research* 20(9): 1297-1303. doi:10.1101/gr.107524.110.
- Minotti, Linda, Chiara Agnoletto, Federica Baldassari, Fabio Corrà, y Stefano Volinia. 2018. "SNPs and Somatic Mutation on Long Non-Coding RNA: New Frontier in the Cancer Studies?" *High-Throughput* 7(4): 34. doi:10.3390/ht7040034.
- Munns, Rana, y A Harvey Millar. 2023. "Seven Plant Capacities to Adapt to Abiotic Stress." *Journal of Experimental Botany* 74(15): 4308-23. doi:10.1093/jxb/erad179.
- Prieto-Cornejo, María R., Jaime A. Matus-Gardea, Francisco Gavi-Reyes, José M. Omaña-Silvestre, José J. Brambila-Paz, Julio Sánchez-Escudero, y Miguel Á Martínez-Damián. 2019. "EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE CULTIVADA DE FRIJOL E IMPACTO ECONOMICO DE LA SEQUÍA SOBRE SU RENDIMIENTO BAJO CONDICIONES DE TEMPORAL EN MÉXICO." *Revista fitotecnica mexicana* 42(2): 173-82.
- Singh, Mandakini, y Santosh Kumar. 2023. "Effect of Single Nucleotide Polymorphisms on the Structure of Long Noncoding RNAs and Their Interaction with RNA Binding Proteins." *Bio Systems* 233: 105021. doi:10.1016/j.biosystems.2023.105021.
- Song, Baoxing, Edward S. Buckler, Hai Wang, Yaoyao Wu, Evan Rees, Elizabeth A. Kellogg, Daniel J. Gates, y col. 2021. "Conserved Noncoding Sequences Provide Insights into Regulatory Sequence and Loss of Gene Expression in Maize." *Genome Research* 31(7): 1245-57. doi:10.1101/gr.266528.120.
- de Souza, Isabela Pavanelli, Beatriz Rosa de Azevedo, Alexandre Siqueira Guedes Coelho, Thiago Lívio Pessoa Oliveira de Souza, Paula Arielle Mendes Ribeiro Valdisser, Lucas Matias Gomes-Messias, Breno Osvaldo Funicheli, Claudio Brondani, y Rosana Pereira Vianello. 2023. "Whole-Genome Resequencing of Common Bean Elite Breeding Lines." *Scientific Reports* 13(1): 12721. doi:10.1038/s41598-023-39399-6.
- Walsh, Ian M., Micayla A. Bowman, Iker F. Soto Santarriaga, Anabel Rodriguez, y Patricia L. Clark. 2020. "Synonymous Codon Substitutions Perturb Cotranslational Protein Folding in Vivo and Impair Cell Fitness." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117(7): 3528-34. doi:10.1073/pnas.1907126117.

## EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DE ACCESIONES CHAYOTE (*Sechium* spp.) A SU ESTABLECIMIENTO EN CONDICIONES DE CULTIVO *IN VITRO*.

[EVALUATION OF THE RESPONSE OF CHAYOTE ACCESSIONS (*Sechium* spp.) TO THEIR ESTABLISHMENT UNDER *IN VITRO* CULTURE CONDITIONS]

Gabriela Sandoval-Cancino<sup>1</sup>, Luis Alberto Gómez Reyes<sup>1</sup>, Jorge David Cadena Samudio<sup>1</sup>, Francisco Fabian Calvillo-Aguilar<sup>1</sup> y Carlos Iván Cruz Cárdenas<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP. Boulevard de la diversidad 400, Colonia Rancho de Las Cruces. Km 8 carretera Tepatitlán-Lagos de Moreno, C. P. 47600, Tepatitlán de Morelos, Jal., México.

\*Autor de correspondencia: cruz.ivan@inifap.gob.mx

ORCID:0000-0002-1952-0191

### Resumen

El chayote (*Sechium* spp.) es una hortaliza de relevancia agroalimentaria en Mesoamérica debido a su valor nutricional, diversidad genética y potencial para el mejoramiento varietal. Sin embargo, su conservación *ex situ* enfrenta limitantes como baja germinación y alta susceptibilidad a plagas y enfermedades. El cultivo *in vitro* representa una alternativa eficiente para preservar y multiplicar accesiones valiosas, permitiendo obtener plantas sanas y libres de patógenos. El presente estudio evaluó la respuesta de 20 accesiones de chayote durante su establecimiento *in vitro*, considerando supervivencia, brotación, oxidación y contaminación. Los explantes, obtenidos de entrenudos de frutos germinados y desinfectados con hipoclorito de sodio, fueron cultivados en medio MS sin reguladores de crecimiento. Los resultados mostraron una marcada variabilidad genotípica. Accesiones como 387-17, *Albus dulcis* G, 633-M12, 387-M11 y *Sechium compostum* (Planta 1 y 2) alcanzaron 100 % de supervivencia y brotación, además de presentar bajos niveles de oxidación y contaminación, indicando alta adaptabilidad al cultivo *in vitro*. En contraste, la accesión 387-M16 mostró la supervivencia más baja (23.08 %), acompañada de elevada oxidación y contaminación, lo que evidencia su sensibilidad al estrés oxidativo y la necesidad de protocolos específicos para su desinfección y establecimiento. La oxidación fue una de las principales limitantes, afectando especialmente a 387-M16 y *Albus dulcis* CH, mientras que las tasas de contaminación fueron mayores en Perla negra 1001 y 387-M16. En conjunto, los resultados confirman la influencia del genotipo en la respuesta *in vitro* y destacan accesiones con alto potencial para programas de conservación y micropropagación, así como la necesidad de mejorar protocolos para genotipos susceptibles.

Palabras clave: chayote, cultivo *in vitro*, accesiones.

### Abstract

Chayote (*Sechium* spp.) is a vegetable of agro-food relevance in Mesoamerica due to its nutritional value, genetic diversity, and potential for varietal improvement. However, its *ex situ* conservation faces limitations such as low germination rates and high susceptibility to pests and diseases. *In vitro* culture offers an efficient alternative for preserving and multiplying valuable accessions, enabling the production of healthy, pathogen-free plants. This study evaluated the response of 20 chayote accessions during *in vitro* establishment, considering survival, sprouting, oxidation, and contamination. Explants obtained from internodes of germinated fruits and disinfected with sodium hypochlorite were cultivated on MS medium without growth regulators. The results revealed marked genotypic variability. Accessions such as 387-17, *Albus dulcis* G, 633-M12, 387-M11, and *Sechium compostum* (Plant 1 and 2) achieved 100 % survival and sprouting, along with low levels of oxidation and contamination, indicating high adaptability to *in vitro* culture. In contrast, accession 387-M16 exhibited the lowest survival (23.08 %), along with high oxidation and contamination, demonstrating sensitivity to oxidative stress and the need for specific disinfection and establishment protocols.

Oxidation was one of the main limiting factors, particularly affecting 387-M16 and Albus dulcis CH, while contamination rates were higher in Perla negra 1001 and 387-M16. Overall, the results confirm the strong influence of genotype on *in vitro* response and highlight accessions with high potential for conservation and micropropagation programs, as well as the need to improve protocols for more susceptible genotypes.

Key words: Chayote, in vitro culture, accessions.

## Introducción

El chayote (*Sechium spp.*), perteneciente a la familia Cucurbitaceae, es una hortaliza de gran importancia agroalimentaria en Mesoamérica, donde ha formado parte de la dieta tradicional durante siglos. Además de su valor nutritivo, que incluye vitaminas, minerales y fibra dietética, el chayote tiene propiedades medicinales y se utiliza en diversas preparaciones culinarias, desde guisos hasta postres. Las accesiones de chayote representan una valiosa reserva genética para la mejora del cultivo, ya que poseen características como tolerancia a estrés biótico y abiótico, además de una amplia diversidad morfológica y bioquímica (Zayas, 2019). Esta diversidad genética es esencial para el desarrollo de nuevas variedades que sean más resistentes a las condiciones climáticas variables, plagas y enfermedades, contribuyendo así a la seguridad alimentaria en la región. Sin embargo, su conservación y aprovechamiento están limitados por su bajo porcentaje de germinación y susceptibilidad a plagas y enfermedades en condiciones *ex situ*, lo que dificulta la conservación de líneas genéticas valiosas y su uso en programas de mejoramiento. La conservación *in vitro*, además de ofrecer una solución para mantener estas accesiones en condiciones controladas y libres de plagas, permite también la producción rápida y masiva de plantas, facilitando la expansión y distribución de material genético de alto valor. El cultivo *in vitro* constituye una herramienta eficaz para la propagación y conservación de este germoplasma (Rodríguez, *et al.*, 2016). Esta técnica permite obtener plantas sanas, libres de patógenos y con alta tasa de multiplicación en un espacio reducido, reduciendo además el riesgo de pérdida genética por eventos ambientales adversos o por desastres naturales. La micropropagación también favorece la producción de plantas con características específicas, como mayor rendimiento o resistencia a ciertas plagas, que pueden ser seleccionadas y clonadas en masa. No obstante, la eficiencia del establecimiento del cultivo *in vitro* depende de múltiples factores, incluyendo el genotipo, el medio de cultivo, y la respuesta a la oxidación y contaminación, que son problemas frecuentes en la micropropagación (Gutiérrez-Díez *et al.*, 2020). La optimización de los medios de cultivo, la utilización de agentes antioxidantes y mejorar las condiciones de laboratorio son áreas de investigación activa para incrementar los índices de éxito en la producción *in vitro* de chayote. Así, integrando más técnicas como la criopreservación y la ingeniería genética, ofrecen nuevas oportunidades para la conservación efectiva y el desarrollo de variedades mejoradas, asegurando así la sostenibilidad de la producción de chayote en regiones amenazadas por el cambio climático y la pérdida de biodiversidad. La integración de estos avances puede garantizar un manejo más eficiente del germoplasma, promoviendo su uso racional y sostenido, en beneficio de agricultores, consumidores y del medio ambiente. El presente estudio establece avances sobre la respuesta de accesiones de chayote en condiciones de cultivo *in vitro* con base en su supervivencia, oxidación y contaminación.

## Materiales y Métodos

### Accesiones de chayote

Se evaluaron 20 accesiones de *Sechium spp.* recolectadas en regiones del sureste mexicano (Cuadro 1). Se utilizó como explante entrenudos de frutos germinados, los cuales fueron desinfectados mediante una solución de hipoclorito de sodio al 1.5 % durante 12 minutos, seguidos de tres enjuagues con agua destilada estéril.

Cuadro 1. Accesiones de chayote para su establecimiento *in vitro*.

	Genotipo	
Nigrum xalapensis	387-M16	653
633-M14	387 verde claro	633-M8 Planta 1
387-17	Perla negra Replica 1	633-M8 Planta 2
Albus dulcis CH	Perla negra Replica 2	633-M8 Planta 3
Albus dulcis G	Nigrum spinosum 300	<i>Sechium compostum</i> Planta 1
633-M12	Nigrum spinosum	<i>Sechium compostum</i> Planta 2
387-M11	Perla negra 1001	

#### Establecimiento *in vitro*

Los explantes se cultivaron en frascos de vidrio con medio MS (Murashige y Skoog, 1962) suplementado con 30 g/L de sacarosa, 0.7% de agar y sin reguladores de crecimiento, ajustando el pH a 5.7. Los cultivos se mantuvieron en cámara de crecimiento a  $24 \pm 2$  °C, fotoperiodo de 16 horas luz y  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de intensidad luminosa.

#### Diseño experimental y análisis de datos

Se utilizó un experimento fue completamente al azar. Las variables evaluadas a los 30 días fueron: porcentaje de supervivencia, respuesta (brotación), oxidación y contaminación. Los datos fueron analizados mediante ANOVA y prueba de Duncan ( $p \leq 0.05$ ) con el software R studio.

### Resultados

#### Variedades de chayote con mejor adaptación al cultivo *in vitro*

Los resultados obtenidos en este estudio revelan una marcada variabilidad entre las distintas accesiones de chayote evaluadas durante el establecimiento *in vitro* (Cuadro 1), lo que refleja la diversidad genética existente y su impacto en la respuesta a las condiciones de cultivo en el laboratorio. La supervivencia en la mayoría de las accesiones fue notablemente alta, alcanzando el 100% en varias de ellas, como 387-17, Albus dulcis G, 387-11, Perla negra Replica 2 y *Sechium compostum* Planta 1 y Planta 2. Estas accesiones evidencian un buen comportamiento en términos de adaptación inicial, lo que las posiciona como candidatas ideales para programas de conservación y multiplicación rápida, debido a su alta tolerancia a las condiciones de cultivo *in vitro*.

#### Variedades de chayote con menor adaptación al cultivo *in vitro*

Por otro lado, la accesión 387-M16 presentó la supervivencia más baja (23.08 %), así como una respuesta de brotación significativamente reducida (15.38 %) y una alta incidencia de oxidación (61.69 %), lo que sugiere una sensibilidad particular a las condiciones de cultivo, probablemente relacionada con daños iniciales por estrés oxidativo.

#### Formación de brotes de variedades de chayote *in vitro*

En cuanto a la respuesta de brotación, once accesiones lograron tasas del 100%, lo cual indica un fuerte potencial para la propagación clonal, vital en la conservación y mejoramiento genético de especies como el chayote, cuyo manejo convencional se afecta por su baja tasa de germinación y susceptibilidad a plagas y enfermedades. La baja respuesta en accesiones como 387-M16 (15.38 %) y 387 verde claro (61.11 %) refleja la sensibilidad de estos genotipos, sugiriendo que podrían requerir condiciones específicas de medio, optimización de protocolos o pretratamientos para mejorar su eficiencia en micropropagación. Las accesiones con menor respuesta fueron 387-M16 (15.38 %) y 387 verde claro (61.11 %).

#### Efectividad de la asepsia de los explantes

El análisis de contaminación mostró que la mayoría de las accesiones presentaron niveles bajos o nulos, lo cual es favorable para la producción en masa y conservación. Sin embargo, la presencia de altas tasas de contaminación en accesiones como Perla negra 1001 (61.54 %) y 387-M16 (53.85 %) indica que estas líneas pueden ser más susceptibles

a infecciones fúngicas, bacterianas o por otros agentes, por lo que requieren protocolos de descontaminación y esterilización más rigurosos para su utilización efectiva.

### Presencia de oxidación

La oxidación fue una de las principales limitantes observadas, siendo especialmente alta en *387-M16* (61.69 %) y *Albus dulcis CH* (36.67 %), lo cual afecta directamente la regeneración y viabilidad del tejido. Por el contrario, accesiones como *Sechium compostum Planta 2* y *387-17* presentaron valores muy bajos (0 % y 2.86 %, respectivamente), indicando una mayor tolerancia al estrés oxidativo. Este fenómeno tiene implicaciones directas para la conservación *ex situ*, en donde el control del estrés oxidativo es fundamental para mejorar las tasas de establecimiento y producción de plántulas libres de contaminantes y patógenos. La alta oxidación en ciertas accesiones puede modificarse mediante la incorporación de antioxidantes en el medio de cultivo o ajustando las condiciones de incubación y exposición a la luz. La evaluación de la respuesta antioxidante, además, puede ser un criterio útil para seleccionar genotipos con mayor potencial de adaptación en micropropagación y conservación.

### Comportamiento de respuesta al cultivo *in vitro* de acuerdo a la variedad

La variabilidad observada en los diferentes parámetros resalta la importancia de seleccionar genotipos con rasgos favorables para reducir riesgos y mejorar la eficiencia de los programas de micropropagación y conservación. Accesiones como *Sechium compostum*, 633-M12, 387-17 y 387-M11 muestran un comportamiento prometedor en todos los aspectos evaluados, consolidándose como excelentes candidatos para el establecimiento de bancos de germoplasma y programas de mejoramiento genético dirigidos a incrementar la resistencia, el rendimiento y la adaptabilidad del chayote en distintas condiciones agroecológicas. Las accesiones mostraron diferencias significativas en todas las variables evaluadas. La supervivencia fue alta en la mayoría de las accesiones, destacando *387-17*, *Albus dulcis*, *G633-M12*, *387-M11*, *Perla negra Replica 2*, *633-M8 Planta 2*, *Sechium compostum* Planta 1, *Sechium compostum* Planta 2 con 100 %. La accesión *387-M16* presentó la supervivencia más baja con apenas 23.08 %, lo cual puede asociarse a un mayor daño oxidativo inicial y sensibilidad a las condiciones de cultivo.

### Conclusiones

El establecimiento *in vitro* de accesiones de *Sechium* spp. es factible, pero está altamente influenciado por el genotipo. Accesiones como 633-M12, *Sechium compostum* y 387-17 presentaron alta supervivencia, brotación y baja oxidación, lo que las convierte en candidatas ideales para protocolos de propagación y conservación. Se requiere estandarizar protocolos específicos para accesiones con alta oxidación o contaminación. Por otro lado, algunas accesiones, como 387-M16 y *Perla negra* 1001, mostraron mayor susceptibilidad a la oxidación y contaminación, lo que conduce a optimizar nuevos protocolos de asepsia y ajuste del medio de cultivo para mejorar su comportamiento *in vitro*. En este trabajo se demostró la efectividad del cultivo *in vitro* para conservar especies de interés agroalimentario para México.

Cuadro 1. Respuesta de 20 accesiones de Chayote al establecimiento *in vitro*.

Genotipo	Supervivencia (%)	Respuesta (%)	Oxidación (%)	Contaminación (%)
<i>Nigrum xalapensis</i>	88.89 a	66.67 bc	21.11 bcd	0 d
633-M14	77.78 a	77.78 abc	6.56 cd	0 d
387-17	100 a	100 a	2.86 cd	14.29 bcd
<i>Albus dulcis</i> CH	66.67 a	66.67 bc	36.67 b	33.33 abcd
<i>Albus dulcis</i> G	100 a	100 a	23.75 bcd	50 abc
633-M12	100 a	100 a	33.13 bc	0 d
387-M11	100 a	100 a	5 cd	9.09 cd
387-M16	23.08 b	15.38 d	61.69 a	53.85 ab
387 verde claro	94.44 a	61.11 c	20.22 bcd	5.56 d

Perla negra Replica 1	72.73	a	100	a	4.82	cd	36.36	abcd
Perla negra Replica 2	100	a	100	a	15.85	bcd	0	d
Nigrum spinosum 300	79.17	a	95.83	ab	29.67	bcd	33.33	abcd
Nigrum spinosum	72.22	a	88.89	abc	28.33	bcd	27.78	abcd
Perla negra 1001	84.62	a	76.92	abc	17.69	bcd	61.54	a
653	95	a	100	a	14.15	bcd	0	d
633-M8 Planta 1	84.21	a	94.74	ab	15.21	bcd	15.80	bcd
633-M8 Planta 2	100	a	100	a	7	bcd	11.76	cd
633-M8 Planta 3	83.33	a	100	a	16	bcd	8.33	d
<i>Sechium compostum</i> Planta 1	100	a	100	a	5.67	cd	0	d
<i>Sechium compostum</i> Planta 2	100	a	100	a	0	d	33.33	abcd

### Agradecimientos y fuente financiera

Agradecemos al Dr. Jorge Cadena Iñiguez por proporcionar material vegetal y a la fuente financiera INIFAP.

### Referencias

- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497.
- Zayas, M. (2019). Propagación in vitro del chayote (*Sechium edule*). *Revista Mexicana de Biotecnología*, 24(1), 15-22.
- Rodríguez, J. et al. (2016). Conservación de germoplasma silvestre de chayote mediante encapsulación. *Agrociencia*, 50(3), 215-223.
- Gutiérrez-Díez, A. et al. (2020). Estrategias para el control de oxidación fenólica en cultivo in vitro de Cucurbitáceas. *Biotecnología Vegetal*, 20(2), 35-41.

**TRATAMIENTOS PRE-GERMINATIVOS Y SU EFECTO EN SEMILLAS DE CINCO ESPECIES DEL GÉNERO *OPUNTIA*.**[PRE-GERMINATION TREATMENTS AND THEIR EFFECT ON SEEDS OF FIVE SPECIES OF THE *OPUNTIA* GENUS]

Carlos Cruz Cárdenas<sup>1\*</sup>, Francisco Fabián Calvillo Aguilar<sup>1</sup>, Marco Aurelio Aragón Magadán<sup>1</sup> y Gabriela Sandoval Cancino<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP. Boulevard de la diversidad 400, Colonia Rancho de Las Cruces. Km 8 carretera Tepatitlán-Lagos de Moreno, C. P. 47600, Tepatitlán de Morelos, Jal., México.

\*Autor de correspondencia: cruz.ivan@inifap.gob.mx

ORCID: 0000-0002-1952-0191.

**Resumen**

El género *Opuntia* presenta problemas en velocidad, uniformidad y porcentaje de germinación, esto se debe a los diferentes tipos de dormancia que poseen las semillas de las especies. Esta dormancia inhibe en parte el proceso de germinación. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la escarificación química ( $H_2SO_4$ ,  $H_2O_2$ ) e inducción con ácido giberélico ( $GA_3$ ) sobre la germinación de cinco especies (*O. Ficus indica*, *O. Robusta*, *O. Lasiacantha*, *O. Streptacantha*, *O. Albicarpa*). El experimento contó con 30 semillas para cada tratamiento con tres repeticiones para comparar el porcentaje de germinación que propiciaba cada uno de los tratamientos sobre las diferentes especies de *Opuntia*. Las unidades experimentales fueron cajas de acrílico colocadas en cámaras de germinación bajo condiciones controladas de humedad (70-80 %) y temperatura (25-27 °C) durante 60 días. La variable a evaluar fue el porcentaje de germinación durante cada semana por tratamiento y especie para poder comparar resultados. Los resultados indican diferencias significativas tanto en el efecto del factor especies como en el de tratamiento, resultando que la especie *robusta* obtuvo el mayor porcentaje de germinación (50.3 %) y en comparación con *lasiacantha* que presentó la menor respuesta germinativa (14.6 %). El mejor tratamiento para la mayoría de las especies fue el que consistía en  $H_2O_2$  30 MIN +  $GA_3$  24 horas.

Palabras clave: ácido giberélico, germinación, *Opuntia*, escarificación.

**Abstract**

The *Opuntia* genus presents problems in terms of speed, uniformity, and germination percentage. This is due to the different types of dormancy that the seeds of the species possess. This dormancy partially inhibits the germination process. The objective of this study was to evaluate the effect of chemical scarification ( $H_2SO_4$ ,  $H_2O_2$ ) and gibberellic acid ( $GA_3$ ) induction on the germination of five species (*O. ficus indica*, *O. robusta*, *O. lasiacantha*, *O. streptacantha* y *O. albicarpa*). The experiment included 30 seeds for each treatment with three replicates to compare the germination percentage promoted by each of the treatments on the different *Opuntia* species. The experimental units were acrylic boxes placed in germination chambers under controlled humidity (70-80 %) and temperature (25-27 °C) conditions for 60 days. The variable to be evaluated was the germination percentage during each week per treatment and species in order to compare results. The results indicate significant differences in both the effect of the species factor and that of the treatment, with the robust species obtaining the highest germination percentage (50.3 %) and, in comparison, the lasiacantha species presenting the lowest germination response (14.6 %). The best treatment for most species was  $H_2O_2$  30 MIN +  $GA_3$  24 hours.

Keywords: Gibberellic acid, germination, Prickly pear, scarification.

**Introducción**

El género *Opuntia* contiene especies de plantas que se adapta bien a las condiciones restringidas de las diferentes regiones áridas y semiáridas del planeta, tanto en lo referido a recursos hídricos, suelos y aspectos medioambientales, en respuesta a esta adaptación sus semillas han generado diversos tipos de dormancia que les permiten a las especies soportar estas condiciones ambientales y germinar hasta que encuentran un nicho adecuado (Monroy-Vázquez *et al.*, 2017). El centro de origen y domesticación del género *Opuntia* es México, pero actualmente esta planta se encuentra en zonas con condiciones climáticas similares a las de nuestro país en varios países, entre ellos, los países mediterráneos, Angola, Australia, los Estados Unidos de América, Kenia y Sudáfrica (Mousavi *et al.*, 2011). Las especies del género son de gran importancia debido a que en regiones áridas la planta es utilizada como alimento para el consumo de su fruto (tuna) o de sus cladodios como verdura, además de utilizarse como forraje para el consumo del ganado, ya sea fresco o almacenado como ensilado (Ortega-Baes *et al.*, 2010). Las plantas del género *Opuntia* se reproduce mediante semillas, pero en México se propagan primordialmente de manera vegetativa a partir de tallos desprendidos debido a la facilidad que representa este método de propagación con respecto a la de semillas, ya que las semillas poseen características de dormancia que hacen que su germinación sea muy baja y en algunas especies nula (Zarchini *et al.*, 2011). Dado la dureza de la testa y la escasa información sobre la efectividad del tratamiento para las semillas de esa especie, pues sólo se encuentra información de la propagación vegetativa a partir de tallos desprendidos porque es más eficiente y porque así se hace de manera comercial (Subhashini Devi *et al.*, 2012). La dormancia es un aspecto determinante para la calidad de las semillas y su consideración para resguardo, debido a que está ligada a la capacidad germinativa (Mousavi *et al.*, 2011). El fenómeno de la dormancia es común, principalmente en semillas que no germinan después de la cosecha debido a los mecanismos internos, de naturaleza física o fisiológica, que bloquean la germinación. Estos mecanismos son genéticos y acontecen durante el ciclo de vida de la especie, durante la maduración de la semilla, de modo que, después de la dispersión, la semilla todavía no estará apta para germinar (Ranjan *et al.*, 2016). Existe muy poca literatura sobre la calidad física y fisiológica de la semilla *Opuntia ficus-indica*, este es uno de los principales inconvenientes para la preservación *ex situ* de esta especie además que no se cuenta con métodos adecuados de almacenamiento generando la necesidad de buscar tecnologías para la preservación de semillas de las diferentes accesiones (Santos-Díaz *et al.* 2010). Dicha especie presenta diferentes tipos de dormancia, los cuales son un problema para la propagación sexual específicamente en la germinación (Orozco-Segovia *et al.* 2007). El empleo de tratamientos pre-germinativos aportan una estrategia para favorecer la germinación en aquellas semillas que poseen características estructurales de la testa que impiden su fácil germinación, agentes químicos como  $H_2SO_4$  y  $H_2O_2$  han sido utilizados en algunas especies incrementando la germinación, por efecto del ablandamiento de la testa y creando permeabilidad hacia el interior de la semilla, si combinamos este tipo de estrategia con el uso de reguladores del crecimiento como el Ácido Giberélico ( $GA_3$ ) que sabemos que favorece la germinación debido a que contrarresta la dormancia en semillas por ser antagónico del ácido abscísico (ABA) probablemente la germinación de las diferentes especies de opuntia se vería incrementada (Mandujano *et al.*, 2007; Sánchez-Urdaneta *et al.*, 2016). El presente trabajo pretende evaluar el efecto de escarificación química y  $GA_3$  en cinco especies de *Opuntia* para establecer protocolos de germinación adecuados y específicos, asimismo utilizarlos para evaluar la disminución en germinación de las especies de *Opuntia* después de su resguardo a largo plazo como método de verificación de la efectividad del protocolo de resguardo de semillas.

## Materiales y métodos

### Obtención de semillas de especies de Opuntia

El experimento se realizó en La Colección de Semillas del Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP las semillas que se utilizaron para el estudio fueron proporcionadas por el Depositario Nacional de *Opuntia* de la Universidad Autónoma de Chapingo ubicada en El Orito Zacatecas.

### Análisis de semillas

Las semillas se seleccionaron previamente realizando un análisis de pureza física y análisis de Rayos X con la finalidad de utilizar solo semillas en buen estado. Se realizó el análisis topográfico de Tetrazolio para determinar la viabilidad de cada una de las accesiones. Para el desarrollo del experimento se utilizaron 30 semillas por unidad experimental con tres repeticiones por tratamiento.

### **Desinfección y escarificación de semilla**

Toda la semilla utilizada para el experimento fue desinfectada con NaClO sin diluir por 30 minutos en agitación constante, pasando los 20 minutos, posteriormente fue enjuagada con agua destilada estéril. Posteriormente cada especie de *Opuntia* fue sometida a los diferentes tratamientos de escarificación química con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (5 y 30 minutos) y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30 minutos) combinados con tratamientos de imbibición con GA<sub>3</sub> (24 horas).

### **Incubación de semillas**

Después de ser sometidas a los diferentes tratamientos, las semillas fueron incubadas en cajas de acrílico en un cuarto de germinación con condiciones controladas de temperatura (25-27 °C) y humedad (70-80 %).

### **Análisis de datos de germinación**

La variable a evaluar fue el porcentaje de germinación durante cada semana hasta los 60 días por tratamiento y especie para poder comparar resultados. Para el análisis de resultados se realizó un ANOVA para la variable germinación y un análisis factorial con una prueba de comparación de medias Tukey con un *alpha* de 0.01 en el software estadístico SAS 9.6.

## **Resultados**

### **Comportamiento de germinación de especies de *Opuntia***

Las especies evaluadas en este trabajo presentaron respuesta variable donde claramente se observa un efecto de los tratamientos pre-germinativos sobre las diferentes especies utilizadas. Se observaron porcentajes de germinación que van desde el 7 % hasta el 65 %, lo que demuestra esta variabilidad de respuesta por parte de las diferentes especies y pre-tratamientos. Los resultados indican que hay diferencias significativas entre los tratamientos del experimento, siendo los tratamientos 7 y 4 los que generaron la mayor respuesta germinativa en la mayoría de las especies, a excepción de las especies *O. ficus indica* y *O. lasiacantha* en las que el tratamiento testigo fue el que presentó la mayor germinación (Figura 1).

Los tratamientos que contenían H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> fueron los que obtuvieron la menor germinación para todas las especies evaluadas, lo cual indica que la escarificación causada por este agente químico probablemente tuvo un efecto demasiado fuerte para la semilla, causando una pérdida de germinación por daño al interior de la semilla, esto podría ser más efectivo si se utiliza una concentración menor en el ácido empleado o utilizando un ácido menos fuerte (Sánchez-Urdaneta *et al* 2016).

El análisis factorial muestra que la respuesta en la germinación está influenciada por la especie ya que algunas especies tienden a germinar más que otras, siendo *O. robusta* la que mostró mayor porcentaje de germinación con un 50.3%, mientras que *O. lasiacantha* fue la que presentó la menor germinación con un porcentaje de 14.6% (Cuadro 1).

En cuanto al efecto del tratamiento (Cuadro 2), los mayores porcentajes de germinación fueron los que se obtuvieron por los tratamientos 7 y 4 con 65.3 y 63.3 % respectivamente, mientras que y el de menor porcentaje de germinación fue el tratamiento No. 2 con un 7.9%. Se observó que los tratamientos que incluían H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> fueron los que resultaron con menor germinación, por otra parte, los que incluyen GA<sub>3</sub> se obtuvieron mejores resultados, no obstante, algunas especies presentaron porcentajes de germinación mayores cuando la semilla no fue sometida a ningún tratamiento de escarificación lo cual se puede atribuir a que son especies más domesticadas que tienen una mayor permeabilidad en su testa debido a que esta misma es más delgada que la testa de las especies menos domesticadas.

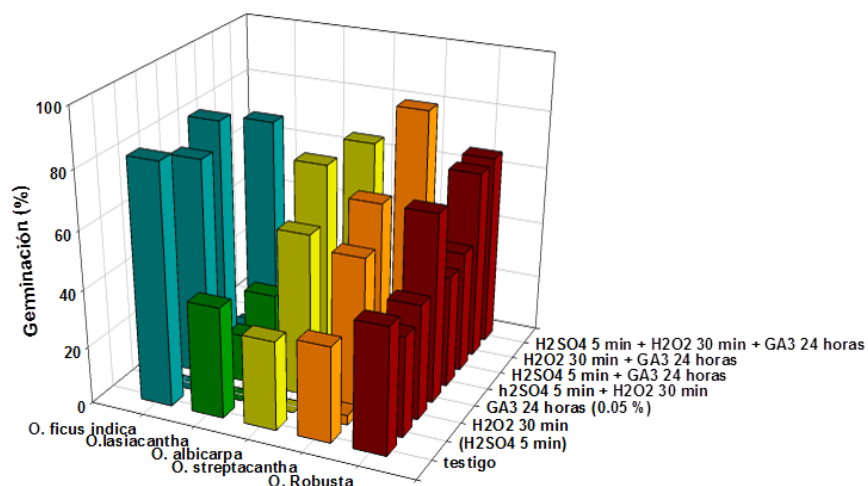


Figura 1. Respuesta germinativa de cinco especies del género *Opuntia* a diversos tratamientos pre-germinativos de escarificación química e inducción de la germinación con ácido giberélico.

Cuadro 1. Efecto del factor especie sobre el porcentaje de germinación en *Opuntia* bajo diferentes tratamientos pre-germinativos.

Especie	Germinación (%)	
<i>Opuntia robusta</i>	50.3	a
<i>Opuntia streptacantha</i>	30.3	c
<i>Opuntia albicarpa</i>	33.3	c
<i>Opuntia lasiacantha</i>	14.6	d
<i>Opuntia ficus indica</i>	40.9	b

Cuadro 2. Efecto del factor tratamiento sobre el porcentaje de germinación de cinco especies del género *Opuntia* bajo diferentes tratamientos pre germinativos.

Tratamiento	Germinación (%)	
1. Testigo	45.3	b
2. H2SO4 5 min	7.9	c
3. H2O2 30 min	48.6	b
4. GA3 24 horas (0.05 %)	63.3	a
5. H2SO4 5 min + H2O2 30 min	11.3	c
6. H2SO4 5 min + GA3 24 horas	13.3	c
7. H2O2 30 min + GA3 24 horas	65.3	a
8. H2SO4 5 min + H2O2 30 min + GA3 24 horas	16	c

## Discusión

Este experimento permitió conocer las cualidades germinativas en las semillas del género *Opuntia* en 11 diferentes especies. Resulta evidente que la capacidad germinativa entre especies es diferente y algunas especies tienen mayor germinación que otras de manera natural e incluso cuando son sometidas a tratamientos para incrementar dicha germinación se mantiene esa diferencia en la capacidad germinativa. El uso de estratificación térmica y diferentes sustratos resulta de utilidad para continuar con estudios sobre los métodos que propendan mayor efectividad para la germinación y posteriormente el aprovechamiento potencial de la especie.

Con este experimento podemos concluir que cada especie posee características físicas de dormancia como el grosor y permeabilidad de la testa, así como características químicas que hacen que responda de manera diferente a los tratamientos pre-germinativos.

Combinando el uso de la escarificación química que causa el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el efecto del GA<sub>3</sub> que contrarresta la dormancia causada por el ABA se puede incrementar significativamente la germinación en la mayoría de las especies de *Opuntia* evaluadas.

### Referencias

- Konings, G. (2010). *Opuntia Ficus-Indica* as an Extremophile: a survivor in extreme climates?. *Cactus and Succulent Journal*, 82(4), 172-175.
- Mandujano, M. C., Golubov, J., & Rojas-Aréchiga, M. (2007). Efecto del ácido giberélico en la germinación de tres especies del género *Opuntia* (Cactaceae) del Desierto Chihuahuense. *Cactáceas y suculentas mexicanas*, 52, 46-52.
- Monroy-Vázquez, M. E., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, J. R., Solano-Camacho, E., Campos, H., & García-Villanueva, E. (2017). Imbibición, viabilidad y vigor de semillas de cuatro especies de *Opuntia* con grado distinto de domesticación. *Agrociencia*, 51(1).
- Mousavi, S. R., Rezaei, M., & Mousavi, A. (2011). A general overview on seed dormancy and methods of breaking it. *Advances in Environmental Biology*, 5(10), 3333-3337.
- Orozco-Segovia, A., Márquez-Guzmán, J., Sánchez-Coronado, M. E., Gamboa de Buen, A., Baskin, J. M., & Baskin, C. C. (2007). Seed anatomy and water uptake in relation to seed dormancy in *Opuntia tomentosa* (Cactaceae, Opuntioideae). *Annals of Botany*, 99(4), 581-592.
- Ortega-Baes, P., Aparicio-González, M., Galíndez, G., del Fueyo, P., Sührling, S., & Rojas-Aréchiga, M. (2010). Are cactus growth forms related to germination responses to light? A test using *Echinopsis* species. *Acta Oecologica*, 33(3), 339-342.
- Ranjan, P., Ranjan, J. K., Misra, R. L., Dutta, M., & Singh, B. (2016). Cacti: notes on their uses and potential for climate change mitigation. *Genetic resources and crop evolution*, 63(5), 901-917.
- Rosa-Ibarra, M., & García, H. (1994). Estimulación de la germinación de cinco especies de cactáceas consideradas en peligro de extinción. *Phyton*.
- Sánchez-Urdaneta, A. B., Suárez-Calleja, E., TusentPérez, J., Sánchez, C. L., Peña, V. B. A., de Ortega, C. B. C., & Peña-Valdivia, C. B. (2016). Tratamientos pregerminativos de semillas y emergencia de las plántulas de *Opuntia streptacantha* Lem. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 33(2).
- Santos-Díaz, M. S., Pérez-Molphe, E., Ramírez-Malagón, R., Núñez-Palenius, H. G., & Ochoa-Alejo, N. (2010). Mexican threatened cacti: current status and strategies for their conservation. *Species diversity and extinction*. Nova Science Publishers, Inc., New York, 1-60.
- Subhashini Devi, P., Satyanarayana, B., Arundhati, A., & Raghava Rao, T. (2012). Effect of storage temperature and dormancy-breaking treatments on seed germination, moisture content and seed vigor in gum karaya (*Sterculia urens* Roxb.). *Forest Science and Technology*, 8(1), 11-15.
- Zarchini, M., Hashemabadi, D., Kaviani, B., Rafeie Fallahabadi, P., & Negahdar, N. (2011). Improved germination conditions in *Cycas revoluta* L. by using sulfuric acid and hot water. *Plant omics journal*, 4(7), 350-353.

## DIVERSIDAD DE CACTÁCEAS EN EL MUNICIPIO DE COSÍO, AGUASCALIENTES, MEXICO

### [DIVERSITY OF CACTI IN THE MUNICIPALITY OF COSÍO, AGUASCALIENTES MEXICO]

Leslie Sarahi Ibarra Vásquez<sup>1\*</sup>, Luis Lorenzo Valera Montero<sup>1</sup>, Candy Carranza Álvarez<sup>2</sup>, Irma Guadalupe López Muraira<sup>3</sup> y Silvia Flores Benítez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TecNM/Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, División de Estudios de Posgrado e Investigación. El Llano, Aguascalientes, México. <sup>2</sup>Universidad Autónoma De San Luis Potosí/ Unidad Multidisciplinaria Zona Huasteca. Romualdo del Campo #501, Frac. Rafael Curiel, C.P. 79060, Ciudad Valles, San Luis Potosí, México.

<sup>3</sup>TECNM/ Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Jalisco, Méx. \*

Autor de correspondencia: [silvia.fb@llano.tecnm.mx](mailto:silvia.fb@llano.tecnm.mx)

ORCID: 0000-0002-0433-8573

#### Resumen

Este estudio tiene como objetivo monitorear la diversidad de cactáceas en el municipio de Cosío, Aguascalientes, Méx. Se establecieron diez sitios de muestreo, los cuales fueron seleccionados aleatoriamente, cada sitio constó de un área de 6 metros de radio, se registraron el número de individuos y su estado de conservación (NOM-059-SEMARNAT-2010 y la Lista Roja de la UICN). Posteriormente, se calcularon los índices de diversidad con el índice de Shannon (H') para cada sitio. Se identificaron seis especies de cactáceas distribuidas entre los géneros *Ferocactus*, *Mammillaria*, *Coryphantha* y *Stenocactus*. El índice de diversidad de Shannon reveló valores moderados a altos, indicando una diversidad relativamente equilibrada en la mayoría de los sitios. Dentro del área 4 se presentó el mayor índice de diversidad del 94.6%. El área 1 presentó la mayor riqueza de especies (4 especies) pero una equidad menor, debido a la dominancia de *Mammillaria uncinata*. En las áreas 2, 3 y 4 el género predominante fue *Stenocactus* y en las áreas 5, 6 y 7 *Mammillaria*. En cuanto al estatus de conservación, *Mammillaria bombycina* y *Ferocactus histrix* se encuentran en categorías de protección especial, lo que subraya la necesidad de implementar medidas de conservación. Este estudio proporciona una línea base para futuros estudios de monitoreo, restauración ecológica y propagación, así como para el diseño de estrategias de educación ambiental. Además, resalta la importancia de conservar la biodiversidad del semidesierto de Aguascalientes, contribuyendo al conocimiento científico regional y a la conservación de las cactáceas.

**Palabras clave:** Cactáceas, conservación, biodiversidad, inventario

#### Abstract

This study aims to monitor the diversity of cacti in the municipality of Cosío, Aguascalientes, Mexico. Ten sampling sites were established, which were selected at random. Each site consisted of an area with a radius of 6 meters, and the number of individuals and their conservation status were recorded (NOM-059-SEMARNAT-2010 and the IUCN Red List). Subsequently, diversity indices were calculated using the Shannon index (H') for each site. Six species of cacti were identified, distributed among the genera *Ferocactus*, *Mammillaria*, *Coryphantha*, and *Stenocactus*. The Shannon diversity index revealed moderate to high values, indicating relatively balanced diversity at most sites. Area 4 had the highest diversity index of 94.6%. Area 1 had the greatest species richness (4 species) but lower equity, due to the dominance of *Mammillaria uncinata*. In areas 2, 3, and 4, the predominant genus was *Stenocactus*, and in areas 5, 6, and 7, it was *Mammillaria*. In terms of conservation status, *Mammillaria bombycina* and *Ferocactus histrix* are in special protection categories, which highlights the need to implement conservation measures. This study provides a baseline for future monitoring, ecological restoration, and propagation studies, as well as for the design of environmental education strategies. Furthermore, it highlights the importance of conserving the biodiversity of the Aguascalientes semi-desert, contributing to regional scientific knowledge and the conservation of cacti.

**Keywords:** Cactus plants, conservation, biodiversity.

## Introducción

La familia cactácea se distribuye principalmente en las zonas áridas y semiáridas, México es el país más importante en la diversificación y concentración de estas especies. Las cactáceas son usadas como alimento, hábitat, para fines medicinales, religiosos y de ornamento, lo cual ha provocado una fuerte disminución en sus especies, principalmente por el tráfico ilegal. De las 1400 especies existentes en el mundo, México alberga cerca del 50%, de las cuales 280 se encuentran bajo alguna categoría de riesgo en la NOM-059-SEMARNAT-2010. Las cactáceas se consideran plantas de zonas secas y es allí donde se supone que se tiene su mayor diversidad. Estas zonas áridas y semiáridas han experimentado un profundo proceso de evolución, donde las condiciones abióticas determinan la disponibilidad, distribución y abundancia de estas especies, por lo que es importante tomar medidas de protección para la conservación de estas especies. De ahí la importancia de conocer las áreas de distribución geográfica, el tamaño de las poblaciones, el estado actual del hábitat del taxón y las especies vegetales asociadas a dichos hábitats. Debido al conocimiento limitado sobre estas comunidades en el estado de Aguascalientes, el presente estudio tiene como objetivo monitorear la diversidad de cactáceas presentes en el municipio de Cosío, Aguascalientes, México y los factores que influyen en su distribución y supervivencia. (Villanueva, Navarro, & Eliosa, 2016; NOM-059-SEMARNAT-2010; Teixeira-Roth, Castro-Cepero, Ceroni-Stuva, & Eyzaguirre-Pérez, 2004; SEMARNAT).

## Materiales y métodos

### Localidad de diversidad de cactáceas

El estudio se llevó a cabo en el municipio de Cosío, ubicado al norte del Estado de Aguascalientes, México. Se reservan los puntos de muestreo con el propósito de prevenir o evitar saqueos. El municipio presenta un paisaje caracterizado por vegetación de tipo matorral xerófilo y condiciones climáticas semiáridas, con temperaturas anuales de entre 16 °C y 20 °C, precipitación anual promedio de 450-515 mm y con una altitud de 2000 metros sobre el nivel del mar.

### Procedimiento de estudio

Se realizaron recorridos de campo durante un periodo de un año. Se establecieron diez sitios de muestreo seleccionados mediante un diseño aleatorio, considerando la presencia de cactáceas alrededor. Cada sitio de muestreo consistió en un área circular de 6 m de radio, dentro de la cual se registraron todas las especies de cactáceas presentes. La identificación de las especies se realizó mediante observación de caracteres morfológicos clave, tales como forma y tamaño del tallo, disposición de costillas, características de areolas, espinas y flores o frutos en caso de estar presentes.

### Identificación de especies

Para reforzar la identificación taxonómica, se consultaron guías especializadas y bases de datos como el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad de México, así como literatura previa relacionada con cactáceas del estado de Aguascalientes. A cada especie identificada se le asignó su estatus de conservación según la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 y la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), con el fin de valorar su prioridad de protección en la región.

### Índices para determinar la diversidad

Para evaluar la diversidad de especies de cactáceas en las áreas muestreadas del municipio de Cosío, se calculó el índice de diversidad de Shannon, éste combina la riqueza de especies y la equidad de distribución de plantas, proporcionando una medida cuantitativa de la diversidad.

## Resultados

### Especies de cactáceas localizadas y su estatus de conservación

Se identificaron seis especies de cactáceas pertenecientes a cuatro géneros, que se describen a continuación:

#### *Coryphantha erecta* (Figura 1a)

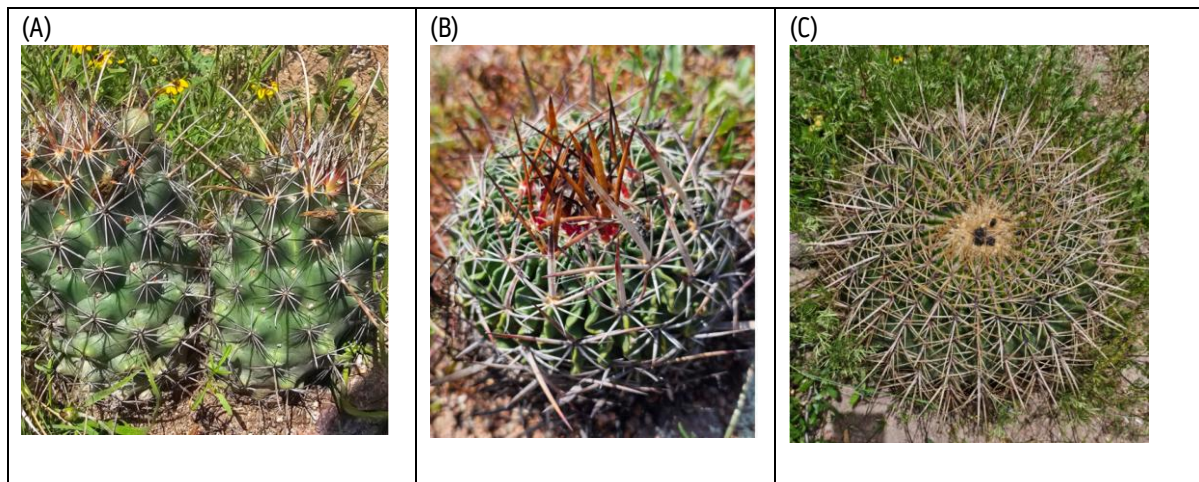
Cactácea de tallos ramificados, alcanza hasta 30 cm de altura y 20 cm de diámetro. Presenta espinas radiales blancas y centrales pardas, con flores de color amarillo durante la primavera. Distribuida principalmente en los estados de Guanajuato, Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí. No cuenta con categoría de riesgo según la NOM-05, pero figura como preocupación menor (LC) en la Lista Roja de la UICN. (NOM-059-SEMARNAT-2010; IUCN; Vázquez-Benitez)

#### *Stenocactus sp.* (Figura 1b)

Cactácea globosa, con costillas onduladas, delgadas y espinas de color ámbar a gris, con puntas rojizas. Alcanzan alrededor de 14 cm de diámetro. Comúnmente usada como planta ornamental. Sin categoría NOM-059 confirmada, pero considerada estable por estudios locales. (NOM-059-SEMARNAT-2010; IUCN).

#### *Ferocactus histrix* (Figura 1c)

Especie de tallo monopódico de gran tamaño, que puede llegar a alcanzar 1.2 m de altura y 50 cm de diámetro. Tiene espinas rígidas rojizas y flores amarillas. Es aprovechada tradicionalmente en la elaboración de acitrón. Distribuida en el centro-norte de México. Está catalogada como Sujeta a protección especial (PR) por la NOM-059-SEMARNAT-2010 y casi amenazada (NT) según la UICN. (NOM-059-SEMARNAT-2010; Rivera-Martinez & Ocampo, 2018; Jimenez-Sierra, 2011; IUCN; Meza-Rangel, 2014).



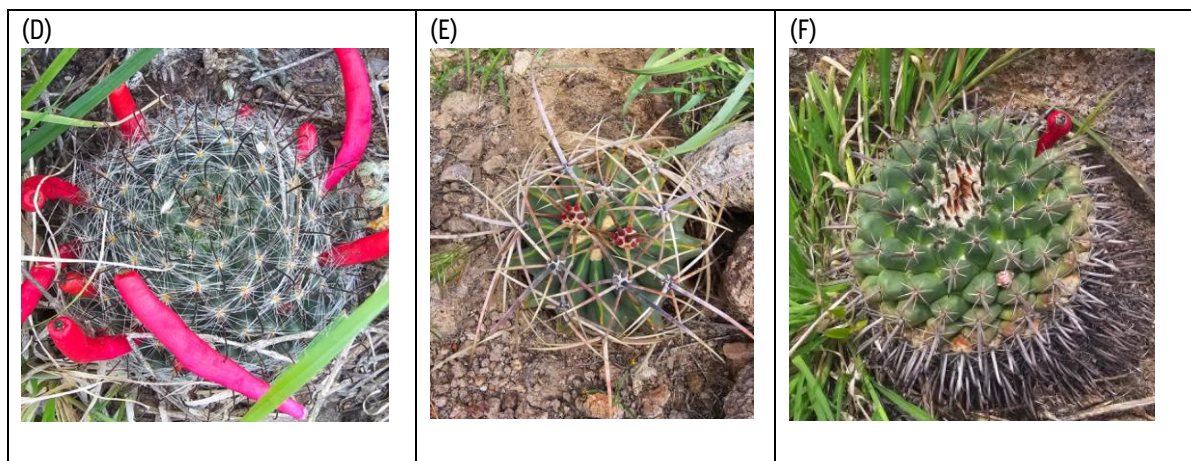


Figura 1. Especies de cactáceas: (A) *C. erecta*, (B) *Stenocactus*, (C) *F. histrix*, (D) *M. bombycina*, (E) *Ferocactus*, (F) *M. uncinata*.

*Mammillaria bombycina* (Figura 1d)

Cactácea globosa con ápices deprimidos, axilas con lana blanca, espinas radiales cortas y espinas centrales curvas de color marrón. Mide alrededor de 20 cm de altura y 6 cm de diámetro. Su distribución se concentrará en Aguascalientes y Jalisco. Se utiliza como ornamental. Tiene estatus de Protección Especial (Pr) en la NOM-059 y vulnerable (VU) según la IUCN. (NOM-059-SEMARNAT-2010; Jimenez-Sierra, 2011; IUCN; Meza-Rangel, 2014).

*Ferocactus sp.* (Figura 1e)

Individuos juveniles identificados como pertenecientes al género *Ferocactus*, de forma globosa, con costillas prominentes y espinas largas de color marrón en las puntas. Debido a su estado de desarrollo, no se logró determinar la especie con certeza, recomendándose un seguimiento posterior para su identificación definitiva. (Jimenez-Sierra, 2011; NOM-059-SEMARNAT-2010; IUCN).

*Mammillaria uncinata* (Figura 1f)

Especie globosa o ligeramente cilíndrica, color verde oscuro, con ápice hundido, areolas con lana blanca y espinas centrales ganchudas. Se distribuye en regiones del centro y suroeste de México. Usada ocasionalmente como ornamental y comestible. Sin categoría de riesgo NOM-059, pero registrada como de Preocupación Menor (LC) en la IUCN. (Jimenez-Sierra, 2011) (NOM-059-SEMARNAT-2010; IUCN)

Durante los recorridos de campo, se identificó una baja cantidad de cactáceas con frutos, lo cual podría estar relacionado con el ciclo reproductivo característico de las plantas. La mayoría de las cactáceas florecen una sola vez al año, en las estaciones de primavera y verano, cuando las condiciones climáticas son más favorables para su reproducción. Posteriormente la formación y maduración de los frutos ocurre entre los meses de mayo y agosto, aunque este período puede variar según la especie y las condiciones ambientales específicas del lugar. Los frutos obtenidos pertenecen a cuatro especies identificadas: *Mammillaria uncinata*, *Mammillaria bombycina*, *Ferocactus histrix* y *Coryphantha erecta*, como se muestran en la Figura 2. (Granados-Sánchez, 2013; Saucedo-Reta, 2018).

### Frecuencia de presencia de cactáceas

En el Cuadro 1 se muestran las especies de cactáceas presentes dentro de las áreas de muestreo; se registraron las seis especies, siendo *M. uncinata*, la más frecuente, presente en nueve áreas. Las áreas 3 y 4 presentaron la mayor riqueza específica, con hasta seis especies, mientras que las áreas 7 y 10 presentaron una especie. *F. histrix* y *Stenocactus también* tuvieron amplia distribución al encontrarse en la mayoría de las áreas, mientras que *C. erecta* y *Ferocactus* spp. fueron menos comunes, registrándose únicamente en algunas zonas específicas.

La riqueza y diversidad de cactáceas en las áreas muestreadas se resumen en el Cuadro 2, donde se observó una población variante desde 9 y 79 individuos y el número de especies osciló de 1 a 6. Los índices de Shannon H' fueron más altos en las áreas 2, 3 y 4 con valores entre 1.1017 - 1.5012, lo que indica una distribución más equitativa de los individuos entre las especies y una menor dominancia de alguna especie en particular. Las áreas 8 y 9 presentaron baja riqueza, solo 2 especies. En contraste, las áreas 7 y 10, con una sola especie, mostraron diversidad prácticamente nula.

La Figura 1 complementa los resultados del Cuadro 2, mostrando de manera visual la variación de la diversidad de Shannon y el porcentaje relativo de equidad en los diez sitios. Se observó un mayor nivel de diversidad en las áreas 4 y 1, lo que indica mayor diversidad y una distribución relativamente equilibrada de individuos entre varias especies, mientras que la equidad relativa es más alta en las áreas 8 y 9, sugiriendo que aunque el número de especies es menor, la abundancia de los individuos presentes está distribuida de manera más uniforme, sin predominio marcado de ninguna especie.

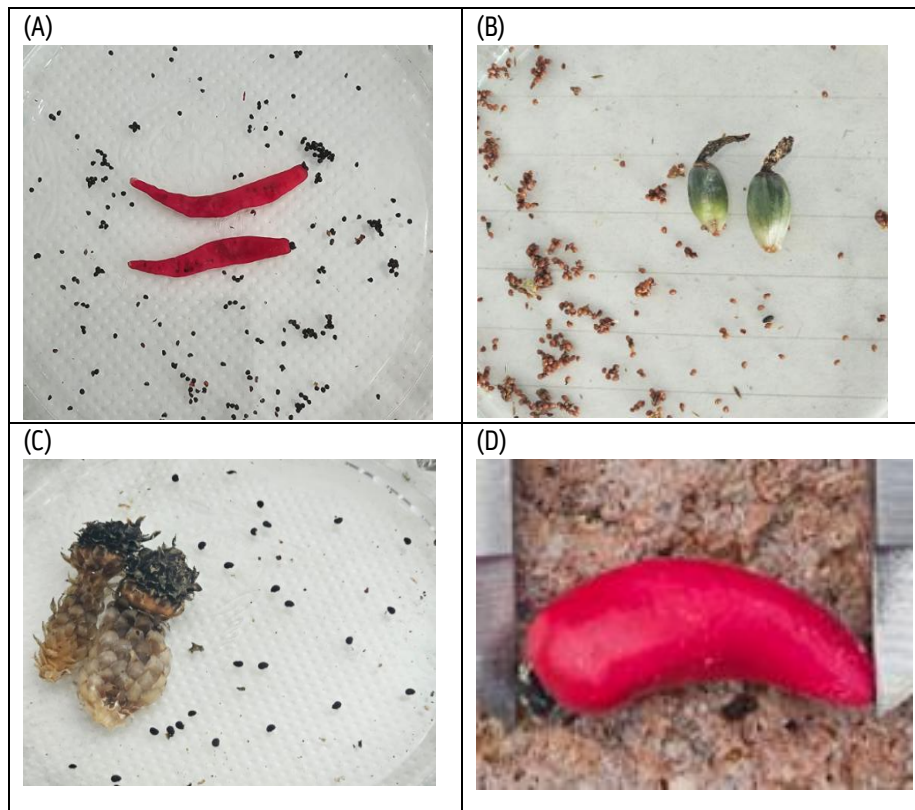


Figura 2. Frutos y semillas de las siguientes especies: (A) *M. bombycina*, (B) *C. erecta*, (C) *F. histrix* y (D) *M. uncinata*.

Cuadro 1. Grado de presencia de especies de cactáceas registradas en las áreas de muestreo de Cosío, Aguascalientes, Méx.

Área	<i>M. uncinata</i>	<i>M. bombycina</i>	<i>C. erecta</i>	<i>F. histrix</i>	<i>Stenocactus</i>	<i>Ferocactus</i>	Total de especies
1	✓	✓		✓		✓	4
2	✓	✓		✓	✓		4
3	✓	✓	✓	✓	✓		5
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	6
5	✓	✓					2
6	✓				✓		2
7	✓						1
8	✓				✓		2
9	✓				✓		2
10				✓		✓	1

En las áreas de muestreo, las cactáceas se encontraron asociadas principalmente con especies de vegetación arbustiva y arbórea característica de zonas semiáridas. Entre ellas destacan *Opuntia spp.*, *Yucca spp.*, *Helianthus spp.*, *Jatropha spp.* y *Vachellia farnesiana* (huizache). Asimismo, se observaron asociaciones con otras especies frecuentes en matorral xerófilo como mezquites, *Larrea tridentata*, *Dasyliion spp.*, y *Agave spp.* La presencia de estas especies acompañantes sugiere que las cactáceas comparten hábitats con comunidades vegetales adaptadas a condiciones de aridez, lo que favorece microambientes que influyen en su establecimiento y conservación.

Cuadro 2. Índice de diversidad de Shannon en áreas muestreadas del municipio de Cosío, Aguascalientes.

Área	Total de plantas	Nº especies (S)	H' (Shannon)	Hmax	% H'/Hmax
1	33	4	0.9743	1.3863	70.28%
2	40	4	1.1017	1.3863	79.47%
3	54	5	1.1471	1.6094	71.27%
4	79	6	1.5012	1.7918	83.78%
5	23	2	0.2954	0.6931	42.62%
6	30	2	0.3927	0.6931	56.65%
7	17	1	~0.0000	0.0000	—
8	10	2	0.6109	0.6931	88.13%
9	11	2	0.6555	0.6931	94.57%
10	9	1	~0.0000	0.0000	—

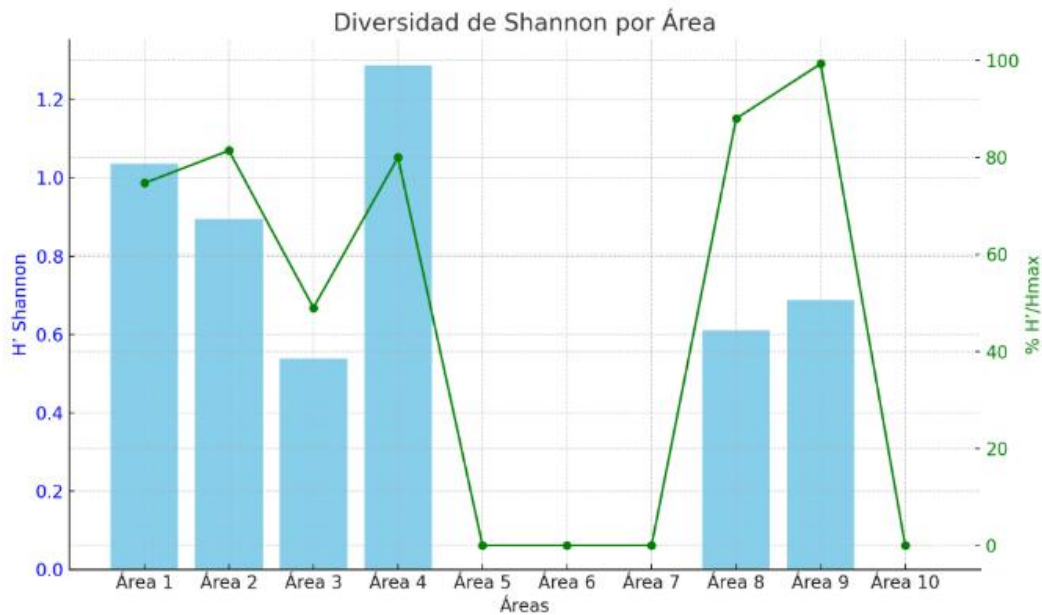


Figura 1. Diversidad de Shannon por cada área (H') y equidad relativa (% H'/Hmax) por área de muestreo.

### Discusión

El inventario realizado en el municipio de Cosío permitió identificar seis especies de cactáceas, algunas de ellas con categorías de protección según la NOM-059-SEMARNAT-2010 y la Lista Roja de la UICN. Este hallazgo resulta relevante dado que la región de estudio carecía de registros actualizados sobre la diversidad y distribución de estas especies. La presencia de *Mammillaria bombycina* y *Ferocactus histrix*, ambas bajo estatus de protección especial, resalta la importancia de implementar acciones prioritarias de conservación de área, considerando las presiones derivadas del cambio de uso de suelo, la colecta ilegal o el sobrepastoreo. Asimismo, especies como *Mammillaria uncinata* y *Coryphantha erecta*, aunque con menor grado de amenaza, podrían sufrir riesgos a mediano plazo si no se mantienen monitoreos continuos de sus poblaciones. Las especies encontradas coinciden con registros previos dentro del estado como Meza-Rangel *et al.* (2014) y Ocampo (2018), pero este estudio aporta información nueva sobre su localización específica dentro del municipio de Cosío.

Además, los resultados de este inventario representan una línea base esencial para orientar programas de restauración y manejo sostenible de las comunidades vegetales del municipio, así como para impulsar acciones de educación ambiental dirigidas a sensibilizar a la población local sobre la importancia de conservar estos recursos.

### Conclusiones

Se recomienda continuar con esfuerzos de investigación que profundicen en aspectos reproductivos, genéticos y ecológicos de estas especies, a fin de fortalecer su conservación integral y mantener la riqueza biológica del semidesierto hidrocálido. Asimismo, se destaca la necesidad de articular estas iniciativas orientadas a la protección de la flora nativa, así como de fomentar la participación activa de las comunidades rurales en la vigilancia y manejo sostenible de las poblaciones de cactáceas. Promover alternativas de aprovechamiento sustentable, como viveros comunitarios o proyectos de ecoturismo, podría generar beneficios sociales y económicos adicionales.

## Referencias

- Granados-Sánchez, D. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. Chapingo Serie Ciencias Forestales y de Ambiente.
- IUCN, L. R. (s.f.). <https://www.iucnredlist.org/es>.
- Jiménez-Sierra, C. (2011). Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan. Revista Digital Universitaria.
- Meza-Rangel, E. (2014). Distribución actual y potencial de las cactáceas *Ferocactus histrix*, *Mammillaria bombycina* y *M. perezdelarosae* en el estado de Aguascalientes, México. *Ácta botánica*.
- NOM-059-SEMARNAT-2010. (s.f.). Protección ambiental - Especies nativas de México de flora y fauna silvestres - Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio - Lista de especies en riesgo.
- Rivera-Martinez, R., & Ocampo, G. (2018). La familia cactácea en el área natural protegida monumento natural Cerro del Muerto, Aguascalientes, México. *Investigación y Ciencia*.
- Saucedo-Reta, L. (2018). Evaluación de la sobrevivencia y diversidad de cactáceas trasplantadas en dos ecosistemas de matorral desértico. Tesis de maestría.
- SEMARNAT. (<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/cactaceas-riqueza-natural-de-mexico>). Cactáceas, riqueza natural de México.
- Teixeira-Roth, V., Castro-Cepero, V., Ceroni-Stuva, A., & Eyzaguirre-Pérez, R. (2004). Diversidad y densidad de la comunidad de cactáceas en el cerro Umarcata y quebrada Orobél en el valle del río Chillón (Lima) y su relación con los factores edáficos. *Ecología Aplicada*.
- Vázquez-Benítez, B. (s.f.). Variación morfológica de *Coryphantha* (cactaceae): un enfoque multivariado. *Acta botánica*, -.
- Villanueva, R. M., Navarro, M. C., & Eliosa, H. (2016). Germinación de tres especies de cactáceas endémicas de México en condiciones asépticas. *Zonas Áridas*, 1-16.

## SECCION: INNOVACION AGROTECNOLOGICA



**VARIABILIDAD DE LA CE, pH Y MINERALES EN DIFERENTES COMPOSTAS ORGÁNICAS DE BAGAZO DE AGAVE**

[VARIABILITY OF CE, PH, AND MINERALS IN DIFFERENT AGAVE BAGASSE ORGANIC COMPOSTS]

Edson Jordy Amador-Santiago<sup>1\*</sup>, José Cruz Carrillo-Rodríguez<sup>1</sup>, José Luis Chávez-Servia<sup>2</sup>, Gisela Virginia Campos-Ángeles<sup>1</sup>, Catarino Perales-Segovia<sup>3</sup>

<sup>1</sup>TecNM, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO). Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233. <sup>2</sup>Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-IPN) Unidad Oaxaca, Hornos # 1003. 71230, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. <sup>3</sup>TecNM- Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes. Km 18, carretera Aguascalientes-San Luis Potosí, El Llano, México. C.P. 20330.

\*Autor de correspondencia: amadoredson0@gmail.com

ORCID:0009-0004-7440-2456

**Resumen**

El presente estudio tuvo como objetivo analizar la variabilidad fisicoquímica de compostas orgánicas formuladas a partir de bagazo de agave, subproducto lignocelulósico generado en la industria mezcalera del estado de Oaxaca. Debido a su lenta degradación, se incorporaron materiales complementarios como estiércol bovino, gallinaza, vinazas y cascarilla de arroz, a fin de optimizar su calidad como enmienda orgánica. Se establecieron cinco tratamientos experimentales bajo condiciones de invernadero en el Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO), sometidos a un proceso de compostaje aeróbico con duración de 30 días. Posteriormente se determinaron los análisis de pH, conductividad eléctrica (CE), macro y micronutrientes, así como el contenido de materia orgánica. Los resultados indicaron una CE superior a los valores de referencia ( $4.4\text{--}5.5\text{ dS m}^{-1}$ ), tendencia alcalina del pH ( $7.51\text{--}8.16$ ), deficiencias en nitrógeno ( $0.95\text{--}1.61\text{ meq L}^{-1}$ ) y fósforo ( $0.55\text{--}0.90\text{ meq L}^{-1}$ ), y concentraciones elevadas de potasio y sodio. El calcio y magnesio, se mantuvieron en rangos adecuados, mientras que el cobre fue el único microelemento que superó los límites normativos. El contenido de materia orgánica fue elevado ( $57.6\text{--}61.4\%$ ). En conclusión, el bagazo de agave tiene potencial como componente composteable, pero un periodo de compostaje de 30 días resultó insuficiente para estabilizar el material. Se recomienda prolongar el proceso y ajustar la formulación para mejorar el equilibrio nutricional y la madurez de las compostas.

**Abstract**

The objective of this study was to analyze the physicochemical variability of organic composts formulated from agave bagasse, a lignocellulosic by-product generated in the mezcal industry in the state of Oaxaca. Due to its slow degradation, complementary materials such as cattle manure, chicken manure, vinasse, and rice husks were incorporated in order to optimize its quality as an organic amendment. Five experimental treatments were established under greenhouse conditions at the Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO), subjected to a 30-day aerobic composting process. Subsequently, analyses of pH, electrical conductivity (EC), macro- and micronutrients, and organic matter content were determined. The results indicated an EC higher than the reference values ( $4.4\text{--}5.5\text{ dS m}^{-1}$ ), an alkaline pH ( $7.51\text{--}8.16$ ), deficiencies in nitrogen ( $0.95\text{--}1.61\text{ meq L}^{-1}$ ) and phosphorus ( $0.55\text{--}0.90\text{ meq L}^{-1}$ ), and high concentrations of potassium and sodium. Calcium and magnesium remained within adequate ranges, while copper was the only microelement that exceeded regulatory limits. The organic matter content was high ( $57.6\text{--}61.4\%$ ). In conclusion, agave bagasse has potential as a compostable component, but a 30-day composting period was insufficient to stabilize the material. It is recommended to prolong the process and adjust the formulation to improve the nutritional balance and maturity of the composts.

## Introducción

La utilización de compostas orgánicas representa una alternativa viable en sistemas de producción agroecológica, dado su potencial para aportar nutrientes esenciales y mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo (Alvarenga et al., 2015; Fan et al., 2023). Asimismo, el compostaje ha sido reconocido como un método eficiente para la valorización de residuos agroindustriales (Jara-Samaniego *et al.*, 2017), entre los que destaca el bagazo de agave (BA), residuo lignocelulósico generado en grandes cantidades durante la producción de mezcal. En el estado de Oaxaca, principal productor mezcalero a nivel nacional, se estima una generación de 5 a 6 kg de BA por cada litro de mezcal (Enríquez del Valle et al., 2024), cuya disposición inadecuada ha generado afectaciones en cuerpos de agua, suelos y ecosistemas circundantes (Gómez-Vargas *et al.*, 2024). Debido a su alta recalcitrancia estructural (Ordaz Díaz *et al.*, 2019), el aprovechamiento del BA mediante compostaje presenta limitantes asociadas a su lenta tasa de descomposición, desbalances trimestrales y valores de pH fuera del rango óptimo agrícola (Crespo-Gonzales *et al.*, 2018; Méndez-Matías *et al.*, 2018; Mendoza-Rossano *et al.*, 2023). Por lo anterior, se plantea la necesidad de integrar materiales co-compostantes como estiércol, gallinaza, vinazas y cascarilla de arroz que permitan regular los parámetros fisicoquímicos y favorecer una descomposición acelerada. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el comportamiento de compostas orgánicas formuladas a partir de BA y materiales regionales, analizando variables como la conductividad eléctrica, pH, contenido de macro y microelementos, y porcentaje de materia orgánica, durante un periodo de compostaje aeróbico de 30 días bajo condiciones de invernadero.

## Materiales y métodos

### Lugar del experimento

Ubicación del experimento: El experimento se llevó a cabo en un invernadero del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO), situado en la Hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. Geográficamente, la ubicación corresponde a las coordenadas 17°01'10.42" N y 96°45'52.32" O, con una altitud de 1561 m sobre el nivel del mar.

### Elaboración de compostas

Proceso de elaboración de compostas orgánicas de bagazo de agave: Las compostas orgánicas de bagazo de agave (COB) se formularon utilizando bagazo de agave (BA) proveniente de la especie *Agave angustifolia*, recolectado en la localidad de Teotitlán del Valle, Oaxaca. Se recolectaron dos tipos de bagazo en función del tiempo transcurrido desde que fueron desechados: uno con un mes de descomposición (BA-1M) y otro con seis meses (BA-6M).

### Combinación de compostas

En la fase inicial del estudio, se diseñó una composta orgánica básica utilizando como componente principal bagazo de agave, complementado con materiales de origen local para mejorar sus propiedades fisicoquímicas y acelerar su descomposición. La formulación consistió en una mezcla de 4 botes de 19 litros de bagazo de agave, 1 bote de estiércol bovino, 1 bote de gallinaza, 1 bote de hojarasca, 1 bote de viruta de madera, además de 1.5 kg de harina de leonardita, 1.5 kg de harina de roca fosfórica y 2 kg de tallo de plátano. A esta mezcla se incorporó un bote de microorganismos de montaña (MM), en presentación líquida y sólida, cuya preparación se llevó a cabo mediante fermentación anaeróbica durante 30 días, utilizando hojarasca de bosque y viruta de madera humedecidas con agua de melaza, conforme a los protocolos metodológicos descritos por Tencio, (2015) y Rodríguez-Calampa *et al.*, (2023). Esta formulación buscó establecer una base homogénea para el compostaje, ajustando proporciones y materiales que favorecieran una mineralización eficiente del bagazo.

### *Establecimiento del experimento*

A partir de la composta orgánica básica formulada con bagazo de agave y materiales regionales, se establecieron cinco tratamientos experimentales de compostas orgánicas de bagazo de agave (COB) con el objetivo de evaluar su

comportamiento fisicoquímico. La COB-1 consistió en bagazo de agave con un mes de descomposición (BA- 1M); la COB-2 utilizó bagazo con seis meses de descomposición (BA-6M); la COB-3 incorporó BA-1M con vinazas mezcleras (VM) como agente humectante; la COB-4 combinó BA-1M con cascarilla de arroz (19 L); y la COB-5 integró BA-1M, cascarilla de arroz y VM. Todas las formulaciones fueron elaboradas bajo un esquema de compostaje aeróbico en camas de madera de aproximadamente 1 m<sup>2</sup>, sometidas a volteo manual cada 3 días durante un periodo de 30 días. La descripción específica de los tratamientos se presenta en el Cuadro 1.

### Parámetros del análisis químico de las compostas orgánicas de bagazo de agave

Los análisis de laboratorio se realizaron conforme a la norma NMX-EC-17025-IMNC-2018 (ISO/IEC 17025:2017), bajo los estándares de competencia técnica establecidos por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA). Específicamente, el pH y la conductividad eléctrica (CE) se determinaron mediante potenciometría. La cuantificación del nitrógeno total se efectuó mediante el método Kjeldahl, mientras que los macro y micronutrientes fueron analizados por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Finalmente, el contenido de materia orgánica y cenizas se determinó mediante el método de calcinación.

Cuadro 1. Composición de las diferentes compostas orgánicas de bagazo de agave (COB).

Descripción	
COB-1	Composta orgánica básica con BA-1M
COB-2	Composta orgánica básica con BA-6M
COB-3	Composta orgánica básica con BA-1M y VM
COB-4	Composta orgánica básica con BA-1M, cascarilla de arroz
COB-5	Composta orgánica básica con BA-1M, cascarilla de arroz y VM

## Resultados y discusión

### Análisis de suelos

Una vez finalizado el periodo de compostaje aeróbico de 30 días, se procedió al análisis químico de las compostas orgánicas de bagazo de agave (COB), con el propósito de caracterizar su calidad nutrimental y valorar su posible aplicación agronómica. Las determinaciones incluyeron conductividad eléctrica (CE), pH, contenido de macro y microelementos, así como porcentaje de materia orgánica (MO). La CE y el pH fueron considerados como indicadores del grado de estabilización del material compostado, así como de la acumulación de sales solubles generadas durante el proceso. Por su parte, las concentraciones de macro y micronutrientes reflejan la disponibilidad potencial de nutrimentos para las plantas, mientras que el contenido de MO permite inferir la capacidad de la composta para mejorar las condiciones físico-biológicas del suelo y promover la actividad microbiana. A continuación, se presenta el comportamiento comparativo de cada uno de los parámetros evaluados, destacando las diferencias observadas entre tratamientos y su implicación en términos de fertilidad y estabilidad del producto final.

### Comportamiento de la CE

La CE de las COB presentó un comportamiento relativamente homogéneo entre tratamientos (Figura 1), con valores que oscilaron entre 4.4 y 5.5 mS cm<sup>-1</sup>, superando el intervalo óptimo sugerido por diversos autores (Millán *et al.*, 2018; Caballeros-Salinas *et al.*, 2021), el cual se sitúa entre 2 y 4 mS cm<sup>-1</sup>. Este exceso de sales solubles, puede comprometer la disponibilidad y absorción de nutrientes esenciales por parte de las plantas, además de inducir estrés osmótico y acumulación de micronutrientes en niveles fitotóxicos (Muñoz-Villalobos *et al.*, 2023; Gutiérrez-González *et al.*, 2024). Cabe señalar que, se observó un incremento notable de la CE en los tratamientos COB-3 y COB-4, donde se incorporaron VM y cascarilla de arroz, respectivamente. Las VM han sido reportadas como insumos con alta carga salina (Robles-González *et al.*, 2018; Zelaya-Benavidez *et al.*, 2021), esto, podría explicar su influencia en el aumento de la

conductividad. Aunado a la acumulación de sodio registrada en estas formulaciones, además de la actividad microbiana intensa durante el proceso de compostaje, habría favorecido la mineralización de compuestos orgánicos y, por ende, el aumento en la CE (Chan *et al.*, 2016). Adicionalmente, la inclusión de gallinaza como co-compostante pudo haber contribuido a este comportamiento, porque investigaciones como la de Reyes-Hernández *et al.* (2023) indican una CE promedio de  $5.6 \text{ mS cm}^{-1}$ , considerándose como una fuente relevante de sales minerales.

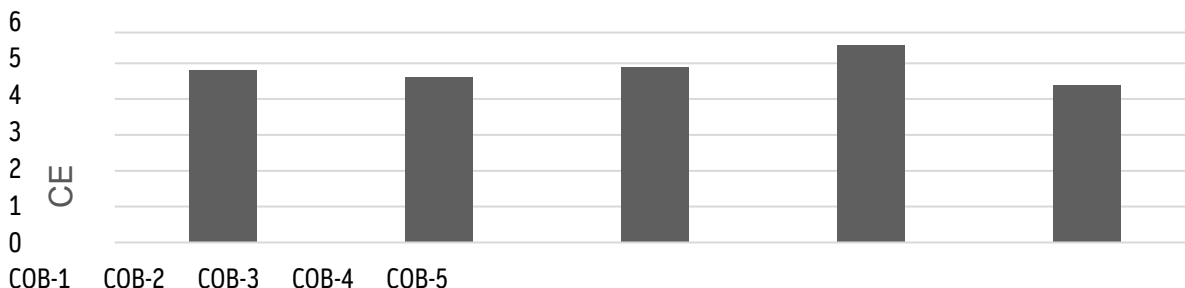


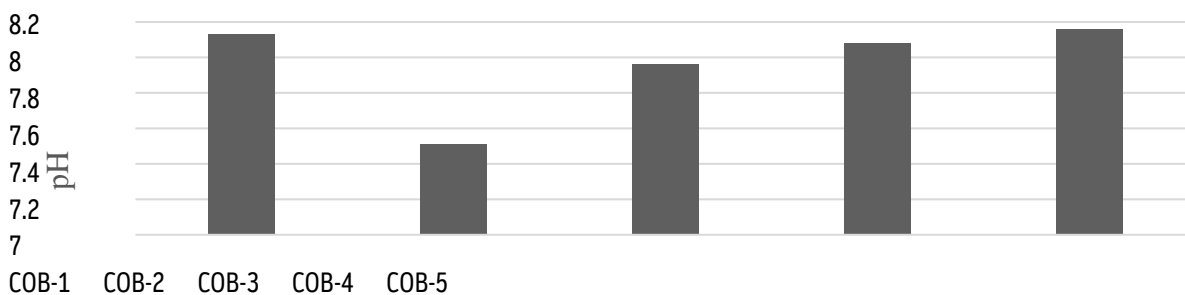
Figura 1: Comportamiento de CE en compostas orgánicas de bagazo de agave.

### Comportamiento de pH

Las compostas orgánicas de bagazo de agave (COB) evidenció variaciones moderadas entre tratamientos, con valores que oscilan entre 7.51 y 8.16, tal como se muestra en la Figura 2. Aunque, estos niveles superaron el intervalo óptimo de 6.0 a 7.5 establecido por Ji *et al.*, (2023) para enmiendas orgánicas. Un pH fuera del dicho intervalo puede generar procesos de alcalinización o acidificación, condicionando la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular de los cultivos (Ortiz Argueta *et al.*, 2020). La composición de las mezclas tuvo un efecto determinante sobre este parámetro. Particularmente, en COB-2 y COB-3, la inclusión de bagazo con seis meses de descomposición (BA-6M) y vinazas mezcaleras (VM), respectivamente, favoreció valores más cercanos a la neutralidad. Ello puede atribuirse al carácter ácido de ambos insumos, cuyo pH ha sido reportado entre 3 y 4, contribuyendo a amortiguar la tendencia alcalina del bagazo fresco (Rosas-Martínez *et al.*, 2021).

Por otra parte, los métodos empleados durante el compostaje, como la frecuencia de volteos, influyeron en la evolución del pH. La aireación inducida por estas prácticas promueve la actividad microbiana aeróbica, lo que facilita la descomposición de ácidos orgánicos volátiles y contribuye al aumento del pH durante la fase termófila del compostaje (Íñiguez *et al.*, 2011). Estos resultados subrayan la importancia de formular mezclas equilibradas y aplicar técnicas de manejo adecuadas para obtener compostas más estables y competentes para el uso agrícola.

Figura 2: Comportamiento del pH en compostas orgánicas de bagazo de agave.



### Contenido de Nitrógeno (N)

El análisis del contenido de nitrógeno (N) en las COB reveló concentraciones que oscilaron entre 0.95 y 1.61 meq L<sup>-1</sup> (Figura 3), por debajo de los valores recomendados para compostas con alto valor agronómico, aun cuando se incorporaron materiales nitrogenados como estiércol bovino y gallinaza (Reyes- Hernández *et al.*, 2023). Las formulaciones COB-1 y COB-3 destacaron con las concentraciones más elevadas, atribuidas al uso de bagazo de agave con un mes de descomposición (BA-1M) y a la adición de VM, las cuales contienen hasta 1.5 mg L<sup>-1</sup> de nitrógeno, según, lo reportado por Zelaya-Benavidez *et al.* (2021). En contraste, COB-2 formulada con BA-6M registró los niveles más bajos del nutriente, lo cual sugiere una pérdida significativa durante el almacenamiento prolongado, probablemente asociada a procesos de mineralización y volatilización. Entre los factores que podrían explicar la baja disponibilidad de N se encuentran la desnitrificación favorecida por condiciones de humedad excesiva y la actividad microbiana intensa derivada de la aplicación de MM durante la fase termófila del compostaje (Tortosa, 2018; Gutiérrez-González *et al.*, 2024). Este escenario, sumado a un pH alcalino y temperaturas elevadas, propicia la volatilización del amoníaco (NH<sub>3</sub>), principal vía de pérdida gaseosa del nitrógeno (Ballesteros-Trujillo *et al.*, 2018).

El manejo adecuado de los parámetros operativos, particularmente el control del pH en un rango de 6.0–7.5 y el mantenimiento de condiciones térmicas (<50 °C) y de humedad (50–60 %) óptimas, puede minimizar la conversión de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) a amoníaco (NH<sub>3</sub>), aumentando así la retención del nitrógeno en forma asimilable. Estas prácticas resultan fundamentales para mejorar la eficiencia del compostaje y potenciar la calidad final del fertilizante (Delgado-Arroyo *et al.*, 2019).

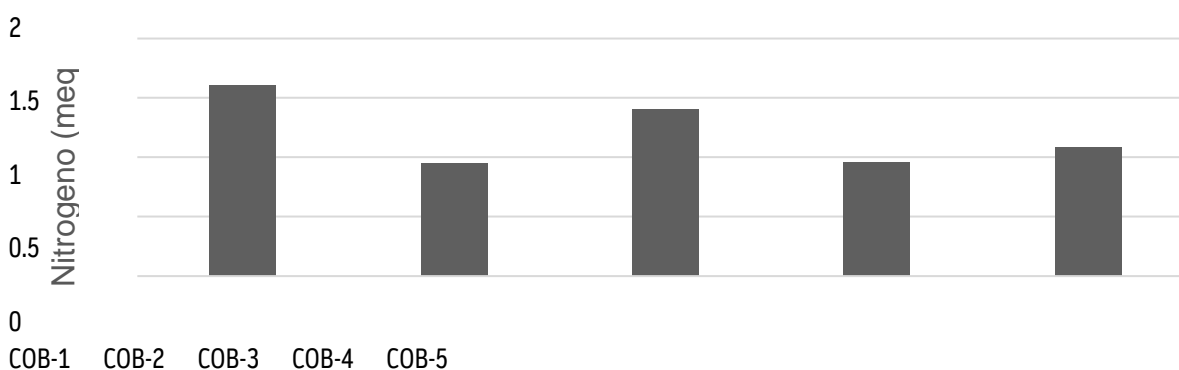


Figura 3. Comportamiento de nitrógeno en compostas orgánicas de bagazo de agave.

### Contenido de Fósforo (P)

Las concentraciones de fósforo registradas en las COB oscilan entre 0.59 y 0.90 meq L<sup>-1</sup> (Figura 4), niveles inferiores a los establecidos como óptimos para compostas con potencial fertilizante. Esta baja disponibilidad puede explicarse por diversos factores, entre los que destacan la inmovilización microbiana, lixiviación, volatilización, y especialmente la precipitación de fosfatos en condiciones alcalinas, ya que se observó una tendencia descendente del fósforo en aquellas COB con mayor pH (Figura 2). La incorporación de enmiendas ricas en fósforo, como gallinaza, harina fosfórica y biosólidos agrícolas, son determinantes para la presencia de este nutriente en el producto final (Delgadillo-Ruiz *et al.*, 2015; Reyes-Hernández *et al.*, 2023). En este sentido, la disponibilidad también depende de los mecanismos biológicos que lo liberan durante el compostaje, microorganismos mesófilos como bacterias, hongos y actinomicetos, particularmente aquellos introducidos mediante MM contribuyen a la solubilización del fósforo mediante la secreción de ácidos orgánicos y enzimas fosfatasa (Zuluaga *et al.*, 2021; Alori *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2018). Estos procesos biológicos resultan esenciales para contrarrestar las limitaciones derivadas del pH y mejorar el valor agronómico de las compostas.

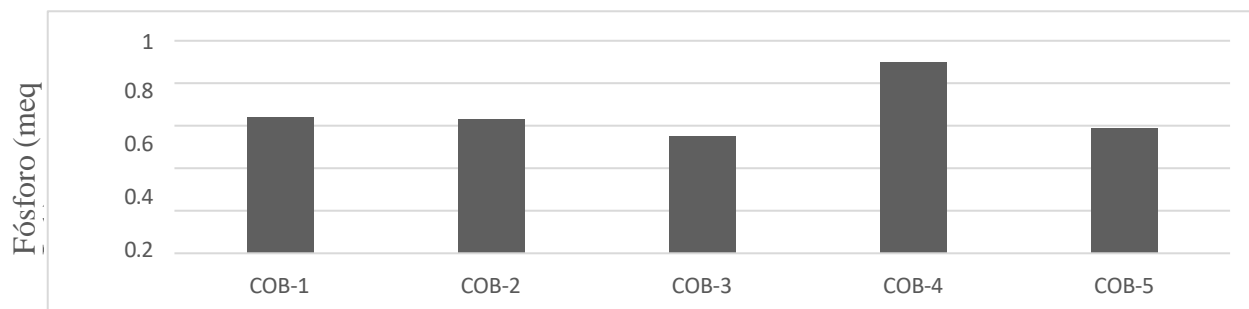


Figura 4: Comportamiento de P en compostas orgánicas de bagazo de agave.

#### Contenido de Potasio (K)

Las COB mostraron una elevada disponibilidad de potasio (K), con concentraciones que oscilan entre 28.2 y 38.4 meq L<sup>-1</sup> (Figura 5), superando ampliamente los niveles mínimos requeridos para este elemento en productos composteados. Esta riqueza potásica se relaciona directamente con la incorporación de insumos como gallinaza, reconocida por su alto contenido de K (Reyes-Hernández *et al.*, 2023), así como con la adición de bagazo de agave y tallo de plátano, residuos orgánicos que también aportan cantidades relevantes de este elemento (Delgadillo-Ruíz *et al.*, 2015). Destaca el tratamiento COB-4, que alcanzó la mayor concentración registrada (38.4 meq L<sup>-1</sup>), atribuida a la inclusión de cascarilla de arroz, una enmienda estructural ampliamente documentada como fuente significativa de potasio en procesos de compostaje (Monsalve Camacho *et al.*, 2021). Además de su valor nutricional, investigaciones recientes han evidenciado que la concentración de potasio durante el composteo puede influir en la dinámica térmica del proceso, afectando la duración de la fase de maduración y, por ende, la calidad del compost final (Huo *et al.*, 2023). Este hallazgo confirma la importancia de monitorear y equilibrar los contenidos de K no solo por su efecto en la fertilidad del producto, sino también por su incidencia en la eficiencia del proceso de compostaje.

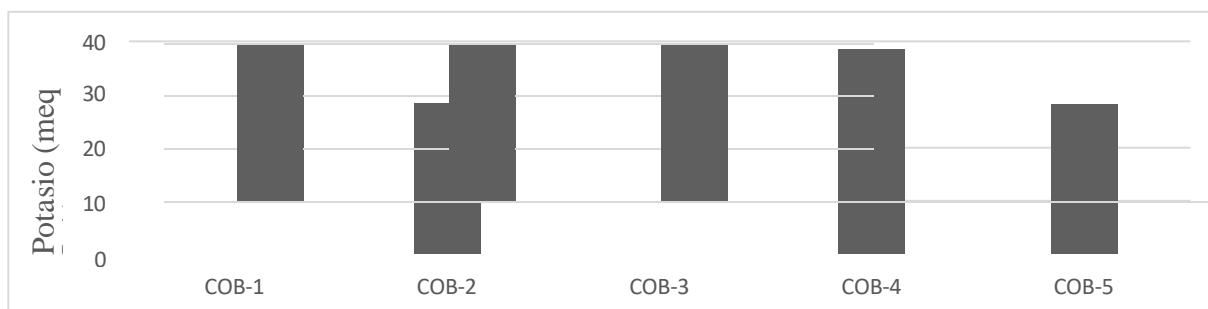


Figura 5: Comportamiento de K en compostas orgánicas de bagazo de agave.

#### Contenido de Sodio (Na)

El contenido de sodio (Na) en las COB presentó concentraciones elevadas, con un rango de 6.61 a 11.1 meq L<sup>-1</sup> (Figura 6), superando los niveles recomendados para compostas de uso agrícola. Esta acumulación se asocia estrechamente con la presencia de estiércol bovino y gallinaza en la formulación, insumos previamente identificados como fuentes relevantes de sodio (Reyes-Hernández *et al.*, 2023). La elevada concentración de Na puede inducir condiciones salinas o sódicas en las compostas, afectando la disponibilidad y absorción de nutrientes esenciales, como potasio (K) y fósforo (P), lo cual repercute negativamente en la fertilidad del material y en la productividad del cultivo (Yang *et al.*, 2021). Desde una perspectiva microbiológica, estos niveles de sodio también pueden impactar la diversidad y actividad de microorganismos descomponedores, alterando los procesos de mineralización y degradación de la materia orgánica (Rath & Rousk, 2015). Esta perturbación del microbioma compostado limita la eficiencia del proceso y puede derivar

en compostas inmaduras o inestables, con implicaciones agronómicas adversas. En este sentido, la gestión del contenido de Na y su monitoreo constante son aspectos clave para mejorar la calidad final del producto orgánico.

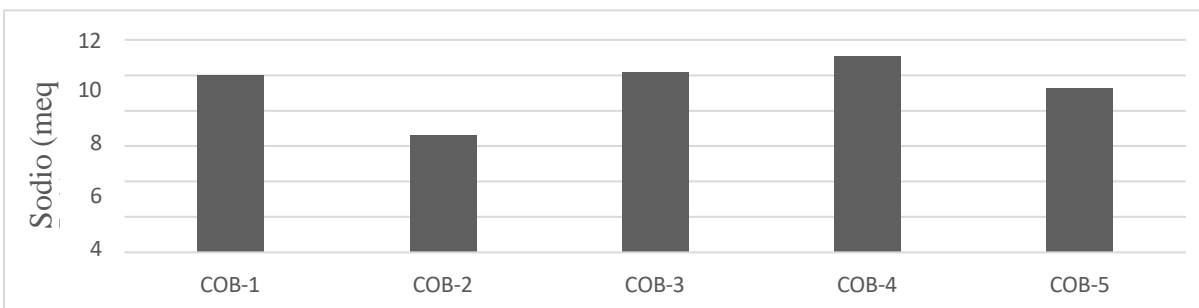


Figura 6: Comportamiento de sodio en compostas orgánicas de bagazo de agave.

### Contenido de Calcio (Ca)

El contenido de calcio en las COB presentó un rango de 4.12 a 6.19 meq L<sup>-1</sup> (Figura 7), considerado como un nivel moderado desde el punto de vista agronómico. Esta disponibilidad se asocia principalmente con la incorporación de estiércol bovino, identificado como una fuente significativa de Ca en sistemas de fertilización orgánica (Reyes-Hernández *et al.*, 2023), así como con la adición de gallinaza y hojarasca, ambos con capacidad de enriquecer el compost en este mineral. A su vez, el bagazo de agave componente dominante en las COB presenta un contenido intrínseco importante de calcio, según lo reportado por Delgadillo-Ruiz *et al.* (2015).

Durante el proceso de compostaje, el calcio tiende a concentrarse como parte del proceso de maduración, por lo que su presencia en niveles moderados podría reflejar una etapa de descomposición aún en desarrollo (Moretti *et al.*, 2015). Por otra parte, debido a su carácter alcalinizante, el Ca posiblemente contribuyó a los valores de pH relativamente elevados observados en todas las formulaciones (Figura 2), actuando como un factor modulador del equilibrio ácido-base de la composta.

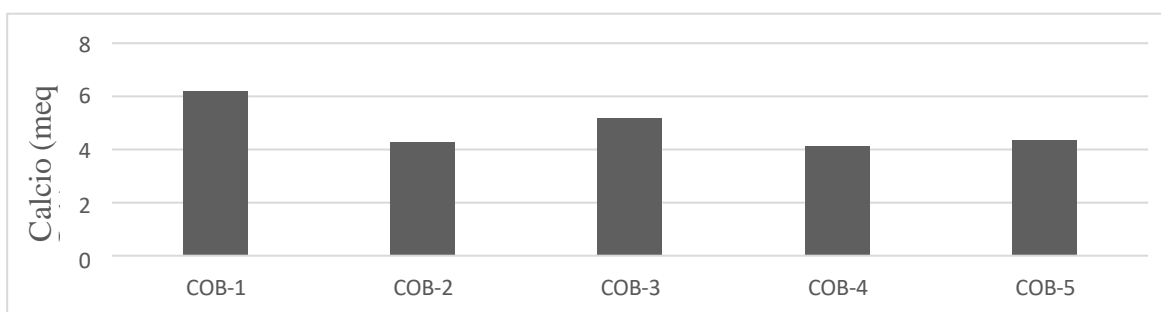


Figura 7: Comportamiento de calcio en compostas orgánicas de bagazo de agave.

### Contenido de Magnesio (Mg)

Las concentraciones de magnesio en las COB estuvieron entre 3.81 y 4.40 meq L<sup>-1</sup> (Figura 8), reflejando una alta disponibilidad de este macronutriente en las formulaciones evaluadas. Este comportamiento está estrechamente vinculado con la inclusión de estiércol bovino, gallinaza y bagazo de agave, insumos identificados como fuentes relevantes de Mg (Delgadillo-Ruiz *et al.*, 2015; Reyes-Hernández *et al.*, 2023). De forma particular, la COB-3 mostró una de las concentraciones más elevadas, atribuible a la adición de VM, un residuo que contiene cantidades apreciables de Mg según lo reportado por Zelaya-Benavidez *et al.* (2021). En contraste, COB-5 presentó la menor concentración de este elemento, debido a fenómenos de lixiviación ocasionados por la frecuencia de riegos aplicados durante el

compostaje. Aunque se ha documentado que el magnesio puede contribuir a reducir la volatilización del nitrógeno en forma de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) al estabilizar el ion amonio (Jiang *et al.*, 2016), este efecto no se evidenció en el presente estudio, ya que las concentraciones de nitrógeno se mantuvieron bajas en todas las formulaciones (Figura 3). Adicionalmente, investigaciones recientes sugieren que las sales de Mg pueden modificar el pH del sustrato, impactando la actividad microbiana y la descomposición de compuestos orgánicos, lo que podría tener implicaciones sobre la madurez y estabilidad de la composta (Zhang *et al.*, 2025).

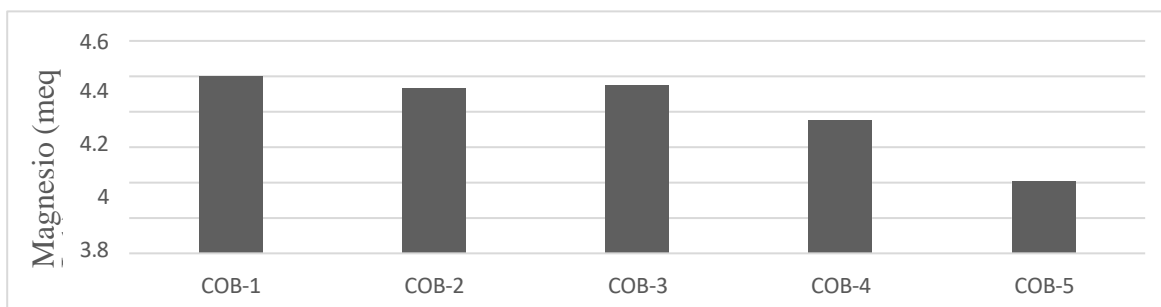


Figura 8: Comportamiento de Mg en compostas orgánicas de bagazo de agave.

### Contenido de micronutrientes

El análisis de microelementos en las COB reveló concentraciones comprendidas entre 0.84 y 1.39  $\text{mg L}^{-1}$  para hierro (Fe), 0.35 a 0.76  $\text{mg L}^{-1}$  para manganeso (Mn), 0.63 a 1.72  $\text{mg L}^{-1}$  para cobre (Cu), 0.24 a 0.82  $\text{mg L}^{-1}$  para zinc (Zn) y 0.14 a 0.25  $\text{mg L}^{-1}$  para boro (B) (Cuadro 2). Exceptuando el cobre, cuyas concentraciones en algunas formulaciones superaron los umbrales establecidos por la norma NMX-FF-109-SCFI- 2008. Estos elementos menores se mantuvieron dentro de los límites permisibles. Estas concentraciones reflejan el aporte de los residuos orgánicos utilizados en la formulación tales como estiércol, gallinaza, hojarasca y bagazo de agave que actúan como fuentes naturales de estos micronutrientes esenciales.

### Contenido de materia orgánica (MO)

Respecto al contenido de materia orgánica, los valores obtenidos oscilan entre 57.6 % y 61.4 % (Figura 9), superando ampliamente el rango establecido por la normativa nacional. Este comportamiento obtenido sugiere un elevado potencial de la fertilidad en términos de capacidad de mejoramiento edáfico. Afirmando lo reportado por Xie *et al.* (2023), esta variabilidad en los niveles de MO se encuentra relacionada a la composición y proporción de los materiales orgánicos empleados, lo que incide directamente en el perfil nutricional y estabilidad final de las compostas.

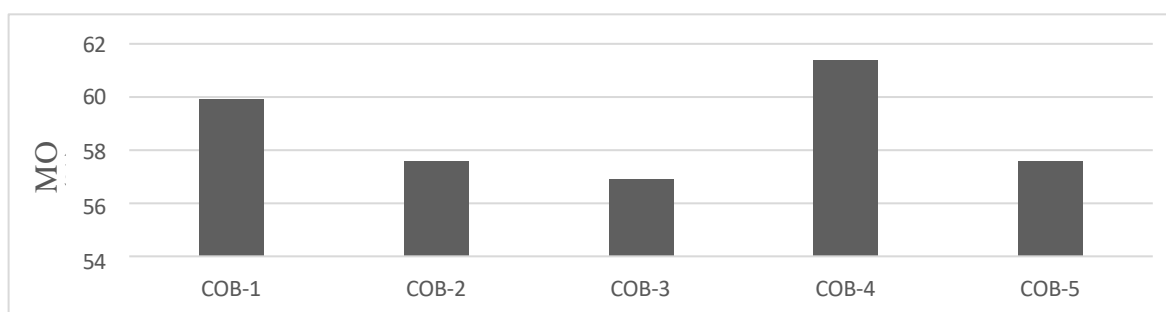


Figura 9: Comportamiento de materia orgánica en compostas orgánicas de bagazo de agave.

## Conclusiones

El uso de bagazo de agave como sustrato principal en la formulación de compostas orgánicas representa una alternativa prometedora para la agricultura sustentable. Sin embargo, el periodo de compostaje aplicado (30 días) resultó insuficiente para lograr la estabilización y madurez de los materiales utilizados y desequilibrio en algunos nutrientes. Por ello, se recomienda prolongar el tiempo de compostaje, aumentar los materiales complementarios para favorecer una mayor descomposición de la materia orgánica y alcanzar mayor potencial en la fertilidad.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de México por el otorgamiento de la beca de maestría al primer autor (CVU 1349840), en el marco de la Convocatoria Becas Nacionales para Estudios de Posgrado. Asimismo, se agradece al Tecnológico Nacional de México por las instalaciones proporcionadas para la realización de los experimentos que sustentan esta investigación.

## Referencias

- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Solubilización microbiana del fósforo y su potencial para su uso en la agricultura sostenible. *Frontiers in Microbiology*, *8*, 971. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- Ballesteros Trujillo, M., Hernández Berriel, M., de la Rosa Gómez, I., Mañón Salas, M., & Carreño de León, M. (2018). Crecimiento microbiano en pilas de compostaje de residuos orgánicos y biosólidos después de la aireación. *Centro Azúcar*, *45*(1), 1-10. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-48612018000100001&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612018000100001&lng=es&tlng=es)
- Caballero-Salinas, J. C., Ovando-Salinas, S. G., Núñez-Ramos, E. & Aguilar-Cruz, F. (2021). Sustratos alternativos para la producción de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en Chiapas. *Siembra*, *7*(2), 14-21. <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.1916>
- Chan, M. T., Selvam, A., & Wong, J. W. (2016). Reducing nitrogen loss and salinity during struvite food waste composting by zeolite amendment. *Bioresource Technology*, *200*, 838-844. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.093>
- Crespo-González, M. R., González Eguarte, D. R., Rodríguez Macías, R., Ruiz Corral, J. A., & Durán Puga, N. (2018). Caracterización química y física del bagazo de agave tequilero compostado con biosólidos de vinaza como componente de sustratos para cultivos en contenedor. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *34*(3), 373-382. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.03.01>
- Delgadillo Ruiz, L., Bañuelos Valenzuela, R., Esparza Ibarra, E., Gutiérrez Bañuelos, H., Cabral Arellano, F., & Muro Reyes, A. (2015). Evaluación del perfil de nutrientes de bagazo de agave como alternativa de alimento para rumiantes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *6*(11), 2099-2103. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i11.778>
- Delgado-Arroyo, M. M., Mendoza-López, K. L., González, M. I., Tadeo Lluch, J. L., & Valero Martín Sánchez, J. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *35*(4), 965-977. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.15>
- Enríquez del Valle, J. R., Hernández San Juan, M. Z., Rodríguez Ortiz, G., & Velasco Velasco, V. A. (2024). ESTIMACIÓN DE RESIDUOS RESULTANTES DE LA ELABORACIÓN DE MEZCAL Y POSIBLES ALTERNATIVAS DE RECICLAJE: Residuos de la elaboración de mezcal. *Revista Mexicana De Agroecosistemas*, *11*(2). <https://doi.org/10.60158/rma.v11i2.429>
- Fan, H., Zhang, Y., Li, J., Jiang, J., Waheed, A., Wang, S., Rasheed, S. M., Zhang, L., & Zhang, R. (2023). Effect of organic fertilizer supply on soil properties, tomato, yield, and fruit quality: A global meta-analysis. *Sustainability*, *15*, 2556. <https://doi.org/10.3390/su15032556>
- Gómez-Vargas, J. L., Alaniz-Villanueva, O. G., Herrera-Gamboa, J., & Silva-Marrufo, O. (2024). Evaluación financiera del bagazo de agave mezcalero (*Agave durangensis*) como sustrato para la producción de hortalizas.

- <https://www.researchgate.net/publication/382969903> Financial evaluation of agave mezcalero bagasse *Agave durangensis* as a substrate for the production of vegetables
- Gutiérrez-González, L. S., Ojeda-Barrios, D. L., Ávila-Quezada, G. D., & Hernández-Rodríguez, O. A. (2024). Características cambiantes durante el compostaje y valores indicativos de calidad en el producto final. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Science*, 40(2), 467–484. <https://doi.org/10.29393/CHJAAS40-39CFLO40039>
- Huo, X.-j., YanZhou, M.-j. C., Jian-lin Z., & Zheng, C.-L. (2023). Potassium-rich mining waste addition can shorten the composting period by increasing the abundance of thermophilic bacteria during high-temperature<sup>1</sup> periods. *Scientific Reports*,<sup>2</sup> 13(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31689-3>
- Íñiguez, G., Martínez, G. A., Flores, P. A., & Virgen, G. (2011). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 9. Monitoreo de la evolución del compostaje de dos fuentes distintas de bagazo de agave para la obtención de un substrato para jitomate. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(1), 47– 59.
- Jara-Samaniego, J., Pérez-Murcia, M. D., Bustamante, M. A., Pérez-Espinosa, J. L., Paredes, C., López, M., López- Lluich, D. B., Gavilanes-Terán, I., & Moral, R. (2017). Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production. *Journal of Cleaner Production*, 141, 1349–1358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.178>
- Jiang, T., Ma, X., Yang, J., Tang, Q., Yi, Z., Chen, M., & Li, G. (2016). Effect of different struvite crystallization methods on gaseous emission and the comprehensive comparison during the composting. *Bioresource Technology*, 217, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.046>
- Ji, Z., Zhang, L., Liu, Y., Li, X., & Li, Z. (2023). Evaluation of composting parameters, technologies and maturity indexes for aerobic manure composting: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 886, 163929. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.163929>
- Liu, J., Cade-Menun, B. J., Yang, J., Hu, Y., Liu, C. W., Tremblay, J., et al. (2018). El uso a largo plazo del suelo afecta la especiación del fósforo y la composición de los genes del ciclo del fósforo en suelos agrícolas. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1643. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01643>
- Méndez-Matías, A., Robles, C., Ruiz-Vega, J., & Castañeda-Hidalgo, E. (2018). Compostaje de residuos agroindustriales inoculados con hongos lignocelulósicos y modificados de la relación de C/N. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2). <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1070>
- Mendoza-Rossano, J. A., Cruz Hernández, J., & Herrera Pérez, L. (2023). Determinación de parámetros físicos y químicos de digeridos de bagazo de agave (*Agave angustifolia* Haw.) obtenidos con pacas biodigestoras. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(2), 1–8. <https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2023.03.10>
- Millán, F., Prato, J. G., La Cruz, Y., & Sánchez, A. (2018). Estudio metodológico sobre la medición de pH y conductividad eléctrica en muestras de compost. *Revista Colombiana de Química*, 47(2), 21–27. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v47n2.67338>
- Monsalve Camacho, O. I., Henao Toro, M. C., & Gutiérrez Díaz, J. S. (2021). Caracterización de materiales con uso potencial como sustratos en sistemas de cultivo sin suelo. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(2), 1–15. <https://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/1977>
- Muñoz-Villalobos, J. A., Urrieta Velázquez, J. A., Nava-Reyna, E., & Constante-García, V. (2023). Calidad de una composta con base en los indicadores de pH y conductividad eléctrica. *Agrofaz - Journal of Environmental and Agroecological Sciences*, 5, 10–15. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9270297>
- Ordaz Díaz, L., Madrid Palacios, M., Rodríguez Flores, F., & Bailon Salas, A. (2019). Aprovechamiento de los subproductos valiosos de la industria del mezcal en Durango. *Revista de Ciencia Administrativa*, 1(1), 12– 22. <https://www.researchgate.net/publication/336015561> APROVECHAMIENTO DE LOS SUBPRODUCTOS VALIOSOS DE LA INDUSTRIA DEL MEZCAL EN DURANGO
- Ortiz Argueta, C. (2020). *Prácticas para la mejora en el proceso de compostaje de abonos orgánicos elaborados a base de estiércol y su efecto en el suelo*. [Undergraduate thesis, Zamorano]. <https://bdigital.zamorano.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c4199442-92ac-4b47-955f-bbb0066d86f5/content>

- Rath, K. M., & Rousk, J. (2015). Efectos de la sal en la comunidad microbiana de descomponedores del suelo y su papel en el ciclo del carbono orgánico: Una revisión. *Soil Biology and Biochemistry*, *81*, 108–123. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.011>
- Reyes-Hernández, R., Carrillo Rodríguez, J. C., Chávez Servia, J. L., Chávez-Servia, A. M., Perales Segovia, C., Hernández Delgado, S., & Alba Jiménez, J. (2023). Fertilización orgánica y su respuesta en caracteres de planta y fruto de tomate en cultivo sin suelo. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, *10*(1). <https://doi.org/10.60158/rma.v10i1.375>
- Robles-González, V., Poggi-Varaldo, H., Galíndez-Mayer, J. y Ruiz-Ordaz, N. (2018). Combined Treatment of Mezcal Vinasses by Ozonation and Activated Sludge. *Water Environment Research*, *90*, (11). <https://doi.org/10.2175/106143017X15054988926433>
- Rodríguez-Calampa, N., & Tafur-Torres, Z. (2023). *Producción de Microorganismos de Montaña para el Desarrollo de una Agricultura Orgánica*. [No direct link found for this specific document, but similar reports suggest it might be an internal or limited-access publication.]
- Rosas-Martínez, V., Rodríguez-Lagunes, D. A., Llerena-Hernández, R. C., Milanés-Ramos, N., Rico-Contreras, J. O., & Castañeda-Castro, O. (2021). Evaluación 101edaly-química de composta de residuos avícolas y cachaza. *Agrociencia*, *55*(4), 291–302. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i4.2478>
- Tencio C., R. (2015). *Reproduccion y aplicación de los microorganismos de montaña (MM) en la actividad agrícola y pecuaria*. Ministerio de agricultura y ganadería, central oriente. Ministerio de Agricultura y Ganadería. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1847.pdf>
- Tortosa, G. (2018). La humedad influye más en la actividad microbiana del compost que su temperatura. [en línea]: <<https://www.compostandociencia.com/2018/02/la-humedad-influye-mas-en-la-actividad-microbiana-del-compost-que-su-temperatura/>>
- Xie, S., Tran, H., Pu, M., & Zhang, Y. (2023). Transformation characteristics of organic matter and phosphorus in composting processes of agricultural organic waste: Research trends. *Materials Science for Energy Technologies*, *6*, 331–342. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.02.006>
- Yang, J.-W., Luyima, D., Park, S.-J., Kim, S.-H., & Oh, T.-K. (2021). Mixing Sodium-Chloride-Rich Food Waste Compost with Livestock Manure Composts Enhanced the Agronomic Performance of Leaf Lettuce.<sup>1</sup> *Sustainability*, *13*(23), 13223. <https://doi.org/10.3390/su132313223>
- Zelaya-Benavidez, E., Martínez-Gutiérrez, G., Escamirosa-Tinoco, C., & Morales, I. (2022). Vinazas de mezcal y su efecto biofertilizante en el rendimiento de hortalizas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *8*(3). <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.3159>
- Zhang, L., Xu, W., Jiang, J., Li, R., & Liang, W. (2025). Nitrogen 101edalyc101ón and mechanisms related to reduced emissions by adding exogenous modified magnesium ore during aerobic composting. *Journal of Environmental Management*, *378*, 124550. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124550>
- Zuluaga, MYA, de Oliveira, ALM, Valentinuzzi, F., Tiziani, R., Pii, Y., Mimmo, T., et al. (2021). ¿Puede la inoculación con el bioestimulante bacteriano *Enterobacter* sp. Cepa 15S ser una estrategia para una fertilización fosfatada más eficiente en plantas de maíz y pepino? *Front. Plant Sci.* 12:719873. Doi: 10.3389/fpls.2021.719873

## PROTOTIPO IOT PARA EL MONITOREO DE VARIABLES AMBIENTALES Y AUTOMATIZACIÓN DE RIEGO EN CULTIVOS DE NOPAL

[IOT PROTOTYPE FOR MONITORING ENVIRONMENTAL VARIABLES AND AUTOMATING IRRIGATION IN CACTUS CROPS]

Mauricio Ramos Davila<sup>1</sup>, José de Jesús Campos Torres<sup>1\*</sup> e Ignacio Mejía Haro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingenierías, <sup>2</sup>Departamento de Estudios de posgrado e Investigación – Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes – TecNM. Carretera Aguascalientes – San Luis Potosí, Km.18, El Llano, Aguascalientes. México

\*Autor de Correspondencia: jose.ct@llano.tecnm.mx

ORCID: 0009-0000-9385-9313

### Resumen

En la actualidad, el crecimiento de la población y el avance tecnológico han impulsado la automatización de las labores agrícolas. En este sentido, el presente proyecto consistió en la implementación de un prototipo para el riego automático para cultivos experimentales de nopal, basado en sensores y tecnología del Internet de las Cosas (IoT). Además del riego, el sistema permite realizar mediciones periódicas de diversas variables ambientales, como temperatura ambiental, humedad ambiental y humedad del suelo, dentro de un ambiente controlado (invernadero). Para el desarrollo del proyecto, se seleccionaron tres especies de nopal: *Opuntia robusta*, *Opuntia joconostle* y *Opuntia matudae*. Y partir de los datos generados por los sensores, el prototipo determina de manera automática el momento adecuado para realizar el riego. Esta implementación también abre la posibilidad de apoyar a diversos estudios orientados a analizar el efecto del estrés hídrico sobre la producción de nopal en ambientes controlados. Como resultado, se obtuvo una base de datos con 43,394 registros de los tres sensores, los cuales pueden ser consultados vía web o visualizados a través de una aplicación móvil App que se conecta a la plataforma IoT, la cual monitorea las condiciones ambientales de los cultivos en el invernadero, mediante gráficas y estadísticas descriptivas. En conclusión, se logra exitosamente la implementación del riego automatizado y el monitoreo de las condiciones ambientales en la producción de nopal de forma experimental.

**Palabras clave:** Internet de las Cosas, Agricultura 4.0, Sensores.

### Abstract

Currently, population growth and technological advances have driven the automation of agricultural practices. In this context, the present project consisted of the implementation of a prototype for automatic irrigation in experimental prickly pear (*nopal*) crops, based on sensors and Internet of Things (IoT) technology. In addition to irrigation, the system enables periodic measurements of various environmental variables, such as ambient temperature, air humidity, and soil moisture, within a controlled environment (greenhouse). For the development of the project, three species of prickly pear were selected: *Opuntia robusta*, *Opuntia joconostle*, and *Opuntia matudae*. Based on the data generated by the sensors, the prototype automatically determines the appropriate moment to irrigate. This implementation also opens the possibility of supporting different studies aimed at analyzing the effect of water stress on prickly pear production in controlled environments. As a result, a database with 43,394 records from the three sensors was obtained, which can be accessed via the web or visualized through a mobile application connected to the IoT platform. This platform monitors crop environmental conditions in the greenhouse through graphs and descriptive statistics. In conclusion, the successful implementation of automated irrigation and environmental condition monitoring for experimental prickly pear production was achieved.

**Keywords:** Internet of Things, Agriculture 4.0, Sensors

## Introducción

En contexto actual, la automatización en la agricultura ha cobrado relevancia como una alternativa viable para la optimización de distintos recursos y también para mejorar la productividad y la reducción del impacto ambiental (Zhang *et al.*, 2018). Particularmente, el uso del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) ha permitido desarrollar sistemas inteligentes capaces de monitorear variables ambientales y tomar decisiones en tiempo real, como el riego automatizado y con base en los datos obtenidos de los distintos sensores (Wolfert *et al.*, 2017). Este tipo de sistemas no solo mejoran la eficiencia y optimización en el uso del agua, sino que también contribuyen al manejo de cultivos en ambientes controlados como lo son los invernaderos.

El proyecto desarrollado consistió en crear un prototipo para el riego automático para cultivos experimentales de nopal en un invernadero, empleando sensores y tecnología IoT. El sistema permite medir variables clave como la temperatura ambiental, la humedad ambiental y la humedad del suelo, lo cual facilita la toma de decisiones sobre el riego y la recopilación de información para futuros estudios sobre el efecto del estrés hídrico en la producción de nopal. Se trabajó con tres especies distintas: *Opuntia robusta*, *Opuntia joconostley* *Opuntia matudae*. Como resultado, se generó una base de datos con más de 43,000 registros y una aplicación móvil que permite la visualización de las condiciones del cultivo mediante gráficas e indicadores estadísticos. Este tipo de soluciones representa un avance significativo hacia una agricultura más sostenible e inteligente (Kamilaris *et al.*, 2016).

## Materiales y métodos

### Lugar de la investigación

El proyecto se llevó a cabo en un invernadero ubicado dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes – TecNM, el cual ofrece las condiciones idóneas ya que se cuenta con servicios de: luz, agua e Internet. Este proyecto se desarrolló durante el periodo de septiembre a diciembre de 2024, con una duración de cuatro meses, permitiendo la implementación y la recopilación de datos ambientales en tiempo real durante dicho periodo.

A continuación, presentamos un esquema del funcionamiento del Prototipo (Figura 1)



Figura 4. Esquema del funcionamiento del prototipo de riego. Autoría Propia.

### Especies vegetales utilizadas

Las especies utilizadas de nopal de nuestro interés agrícola y comercial para su cultivo en condiciones controladas se indican en la Figura 2: Estas especies fueron plantadas a partir de un tipo de plantación de cladodios (pencas) es el método más común y eficiente para la reproducción del nopal. El cual consiste en plantar directamente un trozo de la planta madre. Su clasificación fue realizada utilizando el Banco de Germoplasma de Nopal (INIFAP)



*Opuntia Robusta*



*Opuntia Joconostle*



*Opuntia Matudae*

Figura 5. Especies de nopal utilizadas en experimento de riego controlado.

### Diseño del sistema de riego

El Prototipo de riego y monitoreo que se implementó utilizó como base una arquitectura de Internet de las Cosas (IoT), integrado por los componentes indicados en el Cuadro 1.

El sensor de humedad de suelo fue calibrado previamente y colocado estratégicamente cerca de las raíces de las plantas para obtener mediciones precisas. S

Se utilizó una plataforma para la gestión de los datos que se encuentra en internet (*MathWorks, s.f.*) y adicionalmente se integró una aplicación móvil (APP) conectada a la plataforma IoT, la cual permite:

- Visualizar variables en tiempo real (temperatura, humedad ambiental y del suelo).
- Consultar gráficas y estadísticas descriptivas de las condiciones ambientales.

Los datos fueron almacenados en una base de datos en la nube, generando un total de 43,394 registros durante el periodo previamente descrito.

El criterio de riego automático se activa automáticamente cuando la humedad del suelo descendía por debajo de un umbral definido del 30%, configurado en el microcontrolador.

Este umbral fue determinado con base en valores de referencia para cactáceas en etapa de crecimiento inicial, considerando evitar el estrés hídrico.

Cuadro 1. Categoría y descripción de componentes del prototipo tipo IoT para el control de riego.

Categoría	Componente	Descripción
Control Central	Microcontrolador: ESP8266 con conexión Wi-Fi	El "cerebro" del sistema, permite programar la lógica de riego y conectarse a internet para monitoreo o control remoto.
Sensores	Sensor de temperatura y humedad	Mide la temperatura ambiente y la humedad del aire, datos útiles para optimizar el riego.
	Sensor de humedad de suelo capacitivo	Detecta la cantidad de agua presente en el suelo sin corroerse fácilmente, indicando cuándo regar.
Actuadores	Mini bomba de agua sumergible	Se encarga de mover el agua desde un depósito hacia las plantas cuando se activa.
	Relevador	Un interruptor electrónico que permite al microcontrolador controlar la bomba de agua de forma segura.
Alimentación	Adaptador de corriente a USB	Proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del microcontrolador y otros componentes.
Conectividad	Cables de conexión USB	Para programar el microcontrolador y posiblemente para su alimentación.
	Cables DUPONT	Para realizar las conexiones eléctricas entre los diferentes sensores, el microcontrolador y el relevador.
Protección	Caja registro	Protege los componentes electrónicos de la intemperie, el polvo y posibles daños.

## Resultados y discusión

### Adquisición de los datos por el prototipo IoT

Durante el periodo de desarrollo e implementación del prototipo de riego automatizado en el invernadero, se recopilaron un total de 43,394 registros correspondientes a tres sensores o variables principales: temperatura ambiental °C, humedad ambiental (%) y humedad del suelo (%). Los datos se obtuvieron de manera continua cada 15 minutos, permitiendo un seguimiento detallado del comportamiento de las condiciones ambientales que afectan los cultivos de nopal. En la Figura 3 se muestran los prototipos para monitorear cada especie y aplicar el riego además de un código QR para su monitoreo a través de una página en internet.



Figura 3. Implementación del prototipo en los genotipos de nopal.

### Comportamiento de la humedad del suelo y el ambiente

El comportamiento de la humedad del suelo mostró que fluctuó en función del umbral definido del (30 %) para activar el riego. Cada vez que se alcanzaba dicho umbral, el prototipo respondió de manera automática, activando la mini-bomba y restableciendo los niveles adecuados de humedad. Este comportamiento se observó de forma regular, evidenciando la efectividad del prototipo en mantener condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas. Se observó un promedio de humedad del suelo del 47.3 %, con mínimos de 30.0 % (activación del riego) y máximos de 61.4 % (post-riego). Las tendencias de temperatura y humedad ambiental reflejaron variaciones diarias típicas de un entorno de invernadero.

### Comportamiento de la temperatura y humedad relativa

Se identificaron picos de temperatura (Cuadro 2) en las horas centrales del día y un aumento en la humedad relativa durante la noche. La temperatura promedio es de: 28.4 °C, con máximos de 39.2 °C y mínimos de 17.5 °C. Humedad relativa promedio: 51.2 %, con picos nocturnos de hasta 78%. Estos datos se consideran relevantes para analizar el microclima en el invernadero y su relación con el consumo hídrico de las plantas. El sistema de riego respondió de forma adecuada en el 100 % de las ocasiones en que la humedad del suelo descendió por debajo del umbral definido. No se registraron fallas en la activación de la bomba, a excepción de dos ocasiones por fallas en el suministro de luz (factores externos), lo cual valida la eficiencia del control. En promedio, el prototipo realizó entre 1 y 2 activaciones automáticas por semana, dependiendo de la especie de nopal y de las condiciones térmicas externas. La App permitió observar las variables monitoreadas y generar gráficas de comportamiento diarias. Esto facilita el seguimiento remoto del comportamiento de cada especie cultivada.

La plataforma mostró durante este periodo más de 120 gráficas interactivas y permitió la exportación de los datos para análisis futuros.

Variable	Valor Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo
Temperatura ambiental (°C)	28.4	17.5	39.2
Humedad ambiental (%)	51.2	31.4	78.0
Humedad del suelo (%)	47.3	30.0	61.4

Cuadro 2 Comportamiento de temperatura y humedad en un cultivo experimental de nopal bajo condiciones de invernadero.

### Análisis integral del sistema IoT para crecimiento de plantas en invernadero

La implementación del prototipo de riego automatizado basado en tecnología IoT demostró ser eficaz para el riego y el monitoreo de variables ambientales en la producción experimental de Nopal *Opuntia* spp. (Figura 4). En condiciones de invernadero. La activación precisa del riego, cuando la humedad del suelo descendía por debajo del umbral del 30 %, permitió evitar el estrés hídrico en las plantas, lo cual es crucial para especies como: *Opuntia robusta* u *Opuntia joconostle*, que tienen mecanismos particulares de adaptación al déficit hídrico (Flores-Hernández *et al.*, 2017).

Los valores registrados de temperatura y humedad ambiental también fueron consistentes con los rangos recomendados para el desarrollo vegetativo del nopal (Sánchez *et al.*, 2019), lo que valida la estabilidad del microclima generado en el invernadero. La capacidad del prototipo para registrar más de 43,000 datos y mostrarlos de manera visual a través de un APP representa un avance significativo en la automatización del monitoreo agrícola, con un enfoque accesible y replicable para otras especies y regiones del estado.

Además, este tipo de implementación contribuye al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles, al optimizar el uso del recurso hídrico y reducir la necesidad de intervención humana constante. Esto es especialmente relevante en el contexto del cambio climático y la escasez de agua en regiones semiáridas (González-Torres & Ramírez, 2020).

En la imagen que aparece abajo (Figura 4) podemos observar dos graficas generadas por la App la cual muestra en la primera la temperatura ambiental y la segunda corresponde a la humedad ambiental 106ed como su comportamiento en un periodo determinado.

## Estadísticas del canal

Creado: [hace 27 días](#)

Última entrada: [hace 31 minutos](#)

Entradas: 36



Figura 4 Graficas de sensor de temperatura y humedad ambiental.

## Conclusiones

Finalmente se logró la implementación exitosa de un prototipo de riego automatizado basado en tecnología IoT, aplicable al cultivo de nopal en ambientes controlados de forma experimental. El prototipo además permitió el monitoreo continuo de la temperatura ambiental, la humedad ambiental y la humedad del suelo, respondiendo de forma automática con activaciones de riego según las condiciones registradas. Se crea una base de datos con más de 43,000 registros, lo cual abre la posibilidad para realizar distintos análisis estadísticos, así como predicciones de comportamiento hídrico o estudios sobre el estrés ambiental en las cactáceas.

La visualización de datos a través de una aplicación móvil facilitó el seguimiento y control remoto del sistema, promoviendo la gestión inteligente de los recursos agrícolas. Este prototipo puede ser adaptado a diferentes tipos de cultivos, lo cual lo convierte en una alternativa escalable y sostenible para la agricultura tecnificada en zonas áridas o semiáridas en ambientes controlados.

## Referencias

- Flores-Hernández, A., Pimienta-Barrios, E., & Muñoz-Urias, A. (2017). *Adaptaciones fisiológicas del nopal frente al estrés hídrico*. Revista Chapingo Serie Horticultura, 23(2), 155-162. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.04.011>
- González-Torres, M., & Ramírez, L. (2020). *Uso eficiente del agua en la agricultura de zonas áridas: tecnologías y perspectivas*. Agricultura Técnica en México, 46(3), 303-312.
- Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2016). A review on the practice of big data analysis in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 143, 23-37. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037>
- MathWorks. (s.f.). *ThingSpeak™ IoT analytics platform*. MathWorks. <https://thingspeak.com/>
- Sánchez, A., Rodríguez, J., & Martínez, D. (2019). *Condiciones óptimas de temperatura y humedad para el cultivo de nopal (Opuntia spp.) en invernadero*. Agroecología y Sustentabilidad, 14(1), 45-52.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems, 153, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Zhang, Y., Wang, G., & Wang, L. (2018). Application of IoT Technology in Smart Agriculture: A Review. Journal of Agricultural Science and Technology, 20(5), 1-12.

## PROTOTIPO PARA EL MONITOREO DE VARIABLES AMBIENTALES Y RIEGO AUTOMÁTICO EN UN HUERTO URBANO MEDIANTE UNA APP CON SOPORTE DE INTERNET DE LAS COSAS

[PROTOTYPE FOR MONITORING ENVIRONMENTAL VARIABLES AND AUTOMATED IRRIGATION IN AN URBAN GARDEN USING AN IOT-SUPPORTED APP]

José de Jesús Campos Torres<sup>1</sup>, Mauricio Ramos Davila<sup>1\*</sup>, Juan Alejandro Montañez de la Torre<sup>1</sup>, Ignacio Mejía Haro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingenierías, <sup>2</sup> Departamento de Estudios de posgrado e Investigación – Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes – TecNM. Km.18 Carretera Aguascalientes – San Luis Potosí, El Llano, Aguascalientes. México

\*Autor de Correspondencia: maucio.rd@llano.tecnm.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4617-3524>

### Resumen

En el presente proyecto consistió en un prototipo basado en un nodo de Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo de las condiciones ambientales y el riego automático de un huerto urbano mediante una aplicación para dispositivo móvil (App). Las variables consideradas son: temperatura, humedad ambiental, humedad del suelo y luminosidad. La información recolectada mediante el uso de sensores es transmitida desde el nodo hacia una plataforma en la nube pública y posteriormente a una base de datos en la nube privada, con el fin de almacenarla y facilitar su análisis cuando sea requerido. Los datos obtenidos mediante el prototipo permitieron evaluar el comportamiento de distintos cultivos experimentales bajo diversas condiciones ambientales. La App desarrollada permite visualizar en tiempo real los datos obtenidos facilitando el monitoreo remoto del huerto. Este proyecto fue realizado en el Instituto Tecnológico El Llano/TECNM.

**Palabras clave:** Huerto urbano, Internet de las Cosas, Agricultura de precisión, Sensores.

### Abstract

This project presents a prototype based on an IoT node designed for monitoring environmental conditions and enabling automated irrigation in an urban garden through a mobile application (App). The monitored variables include temperature, ambient humidity, soil moisture, and luminosity. Data collected by sensors are transmitted from the node to a public cloud platform and subsequently stored in a private cloud database, allowing for efficient storage and facilitating analysis when required. The data obtained through the prototype enabled the evaluation of the performance of different experimental crops under diverse environmental conditions. The developed mobile application provides real-time visualization of the collected data, thereby supporting remote monitoring of the garden. This project was carried out at the Instituto Tecnológico El Llano/TECNM.

Keywords: Urban garden, Internet of Things (IoT), Precision agriculture, Sensors

### Introducción

México, con su creciente población urbana, enfrenta la necesidad de repensar cómo producimos y consumimos nuestros alimentos, los retos relacionados con la seguridad alimentaria y el uso sostenible de los recursos se vuelven cada vez más serios. Al respecto, FAO (2025) ha destacado repetidamente la importancia de la producción local para la seguridad alimentaria en entornos urbanos y ha promovido activamente estrategias para desarrollar la agricultura urbana. De acuerdo a Borbón y Ochoa De la Torre, (2020), los huertos urbanos trascienden la mera recreación, constituyendo una estrategia efectiva para impulsar la seguridad alimentaria y nutricional en los hogares y comunidades, y son un elemento clave para la resiliencia urbana. Asimismo Calvet-Mir *et al.*, (2022), señalan que los

huertos urbanos son cada vez más reconocidos como opciones viables para generar sustentabilidad urbana, además de producir alimentos útiles y transformar el espacio urbano. Por su parte, Khattak *et al.* (2023) explican que el Internet de las cosas (IoT) es una tecnología fundamental en la agricultura moderna, ofreciendo soluciones basadas en datos para optimizar la productividad y la sostenibilidad. Este tipo de soluciones abordamos para atender este tipo de problemáticas antes mencionadas.

## Materiales y métodos

### Localización del prototipo

El proyecto se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes -TecNM, en un entorno controlado que permite contar con servicios de electricidad, agua potable y acceso a Internet. Este proyecto se desarrolló durante el periodo de marzo a mayo de 2025, con una duración de tres meses, permitiendo el desarrollo, implementación, realización de pruebas.

### Dispositivos electrónicos utilizados para conformación del IoT para riego

Después de analizar los alcances del proyecto, se determinan los requisitos técnicos para la integración del prototipo, los cuales se enlistan a continuación (Cuadro 1).

Unidad de Medida	Cantidad	Descripción
Pza.	1	Sensor de Humedad y Temperatura Ambiental
Pza.	1	Sensor de humedad de suelo
Pza.	1	Sensor de Luminosidad
Pza.	1	Relevador
Pza.	1	Bomba sumergible
Pza.	1	Placa de desarrollo para prototipado rápido
Lote.	1	Cable eléctrico de 3mm
Kit.	1	Soldadura de estaño y pasta térmica
Pza.	1	Cautín
Pza.	1	Cinta de aislar
Pza.	1	Recipiente muestra para plantas
		Recipiente contenedor de agua
Pza.	1	Contacto de alimentación y cables.
Kit.	1	Cultivo experimental a elegir (Nopal <i>Opuntia robusta</i> )

Cuadro 1. Instrumental y materiales del proyecto.

### Diseño del prototipo y programación del sistema

La arquitectura implementada para la recopilación de datos ambientales y su visualización mediante la App en tiempo real de un huerto urbano experimental se indica en la Figura 1. Este prototipo se puede ajustar previamente para mantener la humedad relativa acorde al cultivo urbano requerido, utiliza una serie de sensores como: Humedad y temperatura ambiental 109ed como humedad de suelo, una mini bomba sumergible, un relevador junto con una tarjeta microcontroladora la cual se programo mediante una interfaz de desarrollo (IDE) donde se calibran los sensores (Figura 2) del prototipado rápido para mantener la humedad relativa en el umbral del 30% a fin de reducir el estrés hídrico en la fase de crecimiento inicial de las cactáceas.

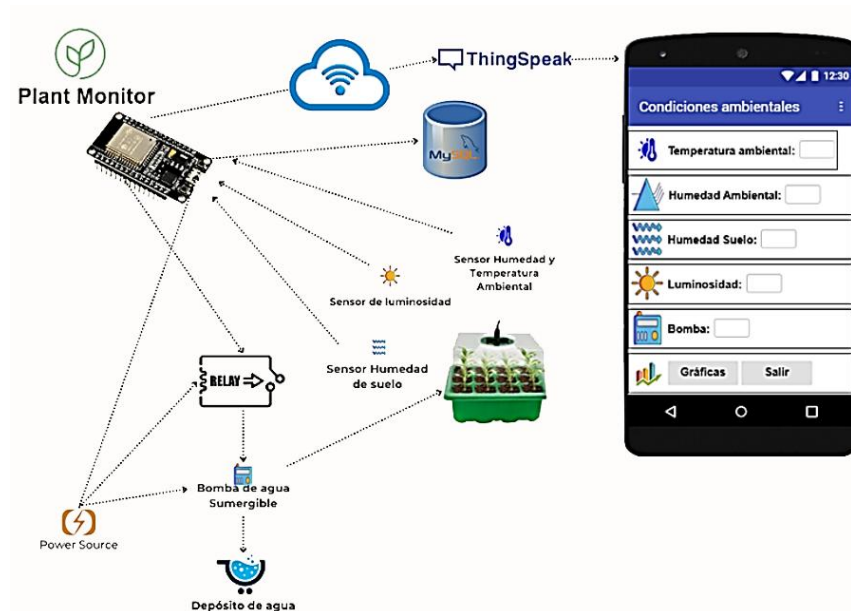


Figura 6 Diagrama base de integración del prototipo para riego.

```

DHT11TempHumThingSpeak3datos | Arduino 1.8.19
File Edit Sketch Tools Help
DHT11TempHumThingSpeak3datos - C:\temp\...

// Initiate the query class instance
ESP32_MySQL_Query query_mem = ESP32_MySQL_Query(10conn);

if (conn.connected())
{
  ESP32_MySQL_DISPLAY(INSERT_SQL);
  // Execute the query
  if ( !query_mem.execute(INSERT_SQL_c_str()) )
  {
    ESP32_MySQL_DISPLAY("insert error");
  }
  else
  {
    ESP32_MySQL_DISPLAY("Data Inserted.");
  }
}
else
{
  ESP32_MySQL_DISPLAY("Disconnected From Server. Can't insert.");
}

// Verificar si la lectura fue exitosa
if (isnan(temperatura)) {
  Serial.println("Error al leer el sensor DHT11!");
  delay(2000);
  return;
}

Sleeping...
Send resetting via RST pin...

COM5
Humedad del suelo adecuada. Bomba desactivada.
Sleeping...
Connecting...
INSERT INTO test.test (Temp_Amb, Hum_Amb, Hum_Suelo, Luminosidad, Bomba) VALUES ('
Data Inserted.
Temperatura: 26 °C
Humedad: 29
Humedad de suelo: 57
Luz: 74
Bomba: 0
Error al enviar datos a ThingSpeak. Código HTTP: -401
Humedad del suelo adecuada. Bomba desactivada.
Sleeping...
Connecting...
INSERT INTO test.test (Temp_Amb, Hum_Amb, Hum_Suelo, Luminosidad, Bomba) VALUES ('
Data Inserted.
Temperatura: 26 °C
Humedad: 29
Humedad de suelo: 57
Luz: 74
Bomba: 0
Datos enviados a ThingSpeak con éxito!
Humedad del suelo adecuada. Bomba desactivada.
Sleeping...
Connecting...
INSERT INTO test.test (Temp_Amb, Hum_Amb, Hum_Suelo, Luminosidad, Bomba) VALUES ('
Data Inserted.
Temperatura: 26 °C
Humedad: 29
Humedad de suelo: 57
Luz: 74
Bomba: 0
  
```

Figura 2 Programación del nodo IoT en IDE Arduino (ESP32). Fuente: Elaboración propia.

### Genotipo de nopal

Para la realización de las pruebas de su funcionamiento se utiliza la especie de nopal *Opuntia* spp. (Figura 3) la cual es una cactácea de las regiones semiáridas de México y con aprovechamiento forrajero o de conservación de la erosión. Los cladodios del cultivo experimental seleccionado se plantan directamente en el contenedor del prototipo de huerto urbano.



Figura 3. Nopal (*Opuntia* sp.).

### Variables ambientales monitoreadas

Los sensores implementados miden: la temperatura ambiental, la humedad ambiental, la humedad del suelo y la luminosidad, los cuales generan distintos valores durante el día. Estos son enviados a una base de datos local MySQL así como a una plataforma IoT para su gestión (ThingSpeak).

### Resultados y discusión

#### Implementación del prototipo de riego

Se configuró la infraestructura tecnológica de soporte para la operación del prototipo (Figura 3) y su comunicación con la nube pública mediante un punto de acceso en la red interna para dotarlo de conectividad WiFi y salida a Internet, el cual entrega una dirección de forma automática mediante un protocolo al nodo IoT habilitando su conexión a la plataforma Cloud. Este direccionamiento permitió que el nodo alcanzara al servidor de MySQL ubicado en la red interna para almacenar los datos de igual forma en la nube privada a fin de contar con una réplica que permitió su gestión y análisis. Los sensores utilizados se calibraron previamente. Se efectuó la integración de los elementos del nodo IoT y posteriormente se programaron con una secuencia lógica que permitió la captura y transmisión de datos:



Figura 4) Imagen de los elementos del prototipo

Se realizaron pruebas de conectividad, estabilidad y transmisión de datos desde el nodo IoT hacia la nube pública y nube privada (Servidor de MySQL) y se evaluó la correcta integración y envío de raw data provenientes del nodo IoT integrado en el huerto urbano hacia la nube usando MQTT y Javascript. Ver Figuras 5.

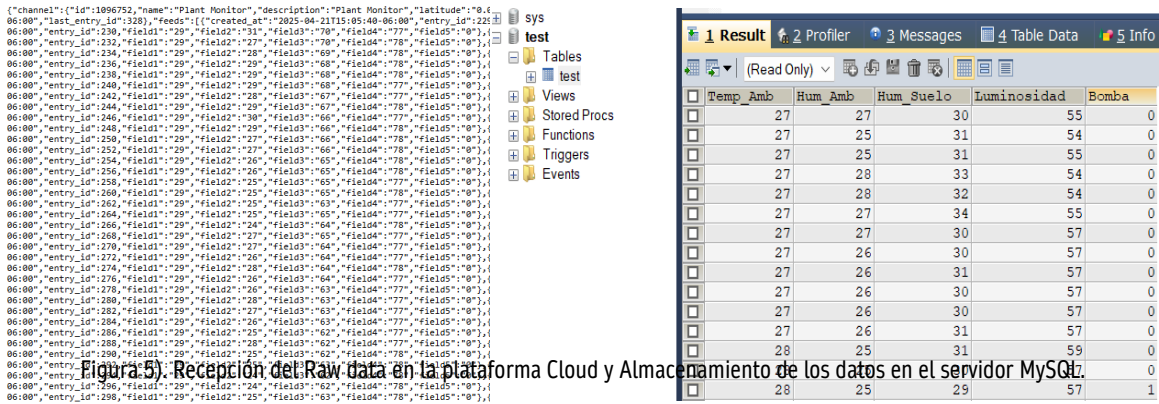


Figura 5). Recepción del Raw data en la plataforma Cloud y Almacenamiento de los datos en el servidor MySQL.

### Monitoreo de variables ambientales

Los datos de temperatura, humedad ambiental, humedad del suelo y luminosidad fueron enviados hacia una nube pública y posteriormente hacia la nube privada, de la cual se generan las siguientes gráficas de comportamiento (Figura 6).



Figura 6. Imagen de consultada realizada en la pagina de la plataforma (MathWorks, s.f.)

En las gráficas presentadas en la parte de arriba, Figura 6. Aparece una primer gráfica ubicada en la parte superior izquierda que indica la temperatura ambiental en grados centígrados, en la segunda gráfica localizada en la parte superior derecha el porcentaje de humedad ambiental, en la tercer gráfica ubicada en la parte inferior izquierda el

porcentaje de humedad de suelo y en la última gráfica ubicada en la parte inferior derecha el porcentaje de luminosidad.

### Aplicación del prototipo IoT en la implementación de riego en plantas de nopal

Acorde a los requerimientos del proyecto creamos una aplicación móvil con la herramienta MIT APP Inventor para la recuperación de los datos desde la plataforma IoT utilizando metodología RAD, implementando lo siguiente: 1.Splash screen, 2. Pantalla de control de acceso, 3. Pantalla de visualización de comportamiento de las variables obtenidas por medio de los sensores del nodo IoT (Temperatura Ambiental, Humedad Ambiental, Humedad de Suelo, Luminosidad. Estado de la bomba de agua) 4. Pantalla de visualizaciones gráficas del comportamiento de las variables ambientales descritas, 5. El riego automático está programado en el nodo IoT conforme a los requerimientos del cultivo seleccionado. La conectividad IoT se validó mediante la transmisión continua y fiable de la información desde el nodo hacia una plataforma en la nube pública y posteriormente a una base de datos en la nube privada. Este flujo de datos garantiza la accesibilidad para su almacenamiento a largo plazo y facilita el análisis cuando sea requerido. Esta capacidad de gestionar, y procesar los datos es clave para la toma de decisiones informadas sobre el manejo de los cultivos. Además del monitoreo, el prototipo integra exitosamente la funcionalidad de riego automático, la cual respondió adecuadamente a cualquier variación del umbral de humedad de suelo predefinida al 30%. Este sistema, accionado por la lectura del sensor de humedad del suelo y una pequeña bomba de agua, optimiza el uso de los recursos hídricos al aplicar solo cuando es necesario, aportando a su optimización en la agricultura de precisión en pequeña escala. Por lo cual lo convierte en una alternativa escalable para la agricultura urbana.



Figura 7. Pantallas de la App generada por App Inventor para la recuperación de datos desde el nodo IoT del huerto urbano. Fuente: Elaboración propia.

### Conclusiones

La implementación de este prototipo basado en Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo y control de huerto urbano representa un esfuerzo hacia la promoción de una cultura de sostenibilidad en México. Se demuestra que la tecnología puede ser un gran aliado para transformar los espacios urbanos en centros productivos y eficientes. La capacidad de monitorear variables ambientales como la temperatura, humedad y luminosidad, junto con la

automatización del riego, no solo optimiza el uso del preciado recurso del agua, sino que también democratiza el acceso a prácticas de agricultura de precisión. Esto es crucial en un contexto urbano donde el espacio y el tiempo son limitados, y la eficiencia es primordial. Al permitir la visualización de datos en tiempo real a través de una aplicación móvil, se permite a los potenciales usuarios, desde jardineros aficionados hasta pequeños productores urbanos, contar con información precisa para tomar decisiones informadas sobre sus cultivos. Este prototipo puede adaptarse para permitir el análisis del comportamiento de diversas especies bajo condiciones controladas, contribuye directamente al conocimiento y desarrollo de huertos urbanos más resilientes y productivos. En un país donde la seguridad alimentaria y el uso eficiente de los recursos hídricos son desafíos constantes, la adopción de soluciones tecnológicas en la agricultura urbana no solo fomenta la producción local y el consumo consciente, sino que también promueve un estilo de vida más conectado con el medio ambiente.

### Referencias

- Calvet-Mir, Laura, Gómez-Baggethun, Erik, & Reyes-García, Victoria. (2022). La multifuncionalidad de los huertos urbanos en la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, (107), 1-18. Recuperado: 03/04/2025, desde: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-05652022000100187](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-05652022000100187)
- FAO (2025). Agricultura urbana y periurbana. Recuperado: 03/04/2025, desde: <https://www.fao.org/urban-peri-urban-agriculture/en>
- Gao, J., Su, C., Miller, E., Lu, K., & Meng, Y. (2024). Rapid Mobile App Development for Generative AI Agents on MIT App Inventor. arXiv.
- Khattak, S. B., Ali, M., Rizwan, A., Ibrar, M., Umar, A. I., Din, S., & Rodrigues, J. J. P. C. (2023). Integration of IoT-enabled technologies and artificial intelligence (AI) for smart city scenario: Recent advancements and future trends. *Sensors*,
- MathWorks. (s.f.). *ThingSpeak™ IoT analytics platform*. MathWorks. <https://thingspeak.com/>
- UNAM (2025). Opuntia Robusta. Recuperado: 04/04/2024, desde: [http://biologia.fciencias.unam.mx/plantasvasculares/ArbolesArbustosFCiencias/Angiospermas/opuntia\\_robusta.html](http://biologia.fciencias.unam.mx/plantasvasculares/ArbolesArbustosFCiencias/Angiospermas/opuntia_robusta.html)
- Urías Borbón, D. S., & Ochoa De la Torre, J. M. (2020). Huertos urbanos como estrategia de resiliencia urbana en países en desarrollo. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (8), 63-78. Recuperado: 05/04/2025, desde: <https://www.redalyc.org/journal/6651/665170465004/html/>

## ESTIMACIÓN DE COEFICIENTE AMBIENTAL ÓPTIMO PARA EL DESARROLLO Y CULTIVO DE CHAYOTE VERDE LISO EN COSCOMATEPEC, VERACRUZ MEDIANTE INSTRUMENTACIÓN IOT

[ESTIMATION OF THE OPTIMAL ENVIRONMENTAL COEFFICIENT FOR THE DEVELOPMENT AND CULTIVATION OF SMOOTH GREEN CHAYOTE IN COSCOMATEPEC, VERACRUZ BY IOT INSTRUMENTATION]

Manuel Vichique Alegría<sup>1\*</sup>, Hipólito Ortiz Laurel<sup>1</sup>, Gabriel Calzada Lara<sup>2</sup>, Josafhat Salinas Ruiz<sup>1</sup> y Adriana Contreras Oliva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Posgraduados Campus Córdoba. Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, Méx. CP 94953. <sup>2</sup>Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí. Iturbide 73, 78622 Salinas, San Luis Potosí, Méx.

\*Autor de correspondencia: [vichique.manuel@colpos.mx](mailto:vichique.manuel@colpos.mx)

ORCID: 0009-0001-7057-5921

### Resumen

En México, el estado de Veracruz contribuye con una producción nacional de chayote [*Sechium edule* (Jacq.) Swartz] superior al 80%. Esta actividad agrícola es importante en diversos municipios de la zona centro del estado. Un cúmulo de variables han obstaculizado para que, la implementación de tecnologías asociadas a la Agricultura 4.0 y 5.0 no sea aún prioritaria entre los productores. Por esta razón, el cultivo de chayote es un candidato para implementar herramientas tecnológicas de vanguardia, que auxilien a los productores en la toma de decisiones y mejorar la resiliencia y sustentabilidad de esta actividad. El objetivo de este trabajo fue estructurar una metodología para el registro y análisis de variables ambientales que influyen en el desarrollo de la planta y fruto de chayote, entre ellas; la humedad relativa, la temperatura y radiación lumínica. En un módulo de producción se instalaron sensores para monitorear esas variables, obteniéndose registros superiores a 2000 lecturas diarias por sensor. Esta información es almacenada desde junio del presente año, en conjunto con un seguimiento a las actividades propias de la producción de frutos de chayote. Lo anterior permitirá generar un coeficiente o índice predictor de rendimiento de la producción, dicho de otro modo, al analizar las variables ambientales registradas y el volumen de biomasa generado por la planta (follaje y fruto) se podría estimar si la producción esperada es óptima o existe el riesgo de deficiencias las cuales podrían ser detectadas y corregidas antes de generar una afectación económica para el productor. Los datos de este trabajo fueron procesados mediante 2 entornos de programación que permiten visualizar y analizar el comportamiento del ambiente al que está expuesta la planta, además de generar información gráfica para compartirla con los productores.

**Palabras clave:** agricultura inteligente, Innovación, automatización, IoT en la agricultura, sostenibilidad agrícola.

### Abstract

In Mexico, the state of Veracruz contributes more 115ed 80% of the national production of chayote [*Sechium edule* (Jacq.) Swartz]. This agricultural activity is important in several municipalities in the central 115edalyc the state. A number of variables have prevented the implementation of technologies associated with Agriculture 4.0 and 5.0 from becoming a priority among producers. For this reason, chayote cultivation is a candidate for the implementation of cutting-edge technological 115edal that assist producers in 115edalyc115-making and improve the resilience and sustainability of this activity. The objective of this work was to structure a methodology for recording and analyzing environmental variables that influence the development of the chayote plant and fruit, including relative humidity, 115edalyc115ón115, and light radiation. Sensors were installed in a production module to monitor these variables, obtaining more 115ed 2,000 readings per day per sensor. This information has been stored since June of this year, together with monitoring of the activities involved in chayote fruit production. This 115eda allow us to generate a coefficient or index that predicts production yield. In other words, by analyzing the recorded environmental variables and the 115edalyc of biomass generated by the plant (foliage and fruit), we can estimate whether the expected

production is optimal 116edal there is a risk of deficiencies, which could be detected and corrected before causing economic damage to the producer. The data from this study were processed using two programming environments that allow the behavior of the environment to which the plant is exposed to be visualized and analyzed, in addition to generating graphical information to be shared with producers.

Key words: Smart 116edaly116ón116, innovation, automation, IoT in 116edaly116ón116, agricultural sustainability.

## Introducción

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que, para el año 2030, habrá 582 millones de personas con un alto índice de desnutrición. Ante este panorama, la FAO en conjunto con la OCDE, se pronuncian por fomentar una agricultura más sostenible y con mayor capacidad de adaptación, lo cual debe acompañarse con una transformación tecnológica que sea inclusiva, transmitiendo este conocimiento a los agricultores, especialmente a los de pequeña y mediana escala (OCDE/FAO, 2025). De acuerdo con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 2, conocido como “Hambre Cero” (Naciones Unidas, 2015), una de las recomendaciones prioritarias es que, los gobiernos nacionales impulsen activamente prácticas agrícolas más sustentables, además de mejorar la innovación en los métodos de evaluación y en la colecta de datos. Esto a su vez, permitiría respaldar intervenciones focalizadas, como; las destinadas a prevenir las pérdidas y el desperdicio de alimentos que ocurren irremediamente en las cadenas de producción extensivas.

La producción de chayote representa una red de valor económica significativa para diversas regiones de México, Centroamérica y el Caribe, al fungir como fuente local de empleo rural (Cadena *et al.* 2024). Este producto posee valor significativo al ser valorado como de exportación, el cual está estrechamente vinculado a los avances en su domesticación y a la obtención de variedades que cumplen con los estándares exigidos para su comercialización internacional (Avenidaño *et al.*, 2010). A pesar de que el chayote ha sido producido desde hace casi 50 años en Orizaba (Salvador Almazan, 2014), en el municipio de Coscomatepec en lo particular y otros circundantes de la región del Centro de Veracruz, existe la oportunidad de implementar mejoras tecnológicas que apoyen a los productores que se dedican a esta actividad (Cisneros Solano, 2003)

En este trabajo se muestra parte de la integración de un conjunto de herramientas tecnológicas con la finalidad de conocer el comportamiento de las variables ambientales y el desarrollo de biomasa de una planta de chayote cuya producción está destinada a la comercialización y exportación. Se emplearon 2 software de acceso libre los cuales registraron, almacenaron y analizaron la información de instrumentos no invasivos para la planta instalados en el área experimental. Se obtuvieron estadísticas de tendencia central de variables ambientales, un histórico de cambios en la biomasa de la planta (aumento de tensión en la estructura que soporta el tapanco) y gráficos que resumen esta información. Todo ello con la finalidad de integrar tecnologías novedosas en el ciclo productivo de chayote, y generar propuestas que puedan ser replicadas en otros trabajos

## Materiales y métodos

### Área experimental e instrumentación

Esta investigación se llevó a cabo en el municipio de Coscomatepec, Veracruz, dentro del rancho La Noria, calle 16 de septiembre número 1 colonia Lázaro Cárdenas, en las coordenadas N 19°04'33" y O 97°01'38" a 1500 msnm.

El proyecto se desarrolló en una estructura para el cultivo tecnificado de chayote, la cual consiste en 9 postes de plástico reciclado de 2.0 m de alto sobre el suelo como soporte, enterrados a una profundidad de aproximadamente 50 cm. Estos tienen una separación de 4 m entre cada poste. Para llevar a cabo esta investigación se colocaron 6 sondas de monitoreo con sus respectivas redes de servicio (electricidad e internet inalámbrico), tal y como se muestra en la Figura 1.

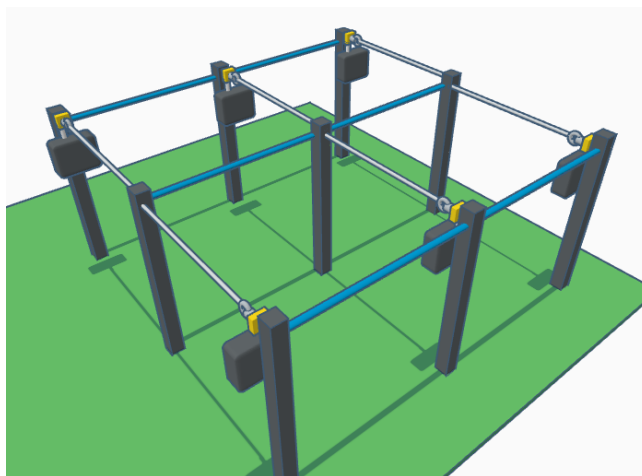


Figura 7. Representación en 3D del tapanco de 8x8 en el cual se está llevando a cabo la investigación.

En cada sonda se conectó una galga Sen10245 modificada con un tornillo de ojo M5 y accesorios para fijarse a cada poste, con la finalidad de soportar una línea de alambre galvanizado de un diámetro de 3.26 mm (awg #8) dispuesta de manera frontal entre postes paralelos. Dicho alambre funcionó como componente estructural del tapanco e igualmente, como soporte para el desarrollo de la biomasa de la planta de chayote, por lo que, la deformación por peso aplicada a ese alambre durante el crecimiento de la planta de chayote es captada inmediatamente en la galga Sen10245, al interpretar esta señal de deformación mediante un amplificador HX711 (incluido dentro de la sonda). Se registró el cambio de tensión (representado como peso) en la estructura, lo cual se analizó y visualizó con herramientas que serán explicadas más adelante. Los instrumentos instalados también contenían un sensor AHT10 para el registro de la temperatura ambiental y la humedad relativa. También se diseñaron y construyeron un conjunto de elementos para que un sensor BH1750 dispuesto en la intemperie pudiera registrar la exposición solar, lo que permitió determinar los lúmenes a los que la planta estuvo expuesta durante diferentes periodos de tiempo. La Figura 2 muestra un acercamiento a un instrumento instalado en campo, así como los accesorios de fijación para la galga Sen10245 y los elementos que protegen al sensor BH1750.



Figura 8. Módulo de registro instalado en campo y sus respectivos accesorios.

El controlador mecatrónico utilizado en estos instrumentos se compone de: una tarjeta de circuito impreso diseñada para este propósito, la cual permite que se pueda realizar mantenimiento en campo; es decir, el diseño de los instrumentos permite el cambio de componentes de reemplazo de manera práctica, sin necesidad de retirar todo el equipo de su ubicación. La placa de circuito impreso admite alimentación de corriente alterna (si se añade un convertor Hlk-pm01, el cual ya tiene un socket designado) o corriente directa, ya sea desde una fuente de alimentación de 5 V o utilizando modelos específicos de baterías. En este caso, todos los instrumentos tienen un par de baterías modelo 18650 que son alimentadas mediante un módulo tp4056, el cual, a su vez, está conectado a un eliminador de 5 V de corriente directa. Este último es energizado por una red eléctrica previamente instalada en el tapanco. La Figura 3 muestra la placa diseñada del circuito impreso, la tarjeta controladora Wemos R2 mini, una pantalla OLED I2C de 128x64 píxeles y un convertor Hlk-pm01.



Figura 9. Tarjeta de circuito impreso aplicada en los instrumentos del experimento.

### Nutrición y manejo de la planta de chayote en el área experimental

En este caso, la planta del área experimental se desarrolló en una estructura “individual”, conocida como tapanco de 8x8 m, la cual es una estructura tecnificada que es utilizada de manera convencional en la producción de chayote, trabajar el experimento con esta construcción que permite apreciar la producción de una planta aislada, ya que, en los tapancos convencionales, las enredaderas de diversas plantas convergen entre sí y aunque se puede estimar la producción por hectárea, resulta difícil medir la producción individual de una planta. El área experimental tuvo el mismo manejo agronómico que las plantas en tapancos convencionales para producción y exportación. La variedad de chayote en esta investigación es la misma variedad que cultivan los productores de la región.

### Procedimiento y nutrición al cultivo de chayote en los meses de marzo a septiembre.

El programa de nutrición edáfica consistió en una combinación de elementos minerales, compuestos orgánicos y microorganismos benéficos. Esto incluyó nitrógeno (en forma nítrica), fósforo y potasio en proporciones equilibradas, junto con calcio para fortalecimiento de tejidos vegetales, además de ácidos húmicos para mejorar la estructura del

suelo (aglutinantes naturales para incrementar la porosidad), la retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes, junto con hormonas vegetales (auxinas y giberelinas) para desarrollo radicular y elongación celular. En la parte microbiana, se incluyeron bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico como *Azotobacter vinelandii* y *Clostridium pasteurianum*; bacterias nitrificantes como *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* y *Nitrosococcus* y bacterias solubilizadoras de fósforo como *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus megaterium*. También se integraron cepas antagónicas de patógenos, como *Bacillus subtilis*, *Bacillus thuringiensis* y diversos actinomicetos del género *Streptomyces* y *Frankia*, capaces de producir antibióticos naturales, sideróforos y enzimas líticas. Adicionalmente, se incluyeron microorganismos degradadores (*Lactobacillus* spp.) con capacidad de acelerar la mineralización de la materia orgánica y bacterias de tipo quitinolítico para suprimir hongos y nematodos del suelo. Este conjunto microbiano tiene la capacidad de producir ácidos orgánicos, fitohormonas, polisacáridos y compuestos antifúngicos para aumentar la disponibilidad de poros en el suelo, incrementar la fijación y asimilación de nutrientes, degradar residuos y contaminantes, encapsular metales pesados y fortalecer la resistencia sistémica de la planta frente a condiciones de estrés hídrico.

La nutrición mediante aplicaciones foliares aportó L-aminoácidos de origen vegetal y glicina betaína, que actuaron como osmoprotectores y mitigadores a altas temperaturas y baja precipitación. La formulación priorizó la cobertura de micronutrientes esenciales, especialmente calcio (Ca) y boro (B), los cuales fueron aplicados en forma de quelatos de alta asimilación para asegurar su movilidad y eficacia en la formación de reservas y fructificación. Paralelamente, se ajustó la incorporación de macronutrientes primarios, con énfasis en fósforo (P) con la finalidad de impulsar la activación radicular y lograr una mejora energética, ya que al ser el componente central de la molécula de ATP, éste tiende a elevar la eficiencia fotosintética. Esta acción fue complementada con Zinc (Zn) (cofactor de auxinas) y ácidos fúlvicos, que, junto con extractos de algas marinas, reforzaron la capacidad de la planta para absorber y translocar nutrientes de manera eficiente, manteniendo la funcionalidad celular bajo condiciones ambientales adversas.

De forma paralela a la nutrición, se realizaron aplicaciones preventivas alternadas (para evitar la generación de resistencia) con otros productos biorracionales. Para las enfermedades típicas del chayote, se implementaron tratamientos preventivos con zinc y cobre, complementados con fungicidas biológicos de amplio espectro los cuales contienen metabolitos antifúngicos naturales y extractos vegetales específicos (en este caso; extracto de semilla de *Citrus paradisi* y extracto de *Camellia sinensis*) los cuales actúan por contacto, alterando la membrana celular de los hongos, inhibiendo su crecimiento y reproducción. Los compuestos fenólicos, flavonoides, polifenoles y catequinas presentes en estos extractos generan estrés oxidativo y bloquean enzimas esenciales de los patógenos, ofreciendo un efecto preventivo sinérgico y con bajo riesgo de resistencia. Este manejo se aplicó de manera preventiva para controlar enfermedades fúngicas como *Phytophthora*, *Fusarium* y "mildiu", los cuales son comunes en el cultivo de chayote,

Cabe mencionar que los cortes de maleza fue cada 15 días y deshojes cada 30 días aproximadamente, esto con la finalidad de disminuir la competencia por nutrientes en el suelo y mejorar la circulación de aire y exposición a la luz del sol de la planta.

### **Registro de información en la nube**

La placa de desarrollo Wemos mini r2 admite que su microprocesador ESP8266 pueda realizar una conexión inalámbrica Wi-Fi, con la finalidad de comunicarse a otros dispositivos en la misma red, o como en este caso, conectarse a un servicio externo para recibir y transmitir información. Esta placa fue programada de manera convencional con el auxilio del entorno de desarrollo de la aplicación en línea de Arduino Cloud (Arduino SA, 2024). Este programa precarga las librerías necesarias para comunicarse con los componentes de la sonda, ésta realiza una programación inicial, lee los datos recopilados por los sensores, muestra estos datos en la pantalla OLED I2C de 128x64 píxeles y dirige esta información al servidor de Arduino Cloud mediante la conectividad Wi-Fi, con una periodicidad de aproximadamente 150 milisegundos. Aunque en la práctica, las lecturas son almacenadas cada 4 segundos aproximadamente. En la Figura 4 se muestran datos almacenados de humedad, temperatura y peso de la sonda número 4. Es importante mencionar que, en el gráfico de peso, se observa una disminución de tensión en ese alambre de casi 20 kilogramos, este fenómeno es debido al corte de frutos (cosecha).

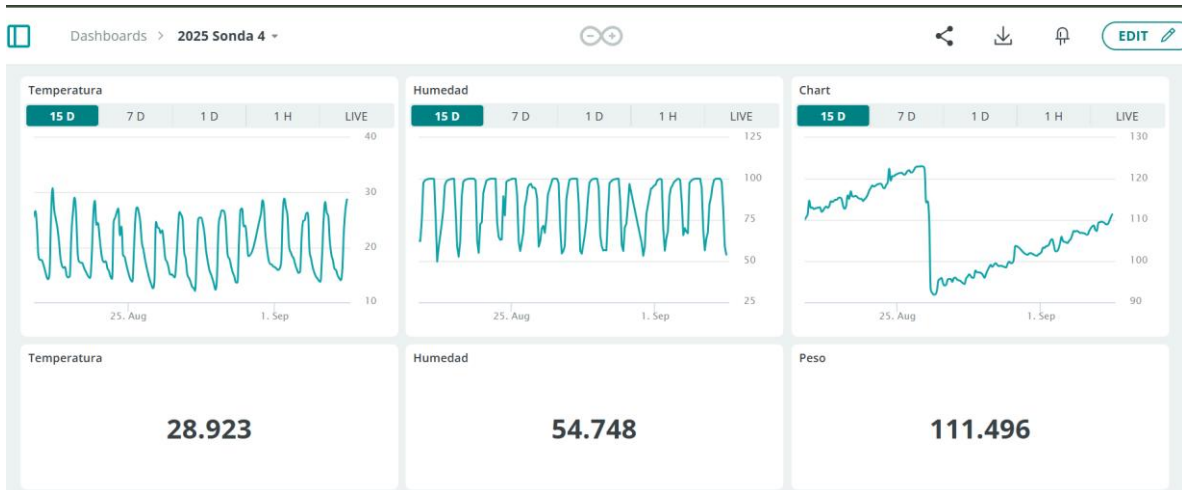


Figura 10. Datos históricos de 15 días de la sonda 4.

Al visualizar esta información, es posible apreciar el efecto de las actividades culturales en el desarrollo de la planta sobre el tapanco. La Figura 5 muestra una caída de tensión (disminución de peso) debido al “deshoje” realizado en el área experimental. Esta actividad cultural disminuye la proliferación de enfermedades en la planta (afectaciones provocadas por hongos principalmente) e incrementa la exposición de los frutos a la luminosidad solar y facilita su posterior recolección. Al tener un respaldo tecnológico en este tipo de actividades, es posible establecer una relación entre el crecimiento de biomasa y la aplicación de distintos tratamientos, o bien, estudiar con más detalle el efecto del deshoje en la regeneración de biomasa de la planta y su efecto (si es que existe) en la calidad del producto.



Figura 11. Izquierda, gráfico de tensión, derecha, fotografía de un deshoje en el área experimental.

### Análisis de datos y generación de reportes con pycharm

La aplicación web de Arduino Cloud permite descargar los datos almacenados en formato .csv de un intervalo de tiempo que el usuario establezca. Lo anterior es útil para realizar análisis en periodos de tiempo específicos. El experimento consistió en 6 sondas, las cuales registraron 4 variables en monitoreo constante (porcentaje de humedad relativa, temperatura ambiental, exposición a la luz y tensión en línea de tapanco), lo que da lugar a 24 diferentes lecturas que pueden ser registradas de manera simultánea. Para el análisis de datos, se descargó la información almacenada previa al día del corte de chayote y se procedió al análisis de la información por periodo de cortes, lo cual es un espacio temporal que abarca algunos días antes de la fecha en que se supo que se cortó el fruto de la planta hasta el día del corte. La cantidad de lecturas por sensor en estos periodos oscila de 8500 registros y como se muestra

en la Figura 6, se visualiza, tanto la fecha y hora de los datos registrados, así como el valor reportado por el sensor. Si bien esta información puede ser observada y analizada mediante Excel se optó por procesar los datos con Pycharm (JetBrains s.r.o., 2024) y su lenguaje principal Python.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	time	value	time	value	time	value	time	value	time	value	time	value
2	2025-06-2	86.74011	2025-06-2	47.60685	2025-06-2	73.5033	2025-06-2	61.34195	2025-06-2	61.11946	2025-06-2	57.08485
3	2025-06-2	83.26702	2025-06-2	48.00034	2025-06-2	72.06078	2025-06-2	63.978	2025-06-2	58.63457	2025-06-2	55.41601
4	2025-06-2	82.80315	2025-06-2	50.74711	2025-06-2	73.98634	2025-06-2	64.2477	2025-06-2	59.9534	2025-06-2	54.05302
5	2025-06-2	82.98883	2025-06-2	53.43428	2025-06-2	74.0695	2025-06-2	62.82759	2025-06-2	59.99641	2025-06-2	54.86584
6	2025-06-2	83.40273	2025-06-2	53.40061	2025-06-2	74.28093	2025-06-2	64.34898	2025-06-2	62.04157	2025-06-2	54.27294
7	2025-06-2	82.11365	2025-06-2	54.02832	2025-06-2	76.66216	2025-06-2	63.53779	2025-06-2	62.92982	2025-06-2	54.28877
8	2025-06-2	82.33176	2025-06-2	57.71151	2025-06-2	73.51617	2025-06-2	65.25011	2025-06-2	61.50112	2025-06-2	57.57847
9	2025-06-2	52.72312	2025-06-2	56.70967	2025-06-2	73.82346	2025-06-2	67.39597	2025-06-2	62.26015	2025-06-2	57.25842
10	2025-06-2	53.16734	2025-06-2	55.66177	2025-06-2	73.34166	2025-06-2	65.32182	2025-06-2	61.51934	2025-06-2	56.08692
11	2025-06-2	51.89981	2025-06-2	56.94876	2025-06-2	73.22407	2025-06-2	66.88099	2025-06-2	61.42626	2025-06-2	56.36854
12	2025-06-2	50.19045	2025-06-2	59.96647	2025-06-2	72.14842	2025-06-2	65.88754	2025-06-2	59.92041	2025-06-2	59.16586
13	2025-06-2	50.34542	2025-06-2	60.05516	2025-06-2	71.22392	2025-06-2	65.41548	2025-06-2	60.45589	2025-06-2	60.48641
14	2025-06-2	53.70245	2025-06-2	61.31363	2025-06-2	70.13721	2025-06-2	67.51299	2025-06-2	60.8078	2025-06-2	59.30605
15	2025-06-2	54.38795	2025-06-2	59.85489	2025-06-2	70.07437	2025-06-2	65.23523	2025-06-2	59.17501	2025-06-2	60.79502
16	2025-06-2	50.1502	2025-06-2	61.39164	2025-06-2	71.96893	2025-06-2	64.52094	2025-06-2	58.00877	2025-06-2	61.13968
17	2025-06-2	50.44985	2025-06-2	62.70771	2025-06-2	70.47558	2025-06-2	63.7763	2025-06-2	57.66077	2025-06-2	63.22784
18	2025-06-2	51.70517	2025-06-2	63.14039	2025-06-2	71.24634	2025-06-2	64.62975	2025-06-2	58.70934	2025-06-2	60.77633
19	2025-06-2	54.05035	2025-06-2	64.81104	2025-06-2	72.17645	2025-06-2	66.02411	2025-06-2	58.61015	2025-06-2	60.28891
20	2025-06-2	55.14345	2025-06-2	63.90772	2025-06-2	69.83728	2025-06-2	65.63712	2025-06-2	57.57599	2025-06-2	60.27298
21	2025-06-2	53.86944	2025-06-2	62.83598	2025-06-2	68.83125	2025-06-2	65.38029	2025-06-2	60.90012	2025-06-2	60.20184
22	2025-06-2	56.77491	2025-06-2	64.46867	2025-06-2	69.11848	2025-06-2	66.36911	2025-06-2	60.72354	2025-06-2	61.6354

Figura 12. Datos de humedad relativa en csv.

La información registrada se agrupó en intervalos desde días previos al día del corte de chayote y hasta el día en que se cosechó el fruto, subdividiendo esos datos por variable, para finalmente encontrar medidas de tendencia central y determinar cuáles fueron las condiciones ambientales de la planta en el área experimental. La Figura 7 muestra la organización de la información previamente mencionada



Figura 13. Organización de la información registrada por los instrumentos.

La organización de la programación se hizo con “scripts” individuales, los cuales se ejecutan uno a la vez, dependiendo de la información que se requiera analizar y mostrar. Para ello, se necesita especificar la ruta donde se tienen almacenados los archivos cvs y la ruta de salida, donde se almacenarán los gráficos y la información analizada. Estos “scripts” o códigos hacen uso de un conjunto de librerías que cumplen funciones complementarias para el análisis y la visualización de datos. Entre estas librerías se encuentran; “OS”, esta permite interactuar con el sistema operativo, facilita la gestión de rutas y archivos en el ordenador; pandas, agiliza la lectura y manipulación de datos estructurados mediante “DataFrames”; numpy, proporciona soporte para cálculos numéricos eficientes con arreglos multidimensionales; scipy.stats, aporta herramientas estadísticas para realizar pruebas y análisis inferenciales; LinearRegression de sklearn.linear\_model, ajusta modelos de regresión lineal y realizar predicciones; matplotlib.pyplot y seaborn, grafican la información analizada y finalmente win32com.client, permite automatizar aplicaciones de Microsoft Office (como Excel o Word) desde Python, facilitando la exportación o manipulación de resultados directamente en esos programas. En la Figura 8 se muestra parte del panel de programación en Pycharm, se aprecian las librerías mencionadas y algunos de los “scripts” usados en el proyecto.

```

1 import os
2 import pandas as pd
3 import numpy as np
4 from scipy import stats
5 from sklearn.linear_model import LinearRegression
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 import seaborn as sns
8 import win32com.client as win32
9
10 # --- Rutas ---
11 carpeta_entrada = r"C:\Users\vichy\PycharmProjects\Análisisdatoschayote\análisis
12 carpeta_salida = os.path.join(carpeta_entrada, "estadisc_descp_resumenes")
13 os.makedirs(carpeta_salida, exist_ok=True)
14
15 # --- Función para leer Excel o convertir ---

```

Figura 14. Captura de pantalla con parte del código usado en el experimento.

## Resultados

En esta investigación fue posible analizar la información recopilada por la instrumentación y, con ello, generar datos con el fin de detectar una tendencia central, así como compararla con diversos gráficos que muestran las condiciones ambientales de la planta durante su monitoreo. La Figura 9 es el resumen de las estadísticas de tendencia central de las lecturas recopiladas en el experimento en orden de lumen, humedad relativa y temperatura ambiental. Este resumen (generado también por un “script” en PyCharm) agrupa los datos de 7 cortes, específicamente de los días 2 de julio, 8 de julio, 18 de julio, 22 de julio, 29 de julio, 20 de septiembre y 28 de septiembre.

Lúmenes	Media_global	Mediana_global	Moda_global	Std_global	Min_global	Max_global	Cuartil_25	Cuartil_50	Cuartil_75
	8904.743416	1295.6455	0	11127.1826	0	29333.346	0	1287.1325	19058.0681
% Hum R	Media_global	Mediana_global	Moda_global	Std_global	Min_global	Max_global	Cuartil_25	Cuartil_50	Cuartil_75
	85.39358631	92.45348507	53.4614722	13.1131314	53.46147	99.694256	74.6948	91.413128	96.5408661
Temp °C	Media_global	Mediana_global	Moda_global	Std_global	Min_global	Max_global	Cuartil_25	Cuartil_50	Cuartil_75
	19.46449664	17.63226256	13.6844797	4.47504195	13.68448	28.560152	15.373	18.3132185	23.3683963

Figura 15. Medidas de tendencia central de los datos analizados.

Para cada sección de datos analizados fue posible generar promedios por hora, de las variables previamente mencionadas y convertir esta información en mapas de calor (Heatmap) para facilitar la interpretación de esta información.

La Figura 10 muestra el resumen de las lecturas de temperatura ambiental de los días 20 al 28 de agosto, donde la intensidad del color rojo se relaciona con una lectura alta de hasta un máximo de 28 °C aproximadamente; cada renglón representa la lectura de un sensor de un instrumento para la recopilación de la información.

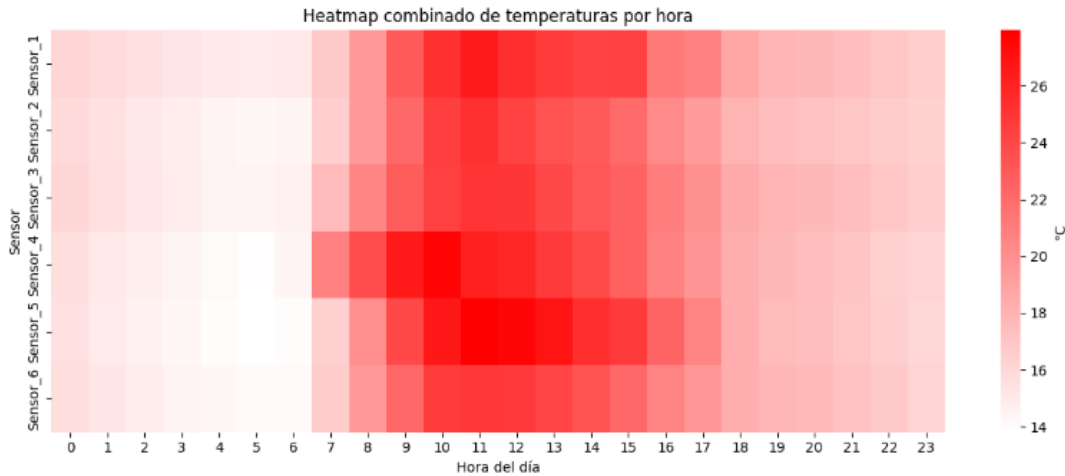


Figura 16. Heatmap muestra la temperatura registrada por sensor y por hora del día.

De forma similar se integraron las lecturas de humedad relativa. La Figura 11 es la recopilación de las lecturas de humedad relativa de los días 20 al 28 de agosto, dónde la intensidad de color azul es proporcional al promedio diario de humedad relativa de ese sensor, en esa hora del día.

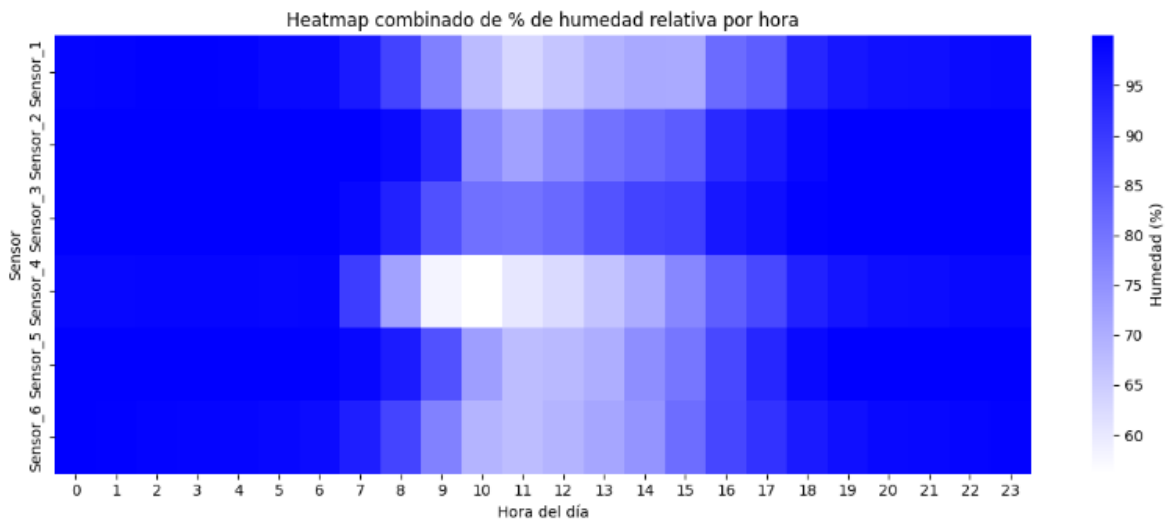


Figura 17. Heatmap muestra la humedad relativa registrada por sensor y por hora del día.

Respecto a los sensores de luz, los sensores 3 y 5 fueron colocados debajo del follaje de la planta de chayote, esto con la finalidad de conocer las diferencias entre la luz recibida en la superficie y en la parte interior del tapanco. La Figura 12 muestra el resumen de las lecturas de los días 20 a 28 de agosto agrupando por hora del día, los lúmenes registrados por cada instrumento, siendo la cercanía con el valor amarillo el valor más alto en lúmenes registrado por las sondas (más de 50 000), mientras que, en la ausencia de luz de las 19 a 5 horas (noche y parte de la madrugada), se aprecia que el valor de esta magnitud es 0 en todos los sensores.

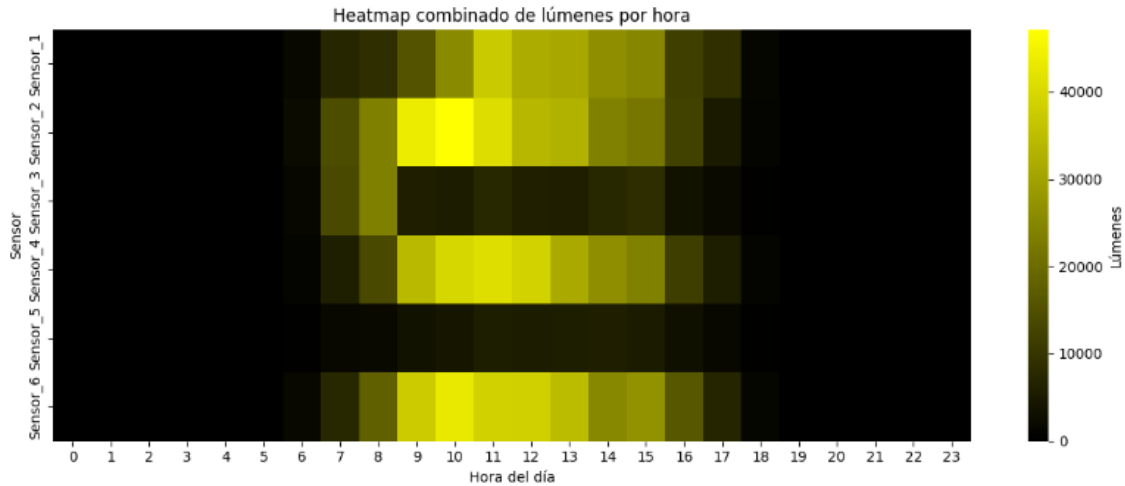


Figura 18 Heatmap – resumen de la exposición a la luz en lúmenes por sensor y por hora del día.

La Figura 13 es un fragmento de tiempo de datos, obtenido de la aplicación de Arduino Cloud, donde se aprecia la diferencia en lúmenes de los sensores 4, 5 y 6, donde el sensor 5 se mostró siempre en un valor menor a 10 000 lúmenes, ya que dicho sensor siempre estuvo por debajo del follaje de la planta de chayote.

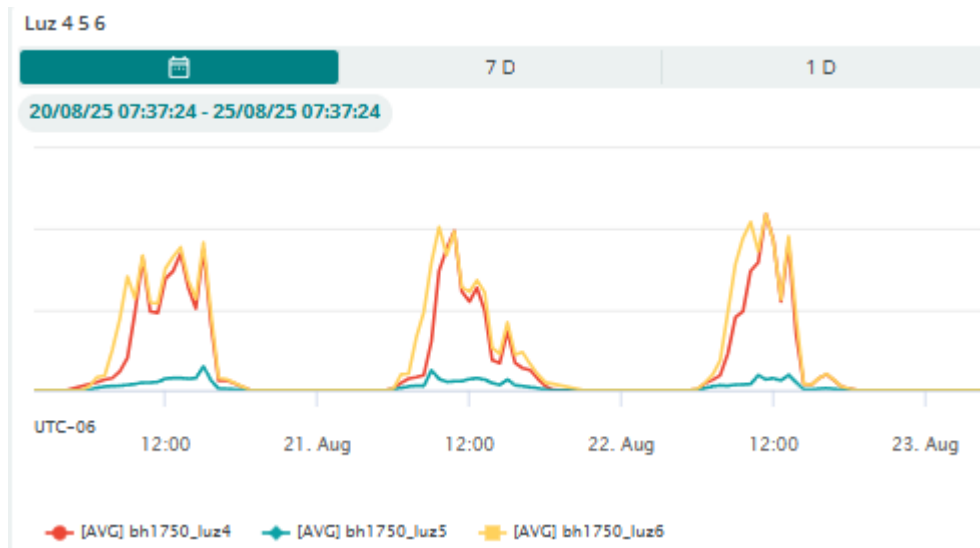


Figura 19. Información registrada por los sensores de luz 4, 5 y 6.

Respecto al peso registrado, se han graficado los datos generados en las fechas de corte y se ha optado por mostrar, en forma de regresión lineal, el comportamiento del peso únicamente con fines ilustrativos. La Figura 14 es el valor promedio por día de la evolución del peso de uno de los alambres del tapanco, propiamente el alambre conectado a la galga de la sonda 2. La correlación entre variables se generó únicamente como complemento en el “script” de pycharm para futuras investigaciones.

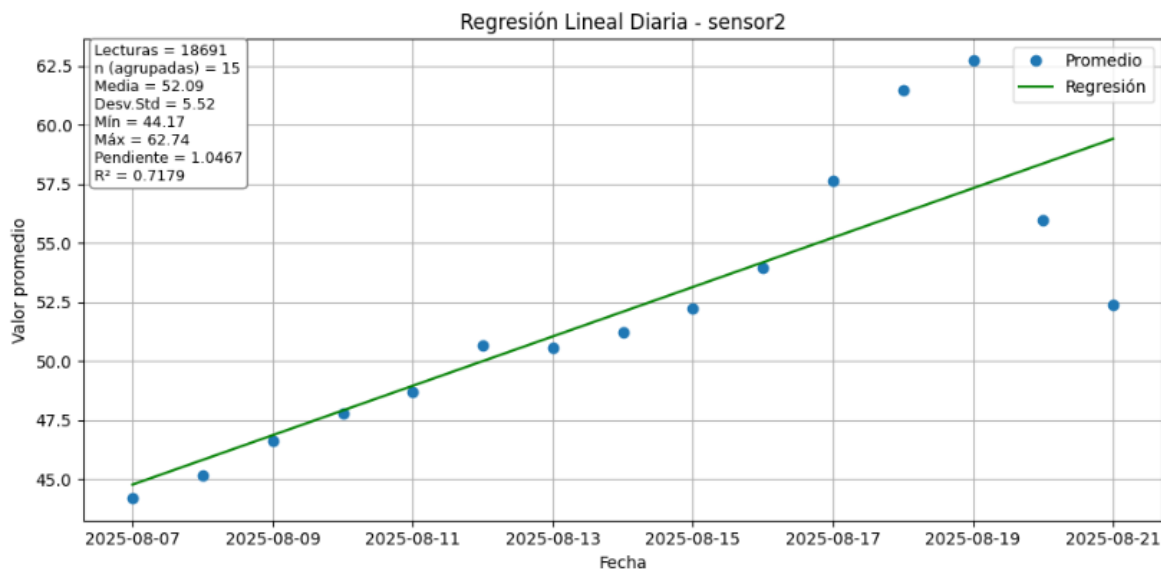


Figura 20. Promedio diario de peso registrado por instrumento en campo.

### Conclusiones y discusión

Fue posible integrar tecnologías emergentes e instrumentos para el monitoreo del ciclo productivo de chayote., con ello se almacenaron una cantidad considerable de datos los cuales fueron analizados con diferentes “scripts” de pycharm para generar información gráfica acerca del ambiente en que se desarrolló la planta del área experimental.

Una planta de chayote verde puede producir más de 25 kg de fruto por semana si mantiene un promedio de 85% de humedad relativa, 19.5°C de temperatura ambiente y más de 30 000 lúmenes de las 10 a las 14 horas del día, incluyendo un corte de malezas cada 15 días, un deshoje cada 20 días y un programa de nutrición como el descrito en este trabajo.

Se planea en trabajos a futuro implementar modelos de predicción para aproximar de forma precisa, la relación entre las variables ambientales que afectan a la planta de chayote y a su rendimiento. Propiamente, la información recopilada en este periodo funcionará como consulta, ya que la planta del área experimental pudo generar más de 25 kilogramos óptimos en cada corte en las fechas señaladas. Para estudios posteriores se puede considerar, tanto el manejo aplicado a la planta como las variables registradas en las fechas de cortes.

El rendimiento registrado de la planta (25 kg) para empaque en cada corte utilizando el manejo previamente descrito puede servir como referencia para los productores de chayote, técnicos o investigadores, ya que el rendimiento por planta y por corte no es una variable utilizada de forma frecuente en este ámbito, y podría utilizarse en otros métodos o sistemas productivos de chayote en los cuales se busque una producción pequeña y controlada, como un traspatio o un área experimental para otros estudios.

La integración de tecnologías emergentes en el monitoreo del cultivo permitió obtener información precisa sobre las condiciones ambientales de la planta en el área experimental en tiempo real y con registro histórico, esto facilitó el análisis de variables de interés en el chayote como la humedad, la temperatura y la luminosidad. El uso de Pycharm y Python permitió procesar grandes volúmenes de datos y generar representaciones gráficas que facilitaron la interpretación del comportamiento del cultivo. Este tipo de análisis contribuye a establecer relaciones entre las condiciones ambientales y el rendimiento de la planta, lo que representa un avance hacia la aplicación de modelos predictivos en sistemas agrícolas. Así, el presente trabajo demuestra el potencial de la automatización y el análisis computacional como estrategias viables para la toma de decisiones informadas en el manejo del chayote.

## Agradecimientos

Se agradece a SECIHTI por la beca otorgada. Se agradece al señor José Miguel Martínez González por las facilidades para trabajar en su propiedad, igualmente al Ing. José Luis Bretón Vargas, “Gesagro” y “Surty planta & CO” por su acompañamiento en el desarrollo del proyecto

## Bibliografía

- FAO, IFAD, UNICEF, WFP y WHO. (2024). The state of food security and nutrition in the world 2024: Financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cd1254en>
- Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Resolución A/RES/70/1). Organización de las Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/es/goals>
- FAO y OCDE. (2024). Perspectivas Agrícolas 2025–2034. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.
- Cadena-Iñiguez, J., Olguín-Hernández, G., Aguirre-Medina, J. F., Arévalo-Galarza, M. L., Cadena-Zamudio, D. A., Ruiz-Posadas, L. M. del M., y Cisneros-Solano, V. M. (2024). Reduction of pest organisms and improvement of the quality and biosecurity of edible fruits of chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.). In: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.114383>
- Avendaño-Arrazate, C. H., Cadena-Iñiguez, J., Arévalo-Galarza, M. L. C., Campos-Rojas, E., Cisneros-Solano, V. M., y Aguirre-Medina, J. F. (2010). Las variedades del chayote mexicano, recurso ancestral con potencial de comercialización. Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en México, A.C., México.
- Salvador-Almazán, A. J. (2014). Fenología del cultivo de chayote bajo las condiciones agroclimáticas de la región de Coscomatepec, Alpatláhuac y Huatusco, Veracruz. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/286038ASDA>
- Cisneros-Solano, V. M. (2003). La producción de chayote en Coscomatepec, Ver. Y la necesidad de ordenamiento territorial. Tesis doctoral, Universidad Autónoma Chapingo, México. Recuperado de <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/2599>
- Arduino S.A. (2024). Arduino Cloud (Versión 1.0) [Software]. <https://cloud.arduino.cc/>
- JetBrains s.r.o. (2024). PyCharm Community (Versión 2024.2) [Software]. <https://www.jetbrains.com/pycharm/>

## DISEÑO DE UNA PLATAFORMA PARA LA GESTIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS EN ESTANQUES ACUÍCOLAS

[DESIGN OF A PLATFORM FOR THE MANAGEMENT OF CRITICAL PARAMETERS IN AQUACULTURE PONDS]

Abimael Cruz Vences<sup>1</sup> José Ulises Meza Moreno<sup>2</sup>, Mario Salvador Castro Zenil<sup>3\*</sup>, Guillermo Rey Peñaloza Mendoza<sup>3</sup>

<sup>1</sup>TecNM Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, Estudiante de la Ingeniería en Administración. <sup>2</sup>TecNM Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro. Estudiante de la Ingeniería Biomédica <sup>3</sup>TecNM Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, Academia de Ingeniería Biomédica.

\*Autor de correspondencia: [mcastro@itspa.edu.mx](mailto:mcastro@itspa.edu.mx)

ORCID:0000-0001-6880-1072

### Resumen

La acuicultura constituye una actividad estratégica para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico en zonas rurales de México. La mayoría de los pequeños y medianos productores carecen de herramientas tecnológicas para monitorear de forma efectiva los parámetros críticos del agua en sus estanques, como temperatura, pH, turbidez y nivel, lo que incrementa el riesgo de enfermedades, mortalidad de peces y pérdidas económicas. Ante esta problemática, se desarrolló un sistema inteligente de bajo costo basado en Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo ambiental en estanques acuícolas. El objetivo del proyecto fue diseñar e implementar un sistema de medición remota y automatización de respuesta que permitiera mejorar las condiciones de cultivo en este caso de mojarra, utilizando componentes accesibles y tecnologías abiertas. La metodología consistió en la integración de sensores sumergibles conectados a un microcontrolador ESP32, programado en C++ (Arduino IDE), con conectividad Wi-Fi para el envío de datos a un ecosistema web. Se desarrolló además una carcasa impresa en 3D para protección ambiental y se incorporó un módulo relé para activar bombas de recirculación de forma automática. Los resultados mostraron que el sistema fue capaz de registrar en tiempo real las variaciones en los parámetros acuáticos con alta estabilidad, emitiendo alertas automáticas ante condiciones fuera del rango seguro. Su bajo costo y facilidad de uso lo hacen viable para su implementación en comunidades rurales sin necesidad de personal especializado.

**Palabras clave:** Mojarra, IoT, estanques, Arduino.

### Abstract

Aquaculture is a strategic activity for food security and economic development in rural 127edal of Mexico. Most small and 127edaly-sized producers lack the technological 127edal to effectively monitor critical 127edal parameters in their ponds, such as 127edalyc127ón127, pH, turbidity, and level, which increases the risk of disease, fish mortality, and economic losses. In response to this problem, a low-cost intelligent system based on the Internet of Things (IoT) was developed for environmental monitoring in aquaculture ponds. The objective of the project was to design and implement a remote measurement and response automation system that would improve farming conditions in the case of mojarra, using accessible components and open technologies. The methodology consisted of integrating submersible sensors connected to an ESP32 microcontroller, programmed in C++ (Arduino IDE), with Wi-Fi connectivity for sending data to a web ecosystem. A 3D-printed casing was also developed for environmental protection, and a relay module was incorporated to automatically 127edalyc127 recirculation pumps. The results showed that the system was capable of recording variations in aquatic parameters in real time with high stability, issuing automatic alerts when conditions fell outside the safe range. Its low cost and ease of use make it viable for implementation in rural communities without the need for specialized personnel.

**Keywords:** Mojarra, IoT, ponds, Arduino.

## Introducción

La acuicultura, un sector agrícola fundamental para satisfacer la creciente demanda mundial de productos del mar (Dhinakaran *et al.*, 2023), se enfrenta a desafíos complejos relacionados con el mantenimiento de condiciones óptimas para la vida acuática (Dhinakaran *et al.*, 2023). Tradicionalmente, la gestión de las granjas piscícolas dependía de la intervención manual y de datos limitados en tiempo real, lo que provocaba ineficiencias, posibles impactos ambientales y limitaciones económicas (Dhinakaran *et al.*, 2023). La emergencia de las tecnologías IoT ha transformado este panorama, permitiendo un enfoque preciso, proactivo y automatizado en la gestión de la piscicultura (Danh *et al.*, 2020; Dhinakaran *et al.*, 2023). Los sistemas IoT, al integrar sensores, actuadores y algoritmos avanzados, ofrecen la capacidad de monitorear y controlar en tiempo real los parámetros críticos del agua, lo que resulta en mejoras significativas en la salud de los peces, la eficiencia de los recursos y, en última instancia, la rentabilidad y sostenibilidad del sector (Dhinakaran *et al.*, 2023). Por otro lado, la calidad del agua es el factor más crítico para el éxito de la acuicultura, ya que afecta directamente la eficiencia alimenticia, la tasa de supervivencia y el crecimiento de los peces (Danh *et al.*, 2020; Olanubi *et al.*, 2024). Los sistemas IoT actuales permiten el monitoreo continuo y en tiempo real de parámetros físico-químicos esenciales, eliminando la necesidad de mediciones manuales ineficientes y que consumen mucho tiempo y mano de obra (Danh *et al.*, 2020; Flores-Iwasaki *et al.*, 2025; Olanubi *et al.*, 2024). Estos sistemas permiten la detección temprana de desviaciones de los niveles óptimos, lo que posibilita una acción correctiva inmediata (Danh *et al.*, 2020; Flores-Iwasaki *et al.*, 2025). Se pueden configurar alertas y notificaciones automáticas (vía SMS o WhatsApp) para informar a los agricultores cuando los parámetros están fuera de rango, permitiendo respuestas rápidas (Danh *et al.*, 2020; Olanubi *et al.*, 2024). Además, la interfaz de monitoreo en tiempo real y control permite a los operadores acceder a los datos históricos para el análisis de tendencias y realizar ajustes manuales si es necesario (Dhinakaran *et al.*, 2023). Los sistemas IoT contribuyen a la rentabilidad al reducir significativamente los costos operativos y la necesidad de mano de obra (Dhinakaran *et al.*, 2023; Olanubi *et al.*, 2024). La automatización del monitoreo y control elimina la dependencia de la experiencia del agricultor y de las mediciones manuales (Danh *et al.*, 2020; Flores-Iwasaki *et al.*, 2025).

## Materiales y métodos

### Parámetros físicos y químicos monitoreados en acuicultura

**Temperatura:** Es la propiedad física más importante del agua, afectando todos los procesos químicos y biológicos de los peces, incluyendo la respiración, alimentación, metabolismo, reproducción y crecimiento (Olanubi *et al.*, 2024). Se monitorea en el 92.9% de los estudios, con sensores como el DS18B20 (Flores-Iwasaki *et al.*, 2025; Olanubi *et al.*, 2024).

**pH:** Mide la concentración de iones de hidrógeno, indicando acidez o basicidad (Olanubi *et al.*, 2024). Es el parámetro más estudiado, presente en el 98.2% de los casos, con sensores como SEN0169 y SEN0161 (Flores-Iwasaki *et al.*, 2025; Olanubi *et al.*, 2024). El rango óptimo para la producción de peces de agua dulce es entre 6.5 y 9.0 (Olanubi *et al.*, 2024).

**Oxígeno Disuelto (OD):** Crítico para la supervivencia y el crecimiento de los peces (Olanubi *et al.*, 2024). Monitoreado en el 62.5% de los estudios, utilizando sensores como SEN0237, MAX30102 y OxyGuard DO (Flores-Iwasaki *et al.*, 2025). Niveles por debajo de 2 mg/L son letales y por debajo de 4 mg/L afectan el crecimiento (Olanubi *et al.*, 2024).

**Salinidad:** Importante para proteger a los animales acuáticos de impactos ambientales adversos (Danh *et al.*, 2020).

**Turbidez:** Indica la cantidad de sólidos suspendidos en el agua, afectando la penetración de la luz (Olanubi *et al.*, 2024). Monitoreado en el 28.9% de los casos con sensores como SEN0189 (Flores-Iwasaki *et al.*, 2025; Olanubi *et al.*, 2024).

**Potencial de Oxidación-Reducción (ORP):** Refleja la limpieza del agua y su capacidad para resolver contaminantes, especialmente en el fondo del estanque (Danh *et al.*, 2020).

**Amoníaco (TAN):** Un subproducto tóxico del metabolismo de los peces y la descomposición de materia orgánica (Olanubi *et al.*, 2024). Monitoreado con sensores como MQ137 y MQ135 (Flores-Iwasaki *et al.*, 2025).

**Nivel del agua:** Afecta la temperatura y los niveles de oxígeno (Wibisono & Jayadi, 2024). Sensores ultrasónicos son comúnmente usados (Wibisono & Jayadi, 2024).

### Consideraciones para la eficiencia del sistema de control

**Optimización de la Alimentación:** Algoritmos de aprendizaje automático, como los Gradient Boosting Machines (GBMs), optimizan dinámicamente los programas de alimentación basándose en las condiciones ambientales en tiempo real (Dhinakaran *et al.*, 2023). Esto lleva a una reducción significativa del desperdicio de alimento y mejora la eficiencia de la conversión alimenticia (FCR), crucial para la rentabilidad, ya que el alimento representa una parte importante de los gastos (Dhinakaran *et al.*, 2023; Olanubi *et al.*, 2024). Un FCR más bajo significa que los peces ganan peso más rápido con la misma cantidad de alimento (Olanubi *et al.*, 2024).

**Control Automatizado de Equipos:** Las Redes Neuronales gestionan la operación de equipos clave como bombas de agua, calentadores y enfriadores, lo que optimiza el consumo de energía y minimiza los costos (Dhinakaran *et al.*, 2023; Wibisono & Jayadi, 2024).

**Limpieza Automática de Sensores:** Un enfoque simple y efectivo para la limpieza automática de las sondas de los sensores mejora la fiabilidad de las lecturas y reduce los costos de mantenimiento al combatir la acumulación de suciedad y algas (Danh *et al.*, 2020). Esto reduce la frecuencia de limpieza manual (Danh *et al.*, 2020).

**Hardware Rentable:** El uso de componentes de hardware asequibles hace que la tecnología sea más accesible para los pequeños agricultores (Danh *et al.*, 2020; Wibisono & Jayadi, 2024; Flores-Iwasaki *et al.*, 2025).

### Dispositivos para el sistema de control de estanques

El sistema se diseñó bajo el concepto de Internet de las Cosas (IoT) para monitorear parámetros críticos del agua en estanques acuícolas en tiempo real, priorizando el bajo costo, la facilidad de instalación y la escalabilidad.

El núcleo del dispositivo es un microcontrolador ESP32, elegido por su conectividad Wi-Fi integrada, capacidad de procesamiento y bajo consumo energético. A este se conectaron sensores específicos:

- DS18B20 sumergible para temperatura.
- Sensor de Calidad de Agua TDS.
- Sensor de PH
- Sensor de CO<sub>2</sub> en el ambiente MQ135
- Sensor DTH11 para la humedad ambiente

La programación se realizó en C++ mediante la plataforma Arduino IDE, integrando librerías de código abierto para la lectura y calibración de los sensores. Se definieron umbrales de operación que, al ser superados, activan un módulo relé encargado de encender bombas de oxigenación o recirculación. En el plano computacional, se implementó una aplicación móvil, con conexión a una base de datos en la nube, lo que permite que los datos sean perdurables a través del tiempo, dicha aplicación fue desarrollada a través de App Inventor (Figura 1, b, c y d).

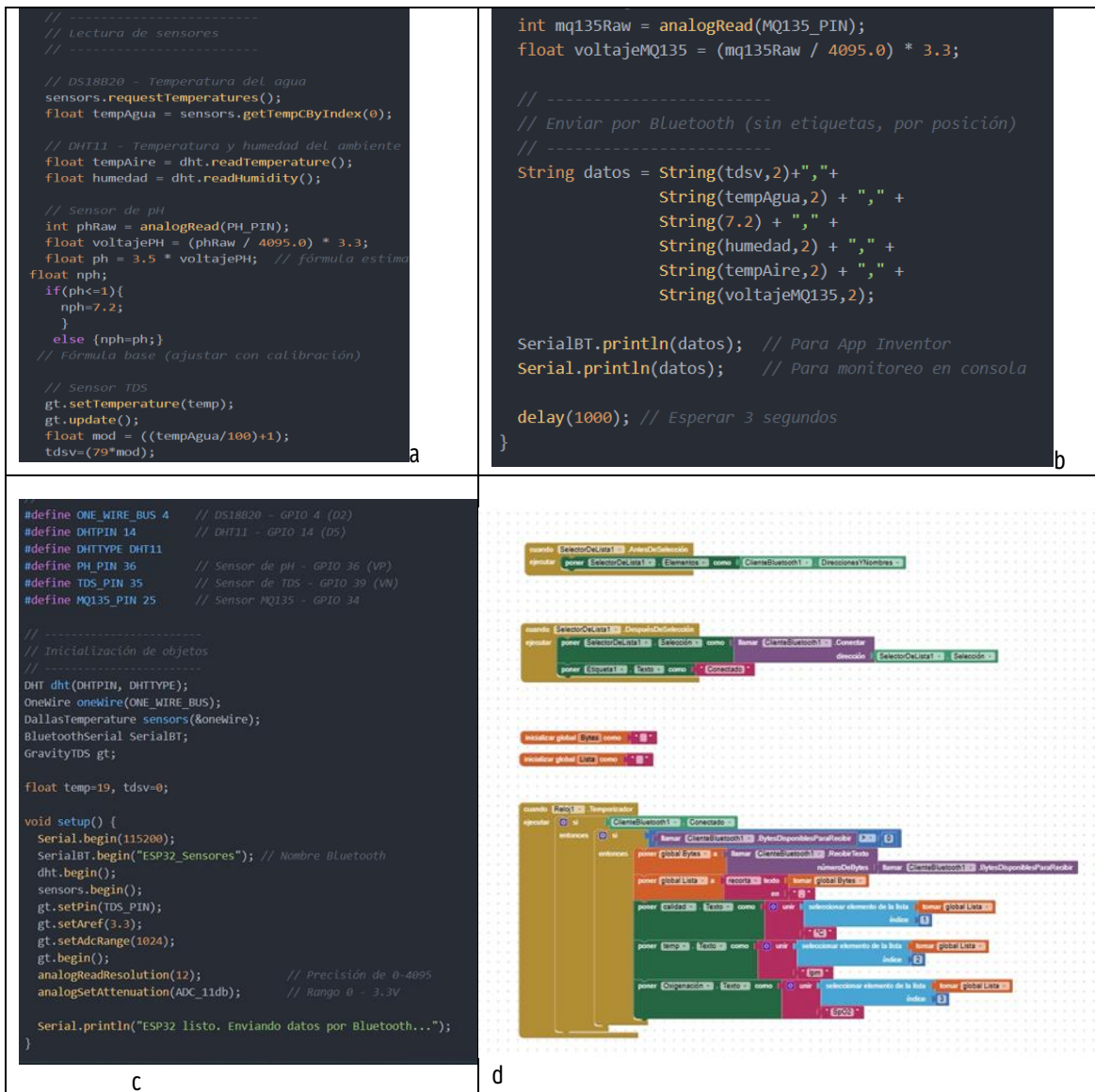


Figura 1. Código para la Lectura de Sensores (a), para el envío de los datos a la aplicación (b), definición de variables e inicialización de lecturas de sensores (c) y bloques de la Aplicación en App Inventor (d).

### Creación del 130edalyc130ón130 de protección

Para la protección física, se diseñó y fabricó una carcasa impresa en 3D resistente a salpicaduras y radiación solar, utilizando filamento PET reciclado. El diseño se realizó en Fusion 360, y se utilizó el Slicer de Prusa para la configuración de impresión (Figuras 2).

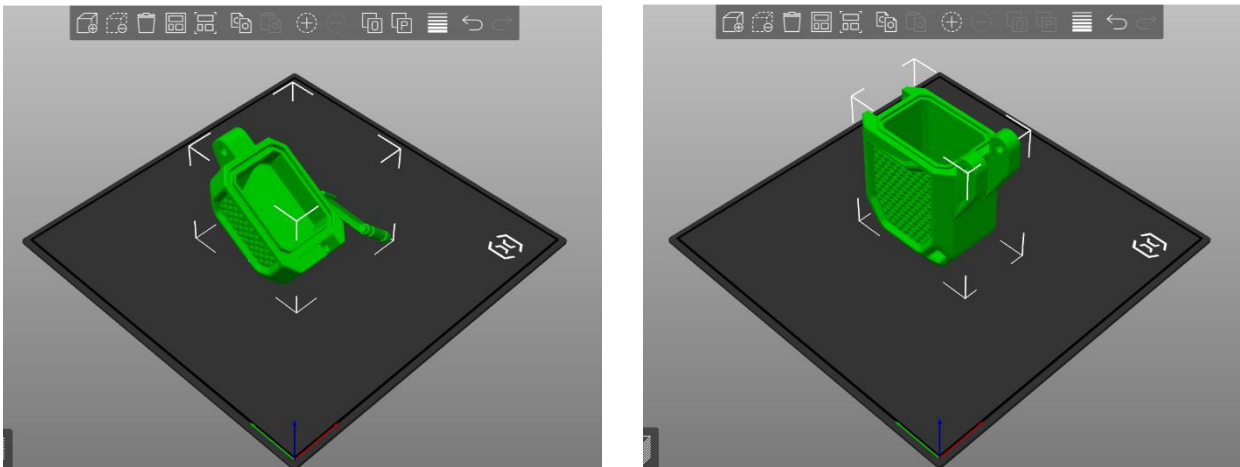


Figura 2. Carcasa para la protección del sistema, parte superior e inferior.

### Integración del sistema de control

El conjunto de sensores se conectó a través del esquema de la Figura 3, se conectan los sensores a la tarjeta ESP32, este es el cerebro, de acuerdo a los parámetros sensados realiza la actuación de las bombas, tanto para el llenado en caso de que el sensor de nivel de agua así lo indique, como la bomba de recirculación, que generará el proceso de oxigenación en el estanque.

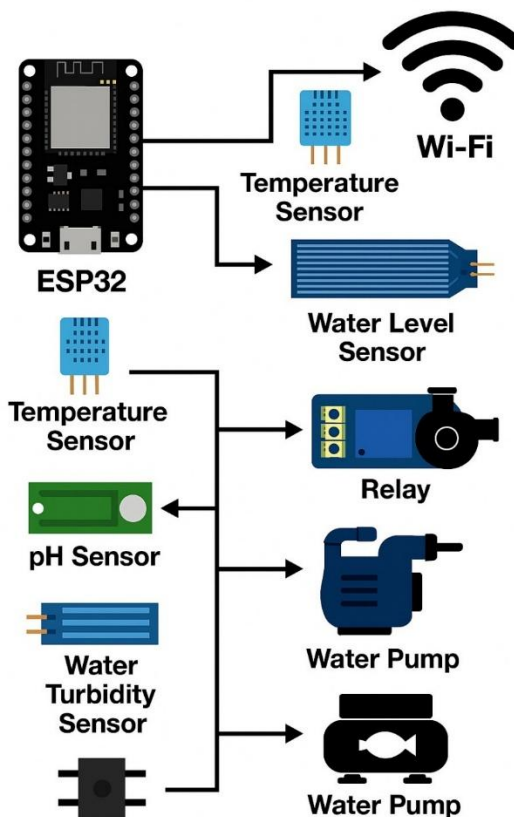


Figura 3. Esquema de sensores del sistema. Fuente Elaborada con IA

## Resultados

### Implementación del sistema en el sistema acuícola

Durante un periodo de 30 días se evaluó el desempeño del sistema IoT diseñado para el monitoreo de parámetros críticos en estanques acuícolas. La simulación generada permitió observar la estabilidad del sistema electrónico y computacional, así como la capacidad de registrar variaciones ambientales y acuáticas en tiempo real. Los resultados obtenidos se presentan a continuación, junto con la interpretación de cada variable monitoreada.

### Temperatura del agua

La temperatura promedio registrada fue de 26 °C, con oscilaciones mínimas de  $\pm 1.5$  °C. Este comportamiento es consistente con las condiciones óptimas para el cultivo de mojarra, cuyo rango ideal oscila entre 24 °C y 30 °C. La gráfica mostró una tendencia estable, sin cambios abruptos, lo que refleja tanto la confiabilidad del sensor sumergible como la capacidad del sistema para mantener la lectura en entornos de agua. Estos resultados son relevantes, pues una variación excesiva de temperatura puede afectar directamente la tasa metabólica y el crecimiento de los peces (Figura 4<sup>a</sup>).

### Calidad del agua (TDS):

El sensor de sólidos disueltos totales (TDS) registró un promedio de 450 ppm, con pequeñas variaciones diarias. Este nivel se encuentra dentro de los parámetros aceptables para acuicultura de agua dulce, lo que indica que el sistema puede ser utilizado como una herramienta preventiva frente a acumulaciones de sales u otros compuestos que deterioren la calidad del agua. La gráfica evidenció estabilidad, mostrando que el sistema es capaz de detectar cambios graduales que, de no ser atendidos, podrían provocar estrés en los organismos o disminuir la eficiencia de conversión alimenticia (Figura 4b)

### Comportamiento de pH:

El valor promedio de pH fue de 7.2, con variaciones controladas en un rango de 6.8 a 7.6. Estos resultados son adecuados para el cultivo de tilapia, ya que niveles fuera de este rango pueden afectar la solubilidad del oxígeno o provocar toxicidad de amoníaco. El sistema mostró sensibilidad suficiente para detectar pequeños cambios, lo que resalta su utilidad para prevenir episodios críticos. La gráfica permitió observar un comportamiento estable, lo que valida la confiabilidad del sensor y del firmware desarrollado para el procesamiento de datos (Figura 4c)

### Concentración de CO<sub>2</sub> ambiental (MQ135):

El sensor MQ135 registró un promedio de 410 ppm de CO<sub>2</sub> en el ambiente, con fluctuaciones naturales en función de la ventilación y las condiciones meteorológicas. Aunque la concentración de CO<sub>2</sub> ambiental no afecta directamente al estanque, su monitoreo es importante como referencia de las condiciones externas que pueden influir en el intercambio gaseoso en el agua. Los resultados mostraron que el sistema es capaz de realizar lecturas estables en condiciones variables, y la gráfica permitió visualizar los picos relacionados con posibles periodos de acumulación ambiental (Figura 4d)

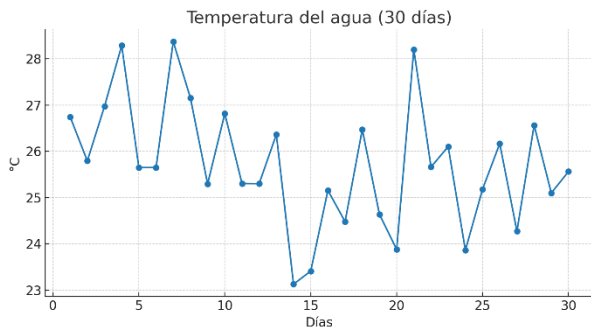
### Humedad relativa del ambiente (DHT11):

El sensor de humedad mostró un promedio de 65 %, con oscilaciones entre 60 % y 70 %. Estos valores son característicos de ambientes acuícolas al aire libre, donde la evaporación del agua contribuye a un nivel relativamente alto de humedad. El monitoreo de este parámetro permite relacionar la humedad ambiental con la tasa de evaporación y con posibles variaciones en el nivel de agua del estanque. La gráfica evidenció un comportamiento constante, lo cual valida la precisión del sensor dentro de su rango operativo (Figura 4e).

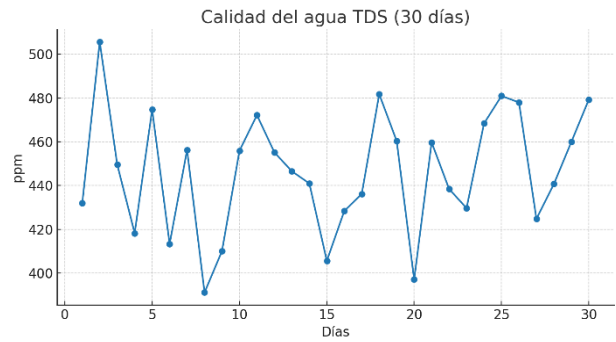
El análisis conjunto de las cinco variables demostró que el sistema es capaz de mantener una operación continua durante 30 días, sin interrupciones ni fallos en la recolección de datos. Las gráficas generadas proporcionan información clara y de fácil interpretación para el usuario final, permitiendo la identificación de tendencias y

anomalías. Además, el sistema mostró baja latencia en la transmisión de datos y estabilidad en condiciones simuladas, lo que lo convierte en una alternativa confiable frente a sistemas comerciales de alto costo.

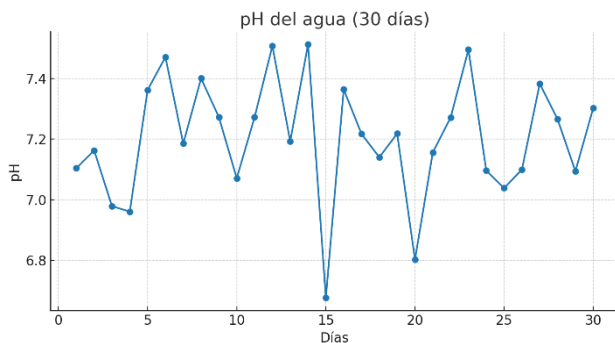
Un aspecto relevante es la posibilidad de integrar la automatización de actuadores mediante módulos relé (Figura 4f). Esto permite activar bombas de recirculación u oxigenación de manera inmediata cuando se detectan condiciones críticas, lo que incrementa la eficiencia de la producción al reducir la mortalidad de peces y optimizar el uso de recursos como alimento y agua. En este sentido, el sistema no se limita a ser una herramienta de monitoreo pasivo, sino que se convierte en un mecanismo activo de gestión



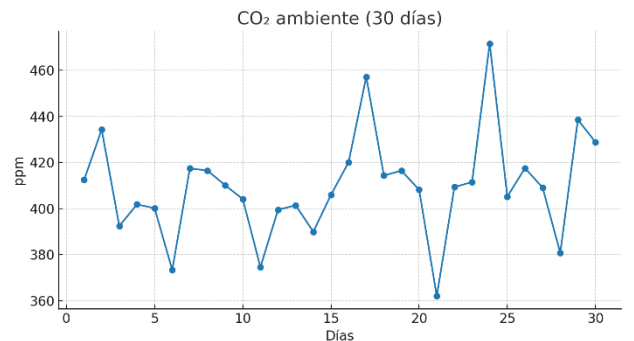
a)



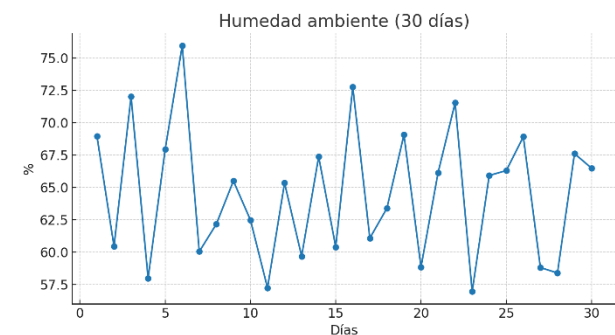
b)



c)



d)



e)



f)

Figura 4. Comportamiento de parámetros para el cultivo de peces y dispositivos de monitoreo.

El monitoreo del CO<sub>2</sub> ambiental y la humedad relativa, aunque no influyen de manera directa en la calidad del agua, aportan información complementaria sobre las condiciones externas que pueden impactar en la evaporación y el intercambio gaseoso. Este enfoque integral posiciona al sistema como una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, con potencial de extenderse hacia aplicaciones en agricultura de precisión e hidroponía. En la Figura 5 podemos ver el dispositivo en funcionamiento.



Figura 5. Dispositivo IoT en el monitoreo de parámetros que mejoran la productividad de peces en condiciones controladas.

### Conclusión

Los sistemas IoT para la piscicultura permiten mejora sustancial de la salud de los peces y las tasas de supervivencia, una reducción significativa de los costos operativos gracias a la optimización de la alimentación y el uso eficiente de la energía, y una mayor productividad general. Al mismo tiempo, promueven la responsabilidad ambiental y la sostenibilidad ecológica a través de la optimización del uso de recursos y la minimización del impacto negativo. A pesar de los resultados positivos, existen limitaciones que deben considerarse. En primer lugar, los sensores de bajo costo pueden presentar desviaciones en mediciones prolongadas, lo que requiere calibraciones periódicas. Finalmente, aunque la carcasa impresa en 3D demostró resistencia en simulaciones, será necesario validar su durabilidad en condiciones de campo a largo plazo.

### Referencias

- Danh, L. V. Q., Dung, D. V. M., Danh, T. H., & Ngoc, N. C. (2020). Design and deployment of an IoT-based water quality monitoring system for aquaculture in Mekong Delta. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, *9*(8), 1170-1175.
- Dhinakaran, D., Gopalakrishnan, S., Manigandan, M. D., & Anish, T. P. (2023). IoT-Based environmental control system for fish farms with sensor integration and machine learning decision support. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, *11*(10). <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i10.8482>
- Flores-Iwasaki, M., Guadalupe, G. A., Pachas-Caycho, M., Chapa-Gonza, S., Mori-Zabarburú, R. C., & Guerrero-Abad, J. C. (2025). Internet of Things (IoT) sensors for water quality monitoring in aquaculture systems: A systematic review and bibliometric analysis. *AgriEngineering*, *7*(3), 78. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7030078>
- Olanubi, O. O., Akano, T. T., & Asaolu, O. S. (2024). Design and development of an IoT-based intelligent water quality management system for aquaculture. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, *11*(15). <https://doi.org/10.1186/s43067-024-00139-z>
- Wibisono, A. B., & Jayadi, R. (2024). Experimental IoT system to maintain water quality in catfish pond. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *15*(3), 393-399.

## BIODIGESTORES, TECNOLOGIA INNOVADORA PARA REDUCIR EL IMPACTO AMBIENTAL EN UNIDADES BOVINAS DE SISTEMA DOBLE PROPÓSITO

[BIODIGESTERS, INNOVATIVE TECHNOLOGY TO REDUCE ENVIRONMENTAL IMPACT IN DUAL-PURPOSE CATTLE UNITS]

Paulina García Ramírez<sup>1</sup>, José Alfredo Santiago Villagómez Cortes<sup>1</sup>, Raymundo Salvador Gudiño Escandón<sup>1</sup> y Arisbeth Luna Cruz<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Veracruzana- Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Lomas de Estadio S/N, 91000 Xalapa, Veracruz, Méx.

\*Autor de correpondencia: [zS21008607@estudiantes.uv.mx](mailto:zS21008607@estudiantes.uv.mx)

### Resumen

El estudio se realizó en la zona tropical del municipio de Jamapa, Veracruz, con el objetivo de evaluar el uso de biodigestores, como tecnología innovadora para reducir el impacto ambiental de unidades productivas (UPP) bovinas en sistema doble propósito (SDP). El tipo de estudio fue aplicado, con fuentes de información documentales y de campo, carácter in situ y alcance múltiple. El costo del biodigestor fue de \$56,000 con una amortización de \$2,800 por 20 años para la producción de 200 litros de biol al día y de 2.4 m<sup>3</sup>/d de gas con 65 kg de excremento. El costo de producción del biol y compostaje por año fue de \$28,871 (amortización del equipo a 20 años \$2,800/año y mano de obra por el tiempo utilizado del empleado dos horas día/año \$26,071). Es un producto que se puede comercializar, desarrollando el marketing con el uso de ventajas biológicas del biol y composta. Esta tecnología ayuda a reducir el impacto ambiental y apoya las finanzas familiares, la sostenibilidad y la sostenibilidad del ecosistema.

**Palabras claves:** biogestor, biol, sustentabilidad.

### Abstract

This study was conducted in the tropical zone of the municipality of Jamapa, Veracruz, to evaluate the use of biodigesters as an innovative technology to reduce the environmental dual-purpose cattle production units (UPP) in a system. The study was applied, with documentary and field sources, in situ, and multiple scope. The cost of the biodigester was \$56,000, with a 20-year amortization of \$2,800 for the production of 200 liters of slurry per day and 2.4 m<sup>3</sup>/d of gas with 65 kg of excrement. The annual production cost of the slurry and composting was \$28,871 (equipment amortization over 20 years: \$2,800/year, and labor for the employee's time spent two hours a day/year: \$26,071). This product can be marketed, developing marketing strategies based on the biological advantages of slurry and compost. This technology helps reduce environmental impact and supports family finances, sustainability, and ecosystem sustainability.

**Keywords:** biomanager, biol, sustainability.

### Introducción

Con el uso e implementación de la tecnología de los biodigestores se busca generar un alto impacto social, económico y ambiental en las unidades de producción (Toledo *et al.*, 2021). El impacto se manifiesta en cuatro aspectos primordiales: manejo de residuos, reducción de gases de efecto invernadero (GEI), energía limpia y renovable, así como biofertilizantes; buscando combatir la pobreza, la inseguridad alimentaria y el cambio climático. Para lograr esto, es importante la colaboración entre entidades gubernamentales, sector privado y sociedad civil para llevar la

tecnología a más productores (Sánchez y Sánchez, 2020). La combinación entre innovación, tecnología y capacitación son importantes para lograr gran impacto y costo-eficiente con calidad. Es importante visualizar un mundo en el que los residuos sean un recurso y los productores ser agentes de cambios empoderados, independientes y productivos para mejorar los ecosistemas utilizando tecnología innovadora de biodigestión y biofertilización, poseer una misión donde sea promover iniciativas que conecten la seguridad alimentaria, justicia social y acción climática, generando un impacto positivo en las comunidades más vulnerables. (Gavito et al., 2017).

En lo que refiere biogás, en las unidades productivas pecuarias (UPP), se le puede dar uso en actividad doméstica y productiva, así como tratar el biogás para tener producto de calidad (Ciencia Crónica, 2020). También en rastros, donde se cuenta con desechos por sacrificio, consumo de energía, manejo de sangre, generación de moscas y malos olores, lixiviados, proliferación de bacterias, posibilidad de enfermedades infecciosas, contaminación de las aguas subterráneas, emisiones de GEI (Medina y Rodríguez, 2010). Por otra parte, en lo que refiere a producción de biofertilizante, se genera un producto altamente comercializable que regenera terrenos de cultivo de los productores, para poder distribuir como Biol, el cual se maneja en su marketing un producto con beneficios; a) Recuperador de suelos, b) Incorporador de vida al suelo, 3) Mejorador en la retención de humedad, 4) Productor de alimentos sanos y 5) Aportador de nutrientes de uso inmediato para las plantas (Zegers *et al.*, 2021; Restrepo, 2007).

Sin embargo, son pocos los agricultores que conocen los beneficios del Biol. Su composición puede variar según diversos factores; como el tipo de estiércol utilizado (animal o humano), la cantidad de agua, la raza y edad de los animales, el tipo de alimentación que reciben y la frecuencia con la que se les da de comer. (López, 2022). El Biol puede utilizarse para fertilizar directamente puesto que es una mezcla de desechos de origen animal ya digeridos. Al añadir orina (animal o humana) se incrementa su contenido de nitrógeno, lo que puede acelerar el proceso de compostaje y mejorar la relación carbono/nitrógeno (C/N), favoreciendo una descomposición más eficiente. (Acosta, 2019). No obstante, esto también depende del tipo de digestor utilizado.

Con las proporciones adecuadas de los materiales, el Biol puede estar compuesto en un 93% por agua y un 7% por materia seca, de la cual el 4,5% es materia orgánica y el 2,5% materia inorgánica. Además, contiene nutrientes como fósforo, potasio, zinc, hierro, manganeso y cobre, siendo este último un elemento que se ha vuelto limitante en muchos suelos (Hernández, 2025).

El Biol es una excelente opción para enriquecer suelos destinados a cultivos. A diferencia del estiércol tradicional, su composición se estabiliza gracias a un mayor contenido de nitrógeno, lo que mejora su eficacia. Además, se produce en mayor cantidad en el que, aporta nutrientes y micronutrientes que están disponibles de inmediato para las plantas, superando en valor nutritivo tanto al estiércol fresco como al compostado. (Hernández *et al.*, 2013). Los efectos del Biol en los cultivos son comparables a los de los fertilizantes químicos, lo que lo convierte en una alternativa viable y sostenible. Se puede aplicar de manera directa en los cultivos o aplicar para enriquecer el compostaje de otros materiales orgánicos (Rojas *et al.*, 2023).

## Metodología Tipo de estudio

### Procedimiento de estudio

Se utilizaron fuentes de información documentales y de campo, las cuales se fundamentaron en la colecta de datos durante un año del uso del biodigestor en una unidad productiva en SDP. El estudio tiene alcance múltiple; su carácter es exploratorio, porque se desconoce el impacto que se podrá tener en la zona con el uso y aplicación del Biol y composta como un fertilizante que se comercialice de forma eficiente.

### Localización

Se realizó en Jamapa, Veracruz, ubicada en la zona tropical del centro del estado a una altura de 57 metros sobre el nivel del mar. El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano, con humedad cercana a 90% y temperatura de 25-26 °C, con lluvias en verano. De acuerdo con INEGI (2020), el municipio cuenta con una población de 11,132, de las cuales el 51 % mujeres. Gran parte de la población se dedica a la agricultura, los productos que más se cosechan son: mango, papaya y maíz; no obstante, lo que más se produce es el ganado bovino (Figura 1).

### Manejo del hato

La UPP cuenta con una superficie de 20 hectáreas para pastoreo para la producción de leche que se realizan con 20 vacas de las razas suizo americano/cebu en una proporción del 50%, con un programa integral de manejo (sanidad, reproducción, genética, alimentación y comercialización). Esta UPP es representativa de las 175,000 ubicadas en la zona centro del estado de Veracruz (SNIIGA,2024)

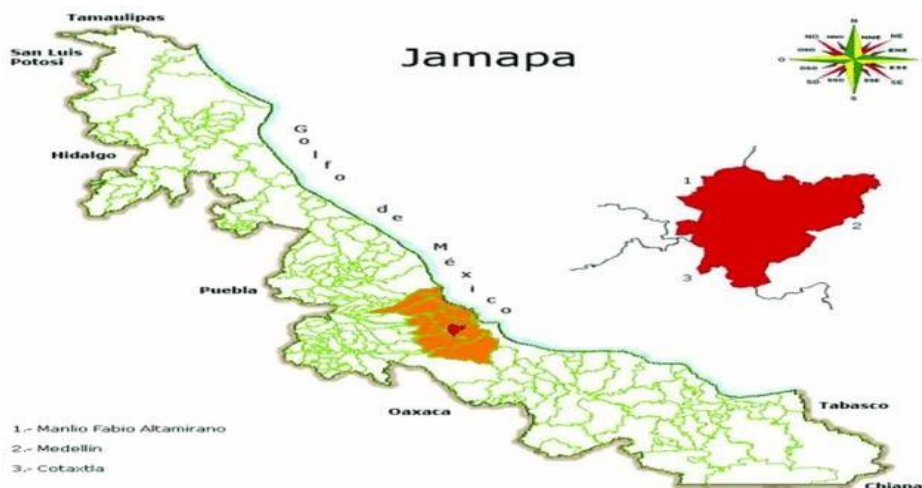


Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Jamapa, Veracruz, México. Fuente:

### Diseño de la investigación

Se instaló el equipo de biodigestor para trabajar con los residuos (estiércol) de 15 de las 20 vacas que se mantienen en ordeña durante todo el año en la UPP, con la intención de producir fertilizante orgánico (biol), y gas que pueda ser utilizado en forma domestica por los propietarios de la UPP, y a su vez el biol producido sirva para desarrollar compostaje para ser utilizado en la fertilización de los potreros y comercialización del biol y composta en forma estratégica.

### Fase previa

Con el apoyo de la Unión Ganadera Regional de la Zona Central del Estado de Veracruz se realizó contacto con las personas que instalan este tipo de equipos para la implementación de esta tecnología innovadora en la zona.

### Fase de campo

Esta investigación se llevó a cabo en su fase de campo en enero- diciembre del 2024, mediante análisis y recopilación de datos en la unidad productiva. El estudio utilizó información confiable y disponible al momento de realizar la investigación. La información técnico-económica obtenida se considera un acercamiento a la realidad para evidenciar los factores que pueden apoyar a la aplicación de biofertilizantes que apoyen a disminuir los efectos de gases invernadero.

### Fase de gabinete

Todos los datos de campo obtenidos se concentraron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, donde se incluyó la información de producción y de costos. Así como el planteamiento de un plan estratégico que permita desarrollar la venta y comercialización del biol y de las compostas.

## Resultados

### Costo de la instalación del sistema

El costo de la compra e instalación del equipo biodigestor fue de \$56,000 mismo que tiene una vida útil de 20 años con una depreciación por año de \$2,800. El Biodigestor incluye: reactor(es) anaeróbico(s) en geomembrana LLDPE de 1.5 mm espesor, registro de ingreso de 200 L, tina para efluente de 2,000 o 4,500 L según modelo, línea de gas, filtro para reducción de H<sub>2</sub>S, válvula de alivio de presión, dos trampas de agua, quemador para boiler, estufa con doble quemador, geotextil protector, guía de usuario, póliza de garantía. Instalación, capacitación, dos monitores postinstalación. El precio fue establecido por la empresa que lo instaló, y fue por un periodo de enero-diciembre 2024.

### Proyección de financiera y beneficio económicos por el biogás y el biofertilizante

El biodigestor instalado en la UPP en estudio, tiene una capacidad para producción de 270l litros de biol proveniente de 9.9 hectáreas al año con 9 cabezas de ganado, en el caso de esta investigación se utilizó residuos de animales (estiércol de bovino) a razón de 65 kilogramos por día proveniente de aproximadamente 15 cabezas de ganado lo que nos ayudó a obtener un promedio de 2.4 m<sup>3</sup>/d gas y 200 litros de biol por día.

### Beneficios alternativos del aprovechamiento de los biodigestores

Además de la disminución de liberación de metano a la atmósfera que ayuda a combatir el cambio climático, el biofertilizante y composta apoyó a mejorar la productividad agrícola y potenciar la salud del suelo de la unidad productiva en donde año con año se utilizaban en la fertilización de los potreros 2.5 toneladas de fertilizante con un costo de \$35,000. El costo de producción del biol y compostaje por año fue de \$28,871 (amortización del equipo a 20 años \$2,800/ año y mano de obra por el tiempo utilizado o del empleado dos horas día/año \$26,071). El equipo tiene un potencial de 100,000 litros en total.

Con los resultados obtenidos en la UPP en lo que respecta a cantidades de biol y composta producidas durante el año, se calcula poder comercializar aproximadamente 10,000 litros de biol a \$40 el litro que es el precio en el mercado que da un total de \$400,000 y a su vez también 1.5 toneladas de composta a un precio de \$20 el kg que da un total de \$30,000 con un ingreso total anual de \$430,000 Lo cual llevado contra el costo de producción de \$28,871 daría una utilidad de \$401,129 sin considerar renta de espacio para producir el producto, ni otros costos. Derivado de estos resultados, se sugiere realizar un estudio económico financiero para evaluar la rentabilidad del uso del biodigestor en UPP en SDP.

### Conclusiones

El biodigestor es una tecnología viable a utilizar en el SDP, para disminuir el impacto ambiental al utilizar los residuos (estiércol de bovino) y a su vez también apoya a la economía familiar con la producción de biogás. Siendo un producto que se puede comercializar para diversificar el ingreso de las unidades productivas, permitiendo con esto mejorar la economía de los productores en el sector rural con un beneficio directo para la sustentabilidad y sostenibilidad de los ecosistemas.

## Referencias

- Absalón-Medina, V. A., Blake, R. W., Fox, D. G., Juárez-Lagunes, F. I., Nicholson, C. F., Canudas- Lara, E. G., & Rueda-Maldonado, B. L. (2012). Limitations and potentials of dual-purpose cow herds in Central Coastal Veracruz, Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 44(6), 1131-1142. <https://doi.org/10.1007/s11250-011-0049-1>
- Acosta Vidaurre, R. (2019). Características físicas, químicas, microbiológicas y efectividad agronómica del abono líquido Biol obtenido por digestión anaerobia de estiércol de animales con rastrojo.

- Aguilar Barradas, U., Rodríguez Chessani, M. A., Bueno Díaz, H. M., Pérez Saldaña, J. M., Pérez, P. A., Méndez Ojeda, M. L., & Vázquez Couturier, D. L. (2002). Diagnóstico socioeconómico y técnico productivo de ganaderos organizados en el sistema bovino de doble propósito en el Estado de Veracruz. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias - CIRGOC.
- Ciencia Crónica. (2020). Procesos para el tratamiento del biogás: desulfuración, deshumidificación y purificación.
- Gavito, M. E., van der Wal, H., Aldasoro, E. M., Ayala-Orozco, B., Bullén, A. A., Cach-Pérez, M., & Villanueva, G. (2017). Ecología, tecnología e innovación para la sustentabilidad: retos y perspectivas en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(3), 1-14.
- Hernández Rodríguez, O. A., Hernández Tecorral, A., Rivera Figueroa, C., Arras Vota, A. M., & Ojeda Barrios, D. (2013). Calidad nutrimental de cuatro abonos orgánicos producidos a partir de residuos vegetales y pecuarios. *Terra Latinoamericana*, 31(1), 35-46.
- López-Coronado, J. A. D., & Carrión-Carrera, G.-J. (2022). Implicancias del tipo de estiércol en la calidad microbiológica del biol. *Revista RedBioLAC*, 5(1), 66-70.
- Medina Herrera, M. D. R., & Rodríguez García, A. (2010). Optimización del tratamiento de residuos provenientes de rastro mediante digestión anaerobia para maximizar la producción de biogás.
- Restrepo, J. (2007). Importancia de los fertilizantes orgánicos.
- Rojas-Espinoza, B. F., Hernández-Chontal, M. A., Rodríguez-Orozco, N., & Linares-Gabriel, A. (2023). Concentración de nutrientes de dos formulaciones de fertilizantes fermentados (139edaly) elaborados con insumos locales. *Terra Latinoamericana*, 41, e1658.

**ROBOT AUTÓNOMO PARA LA APLICACIÓN INTELIGENTE DE TRATAMIENTOS FITOSANITARIOS EN INVERNADEROS**

[AUTONOMOUS ROBOT FOR THE INTELLIGENT APPLICATION OF PHYTOSANITARY TREATMENTS IN GREENHOUSES]

Guillermo Rey Peñaloza Mendoza<sup>1</sup>, Mario Salvador Castro Zenil<sup>1</sup>, Ana María Morales Melgoza<sup>1</sup>, Mariana Pasaye Salgado<sup>1</sup>, Luis Miguel Carreón Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TecNM – Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, Av. Tecnológico #1, Zurumútaro, Pátzcuaro, Michoacán, Méx.

Autor para correspondencia: grey@itspa.edu.mx

ORCID: 0000-0003-2795-670X

**Resumen**

El presente trabajo describe el desarrollo de un robot autónomo diseñado para la aplicación de tratamientos fitosanitarios en invernaderos. La motivación surge de la necesidad de reducir el uso excesivo de agroquímicos, minimizar riesgos para la salud del personal y mejorar la eficiencia de los procesos agrícolas. El proyecto se centra en la construcción de un sistema robótico capaz de desplazarse de manera autónoma entre hileras de cultivo para la aplicación del producto fitosanitario de forma precisa. El diseño integró una estructura ligera y resistente, un sistema de locomoción adaptado a superficies irregulares, depósitos para la mezcla fitosanitaria y un conjunto de boquillas controladas electrónicamente para la dispersión homogénea. La arquitectura de control incluyó sensores para detección de obstáculos, así como un módulo programado para ejecutar rutas predefinidas o adaptativas. Los resultados preliminares en pruebas de campo mostraron un desempeño estable, con una cobertura del tratamiento uniforme y reducción significativa del desperdicio de insumos. Se concluye que el robot contribuye a la automatización agrícola de precisión, optimizando recursos, disminuyendo riesgos para los usuarios y fortaleciendo la sostenibilidad en la producción bajo invernadero.

**Palabras clave:** Agricultura de precisión, Fitosanitarios, Invernadero, Robot autónomo.

**Abstract**

This paper describes the development of an autonomous robot designed for the application of phytosanitary treatments in greenhouses. The motivation arises from the need to reduce the excessive use of agrochemicals, minimize health risks for personnel, and improve the efficiency of agricultural processes. The focus is on the construction of a robotic system capable of autonomously moving between crop rows to apply the phytosanitary accurately. The design incorporates a lightweight and durable structure, a locomotion system adapted to uneven surfaces, tanks for the phytosanitary mixture, and a set of electronically controlled nozzles. The control architecture included sensors for obstacle detection, as well as a module programmed to execute predefined or adaptive routes. Preliminary results from field tests showed stable performance, with uniform treatment coverage and a significant reduction in input waste. It is concluded that the robot contributes to precision agricultural automation, optimizing resources, reducing risks for users, and enhancing sustainability in greenhouse production.

**Keywords:** Precision, Plant protection products, Greenhouse, Autonomous robot

**Introducción**

La agricultura enfrenta desafíos cada vez más complejos derivados del crecimiento demográfico, la variabilidad climática y la creciente demanda de alimentos saludables y producidos bajo criterios de sostenibilidad. Entre estos retos, destaca la optimización del uso de recursos, como el agua y los productos fitosanitarios, así como la reducción del impacto ambiental que generan las prácticas agrícolas convencionales. Por ejemplo, la Organización de las

Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que 1660 millones de hectáreas de tierra han sido degradadas debido a actividades humanas, de las cuales más del 60 % corresponde a tierras agrícolas, lo que pone en evidencia la urgencia de adoptar enfoques más sostenibles (FAO, 2015). En este contexto, la automatización y la robótica agrícola emergen como soluciones clave dentro de la llamada Agricultura 4.0, incorporando tecnologías como la navegación autónoma, la visión artificial y el control inteligente de procesos. Estos sistemas mejoran la eficiencia operativa, optimizan el uso de agua, fertilizantes y pesticidas, y reducen el impacto ambiental mediante aplicaciones más precisas y dirigidas (Padhiary, 2025).

La propuesta de un robot autónomo que permita realizar tratamientos fitosanitarios se alinea directamente con esta tendencia. Responde a problemáticas reales como la dispersión de agroquímicos, la exposición del personal a sustancias tóxicas, la falta de precisión en la dosificación y la necesidad crítica de reducir el consumo de insumos. La dispersión de pesticidas, por ejemplo, puede provocar contaminación en zonas más allá del área objetivo y representar riesgos para la salud humana y el medio ambiente, por lo tanto, se presenta la necesidad de prácticas agrícolas más sostenibles y el desarrollo de alternativas que reduzcan la dependencia de los plaguicidas (FAO, 2019). La propuesta de este trabajo busca dar un paso a la respuesta a problemáticas clave, principalmente, en la aplicación de fitosanitarios, tales como la aplicación de agroquímicos y la exposición del personal a sustancias potencialmente tóxicas. Su diseño modular y adaptable combina hardware robusto con software inteligente, permitiendo una operación autónoma en invernaderos. Asimismo, sienta las bases para futuras versiones con capacidad de monitoreo mediante visión artificial, con lo cual se proyecta un impacto significativo en la eficiencia y seguridad de la producción fitosanitaria en ambientes controlados. El artículo se organiza de la siguiente manera: primero, se presenta el estado del arte general en agricultura de precisión y automatización; posteriormente, se expone el planteamiento del problema y la solución propuesta a través del sistema robótico. En seguida, se describe el desarrollo del prototipo, incluyendo los materiales y la metodología empleada. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos, se discuten los hallazgos y se plantean las conclusiones del proyecto.

## Materiales y métodos

### Fases para el desarrollo del robot autónomo Fitobot

El proceso se organizó en tres fases principales: diseño conceptual, prototipado y pruebas. Esta metodología permitió un ajuste continuo del sistema, garantizando que cada componente y subsistema cumpliera con los requisitos funcionales y operativos establecidos.

#### *Primera fase*

Se definieron los requisitos funcionales y estructurales del robot (peso, velocidad, capacidad de carga y compatibilidad con los distintos tipos de cultivos). Luego se seleccionaron los componentes electrónicos, mecánicos y de software, priorizando el equilibrio entre rendimiento, disponibilidad y costo. El diseño se modeló detalladamente mediante Fusion 360, lo que permitió simular el prototipo en un entorno virtual y detectar posibles interferencias o limitaciones antes de la fabricación.

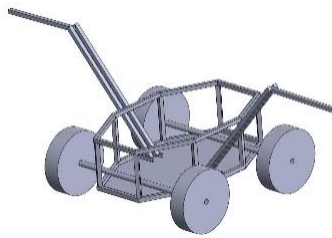
Lo anterior se sustentó en un proceso de diseño conceptual y modelado en 3D, orientado a validar la viabilidad estructural y funcional del robot antes de su construcción física. Esta fase se realizó utilizando Autodesk Fusion 360, un software de diseño asistido por computadora (CAD) que permitió visualizar, simular y optimizar cada componente en un entorno virtual, asegurando compatibilidad y desempeño operativo. Se consideraron aspectos funcionales y estructurales, incluyendo dimensiones para la navegación en invernaderos, capacidad de carga para insumos y flexibilidad para ejecutar múltiples tareas.

#### *Segunda fase*

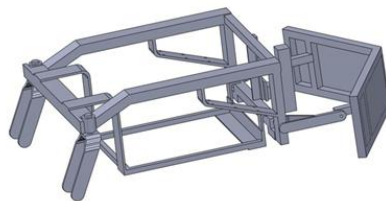
La segunda fase consistió en el prototipado. Las piezas diseñadas fueron fabricadas con precisión utilizando técnicas como corte láser para el chasis y mecanizado de los elementos estructurales. Tras el ensamblaje, se realizó la integración de hardware y software, seguida de pruebas de funcionamiento de cada subsistema de manera individual y conjunta, verificando la interoperabilidad y la fiabilidad de los componentes. Con base en estos parámetros, se desarrollaron los primeros esquemas (Figura 1a), que sirvieron de guía para la disposición general de los componentes y la integración de subsistemas. Seguidamente, se procedió al modelado 3D detallado de cada

elemento, destacando: Chasis: Modelado para garantizar la resistencia estructural, un bajo peso y facilidad de fabricación. Cuña de protección: Modelada para eliminar obstáculos pequeños que puedan existir en la marcha, tales como piedras u objetos. Sistema de locomoción: Diseño de ruedas y tren motriz considerando superficies irregulares y obstáculos típicos de invernaderos. Soporte de contenedor: Modelado de componentes estructurales necesarios para soportar los contenedores del producto a dispersar. Tras la modelación de los componentes individuales y el ajuste de los elementos, se realizó el ensamblaje virtual completo en Autodesk Fusion 360, visto en las Figuras 1b y c, esto permitió verificar el encaje correcto de todas las piezas y detectar posibles interferencias mecánicas. Además, se realizaron simulaciones de movilidad y análisis estructural bajo cargas operativas, validando la capacidad del diseño para soportar esfuerzos dinámicos y estáticos durante su operación.

a)



b)



yc)

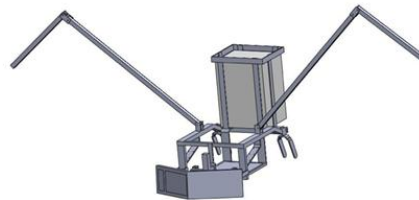


Figura 1. Primer diseño del robot FitoBot donde se muestran los elementos base del sistema (a). Estructura base y cuña frontal (b). Diseño con los brazos de extensión para la dispersión del producto (c).

### *Tercera fase*

En la esta fase el prototipo se sometió a pruebas en condiciones reales de invernadero. Estas evaluaciones permitieron medir el desempeño del robot en escenarios prácticos, identificar posibles deficiencias y realizar ajustes para optimizar su eficiencia, seguridad y facilidad de operación.

### **Prototipado del diseño mecánico**

El diseño mecánico de FitoBot se centró en una plataforma robusta y adaptable a las condiciones específicas de los invernaderos. El chasis se construyó con lámina de hierro de 6 mm, con cortes láser para garantizar precisión dimensional, montado sobre una estructura de tubular cuadrada diseñada para soportar las cargas del sistema mostrada (Figura 2). Se incluyó un compartimento para el producto fitosanitario, y las dimensiones máximas del chasis son 80 cm de largo, 50 cm de ancho y 45 cm de alto. Para ajustarse a diferentes alturas de cultivo, se incorporaron brazos abatibles tubulares de una pulgada, alcanzando una altura máxima de 120 cm. El sistema de tracción está compuesto por dos ruedas motrices de 20 cm de diámetro y un par de ruedas delanteras libres, proporcionando maniobrabilidad en superficies irregulares. La fuerza de movimiento la suministran motores de alto torque (24V, 340W) con una reducción de engranajes de 32:1, garantizando potencia suficiente para operar con carga, el montaje (Figura 2). Durante esta fase, se realizaron iteraciones del diseño mecánico para optimizar la distribución de peso, facilitar el acceso a componentes electrónicos. Este enfoque modular permite futuras modificaciones y expansión de la plataforma.



Figura 2. Estructura tubular base del FitoBot y estructura base con la colocación de la cuña y espacio para el contenedor.

### Prototipado del diseño electrónico

El diseño electrónico de FitoBot se desarrolló bajo un enfoque modular, facilitando la integración y control independiente de cada subsistema. El microcontrolador ESP32 actúa como el cerebro central, permitiendo programar secuencias de recorrido donde se establece el tamaño del pasillo del invernadero, el número de pasillos y la distancia entre ellos, automatizar la aplicación de fitosanitarios y habilitar control remoto mediante radio frecuencia (RF), para controlar el robot de forma manual en caso de existir alguna eventualidad.

El prototipo incorpora sensores de ultrasonido para detección de obstáculos a una altura grande donde la cuña no pueda remover dicho obstáculo. La potencia de los motores se controla mediante puentes H, mientras que relevadores de dos polos accionan la bomba de agua, en la Figura 3 se muestra una representación de esto. Esta bomba, combinada con boquillas ajustables, permite un control preciso del caudal y del tipo de aspersión, desde niebla fina hasta riego localizado por goteo. Por último, la cuña cuenta con una polea para abatirla cuando sea necesario. La arquitectura electrónica modular facilita la incorporación de sensores adicionales, sistemas de posicionamiento de alta precisión (GNSS/RTK) y conectividad IoT, preparando a FitoBot para su escalabilidad en entornos de Agricultura 4.0.

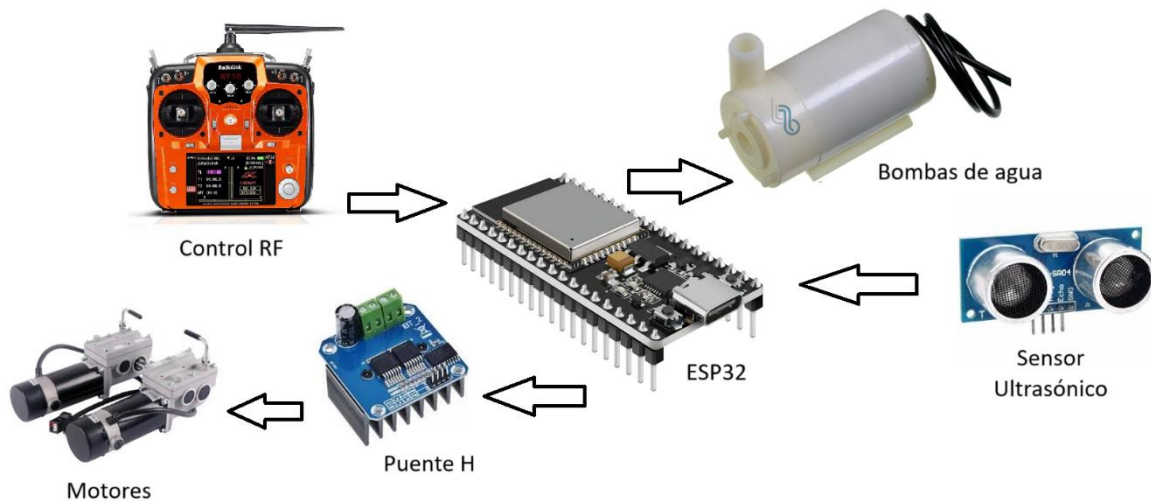


Figura 3.- Elementos electrónicos base para el funcionamiento del robot FitoBot.

### Prototipado para la programación

La programación del robot FitoBot se realizó en Arduino IDE debido a que el cerebro principal para las funciones de movilidad y actuación se realizan desde una tarjeta ESP32, definiendo rutinas de movimiento, procesamiento de señales de sensores y operación de motores y bombas. El diseño de las rutinas de movimiento se definió a partir de parámetros estructurales del espacio, como el tamaño total del invernadero, la ubicación de un punto de origen de referencia, la distancia inicial hacia el primer surco o pasillo, el largo de cada pasillo y la separación entre ellos. Con esta información, el robot generó trayectorias en patrón de zigzag, lo que permitió recorrer de manera sistemática todas las hileras de cultivo y establecer los puntos exactos de giro. Adicionalmente, se integra un modo manual, en el que el desplazamiento puede ser controlado mediante un dispositivo RF. En esta modalidad, el operador tiene la posibilidad de activar o detener la aspersion de forma directa y accionar el mecanismo de elevación de la cuña según las necesidades de la operación. La programación también incorpora rutinas de seguridad y navegación adaptativa. Por ejemplo, a través de un sensor de ultrasonido, el robot es capaz de detectar obstáculos en tiempo real. En caso de identificar un objeto en su trayecto, el sistema calcula si es posible esquivarlo, considerando tanto el ancho del pasillo como las dimensiones del propio robot. En situaciones donde no existe margen suficiente, el equipo se detiene para evitar colisiones. En la Figura 4 se muestra un diagrama a bloques de la estructura general de las condiciones programadas en el sistema. De esta manera, la programación combina estrategias de recorrido planificado, control manual y algoritmos de detección de obstáculos, garantizando eficiencia en el trabajo, reducción de errores y mayor seguridad en la operación dentro del invernadero. En cuanto al uso de inteligencia artificial, el trabajo actual se realizó de manera fuera de línea. A través de una cámara web integrada en el sistema, se capturan imágenes de los cultivos y se envían a una computadora externa. Posteriormente, estas imágenes son procesadas utilizando Python y la librería OpenCV. Esta tecnología permite analizar imágenes de las plantas y detectar con precisión signos de enfermedades o plagas, lo que facilita la toma de decisiones más informadas en el proceso de fumigación.

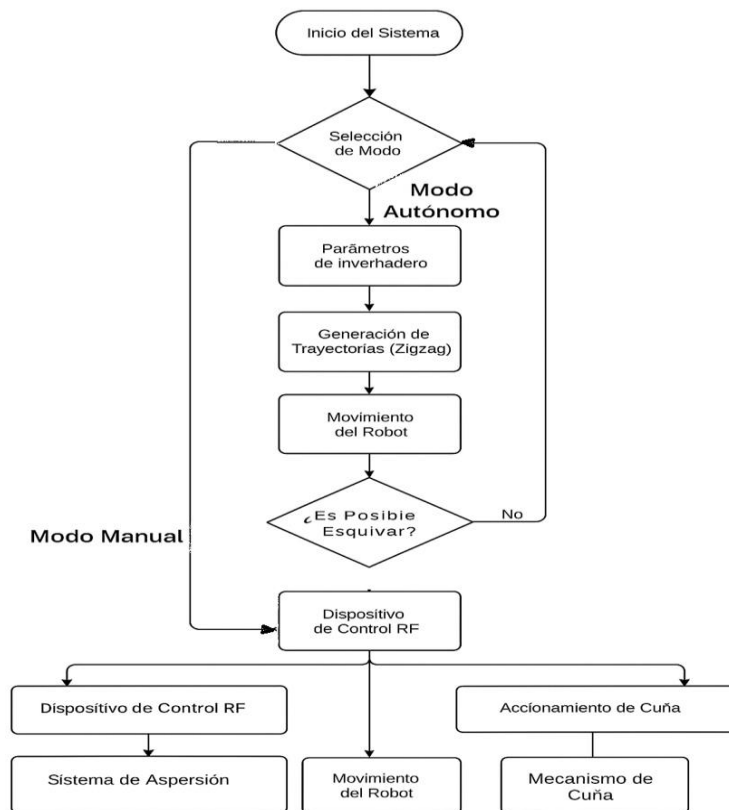


Figura 4.- Esquema de programación del sistema FitoBot .

### Pruebas del Fitobot

Se realizaron pruebas exhaustivas de los subsistemas y componentes de FitoBot para asegurar su correcto funcionamiento. Que se describen a continuación

#### *Pruebas de Conexiones Eléctricas:*

Se verificó la continuidad, polaridad y aislamiento de todo el cableado, así como la correcta integración de los componentes electrónicos (microcontrolador, sensores, actuadores y módulos de potencia). Se aseguró de que no hubiera cortocircuitos ni fallas en la transmisión de energía y señales.

#### *Pruebas de Movimiento Mecánico*

Se evaluó el sistema de tracción, los motores y los brazos abatibles de forma individual. Se verificó la capacidad de los motores para mover el chasis bajo diferentes cargas, la estabilidad de las ruedas en diversas superficies y la fluidez del mecanismo de elevación de la cuña y los brazos, asegurando que no existieran fricciones o bloqueos. En la Figura 5ª se muestra una prueba de movimiento en pasto, movimiento de cuña y aspersión.

### Pruebas de funcionalidad en cultivo de berries

Estas pruebas permitieron evaluar el desempeño de FitoBot en condiciones reales de trabajo y verificar su capacidad para navegar de manera autónoma y aplicar tratamientos fitosanitarios (Figura 5b), considerando los siguiente:

#### *Configuración*

El plantío se organizó en carpas, cada una con 10 surcos.

#### *Dimensiones de Pasillos*

Cada pasillo tenía un ancho de 2.5 metros y una longitud de 30 metros.

#### *Densidad de Plantas*

Había aproximadamente 120 plantas por pasillo, distribuidas uniformemente con 60 plantas por cada lado del pasillo.

Durante estas pruebas de campo, se monitoreó el movimiento del robot, la precisión de su navegación en zigzag y la uniformidad de la aplicación del producto. También se evaluó la eficacia de la detección de obstáculos y la respuesta del sistema de seguridad ante diferentes escenarios.

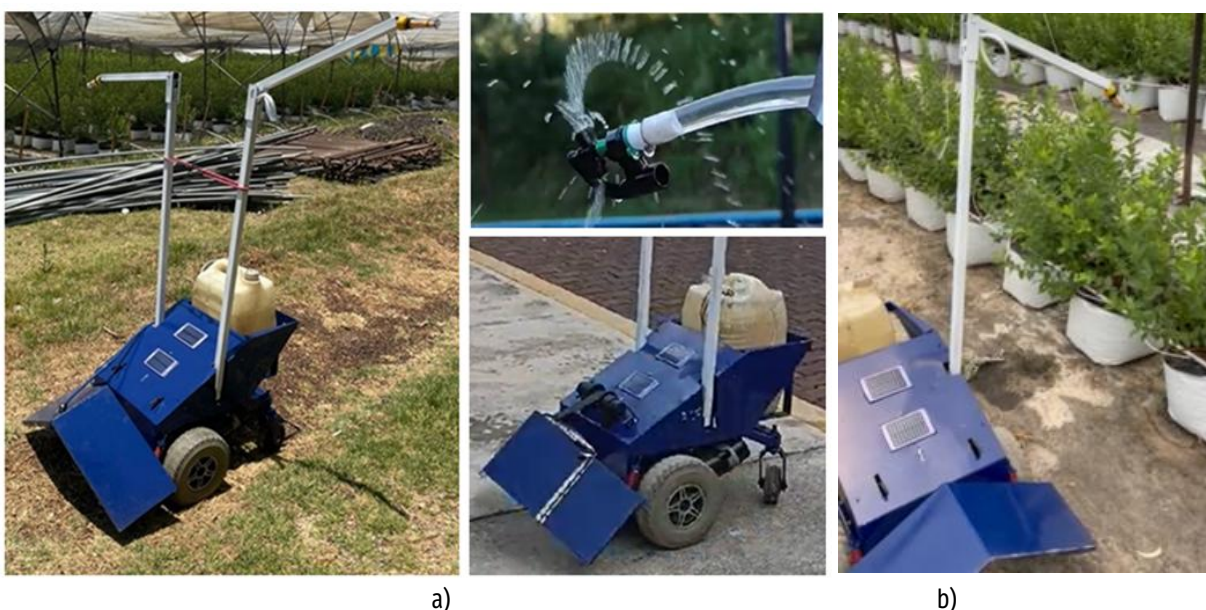


Figura 5.- Prueba de movimiento sobre suelo no regular, aspersión y movimiento de cuña (a). Al final el Fitobot en cultivo de berries (b).

## Resultados y discusión

### Eficiencia de Aplicación y Reducción de Insumos

El sistema de aspersión de FitoBot fue evaluado en su capacidad para reducir el consumo de producto fitosanitario en comparación con métodos tradicionales, para esta prueba se tomaron como base dos domos, el primero donde un usuario utiliza el método manual para aplicar el producto y en el segundo se implementa el robot FitoBot, por seguridad el producto aplicado fue agua. Los resultados muestran una optimización significativa, ya que, la aplicación controlada de FitoBot permitió una reducción sustancial del consumo de solución fitosanitaria y minimizó el desperdicio por mala aplicación, resultando en un uso más eficiente de los insumos (Cuadro 1).

### Precisión de Navegación

La capacidad de FitoBot para navegar autónomamente y cubrir eficazmente los pasillos del invernadero fue un indicador clave de su desempeño. Las pruebas realizadas y resumidas (Cuadro 2) demostraron una alta precisión en la navegación, manteniendo una trayectoria consistente y cubriendo la mayoría del área designada. Las desviaciones y áreas no tratadas representan puntos a refinar en futuras mejoras del software de navegación y control de movimiento.

### Funcionamiento de sensores y sistemas de control

Se realizaron pruebas específicas de los sensores y del control manual del robot. El desempeño de los sensores fue satisfactorio, con un nivel de precisión superior al 90% en la mayoría de los casos. El sistema de control manual demostró ser confiable, aunque se identificó un ligero retardo en condiciones de operación a mayor distancia. El sistema de movimiento presentó buena estabilidad, pero requiere ajustes para adaptarse mejor a diferentes tipos de suelo, tal como se muestra en la Cuadro 3. Si bien la capacidad de esquivar es notable, la optimización de los algoritmos de evasión y la integración de sensores adicionales son las principales áreas de mejora.

Cuadro 1.- Resultados en la eficiencia de la aplicación del producto.

Indicador	Método Tradicional	FitoBot	Observaciones
Consumo de Solución por Pasillo (aprox. 75 m <sup>2</sup> )	7.8 litros	5.1 litros	Se obtiene 34.6% de reducción en el consumo de la solución.
Desperdicio por deriva	Alto	Bajo	Al evitar el movimiento entre lados del pasillo se reduce el consumo, observado en las marcas de líquido sobre el pasillo.
Tiempo promedio por Pasillo	15 min	9 min	Este tiempo es subjetivo al ser aplicación de agua y sin verificar existencia de plaga, por lo que solo sirve para determinar que la aplicación es más rápida con el sistema robótico

### Reducción del contacto humano con el producto fitosanitario

Durante las pruebas de campo se evaluó la interacción del usuario con el producto fitosanitario, comparando el método manual tradicional y el uso de FitoBot. Los resultados observados evidencian una reducción significativa en la exposición del operador al producto fitosanitario. Con el método manual, el usuario entra en contacto directo en múltiples ocasiones, mientras que con FitoBot se limita al momento de llenar el depósito. Este hallazgo valida que el sistema cumple con su objetivo de mejorar la seguridad del operario, aunque se identifica la posibilidad de reducir aún más el contacto implementando un sistema de recarga sellado.

Cuadro 2.- Datos en la precisión del movimiento

Indicador	Valor Medido	Observaciones
Desviación Máxima de la Ruta (cm)	13 cm	Desviación mínima en pasillos rectos, sin embargo, al haber irregularidades en la superficie se generan desviaciones en la tracción que no son medidas ni corregidas
Área no tratada	< 5%	Áreas no tratadas muy pequeñas, principalmente en los extremos de los surcos.
Desviación en el cambio de pasillo (°)	9°	Desviación considerada al girar para cambio de pasillo. Se requiere refinar algoritmos de giro.
Recuperación de ruta al detectar obstáculo grande	80%	En dos de diez pruebas el robot no regresó a la región central del pasillo, por lo que la desviación provocó una dirección sobre las plantas.

Cuadro 3.- Características de las pruebas en sensores y control

Componente	Nivel de desempeño	Observaciones
Sensor de proximidad	95% detecciones correctas	Fallas en superficies muy reflectantes.
Sensor de nivel de tanque	92% precisión	Requiere calibración con líquidos de diferente densidad.
Control manual (RF)	100% respuesta adecuada	Se percibió un leve retardo en distancias grandes.
Sistema de movimiento	93% funcionamiento estable	Dificultades leves en suelos blandos.
Capacidad de esquivar	70% de veces se incorpora	Cuando el margen del pasillo lo permitía y el objeto era pequeño, FitoBot logró esquivar los obstáculos detectados sin detenerse.

### Detección de plagas por IA

El sistema de inteligencia artificial, cuya interfaz se muestra en la Figura 6<sup>a</sup>, aún no presenta resultados en pruebas en condiciones reales, para probarlo se utilizaron imágenes fijas desde un celular que son capturadas por la cámara del robot en las cuales de manera preliminar se detecta la presencia de plagas. El modelo entrenado logró reconocer patrones asociados a manchas con un nivel aceptable de aciertos, lo que representa un avance, tal como se muestra en la Figura 6b. No obstante, los resultados también evidencian limitaciones importantes. La precisión en la detección disminuyó en condiciones de baja iluminación o cuando la dispersión entre berries es alta. En general, estos resultados indican que la IA tiene un potencial considerable como apoyo en la detección temprana de plagas, pero requieren mayor entrenamiento con una base de datos más amplia y variada, además de la integración de técnicas de visión por computadora más avanzadas.

### Conclusión

Los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento de FitoBot constituyen un paso fundamental para el desarrollo de un sistema futuro que permita la detección inmediata y la toma de decisiones autónoma en campo. En las pruebas de campo se evidenció que, si bien el sistema de aspersión es más rápido y uniforme en comparación con la aplicación manual, en terrenos irregulares o con obstáculos el desplazamiento del robot puede presentar limitaciones. De igual forma, los sensores cumplen adecuadamente con las funciones de detección y control, pero aún es posible mejorar la precisión de los algoritmos de visión por computadora y el ajuste fino de los parámetros para garantizar un desempeño más robusto en distintos escenarios de cultivo. En cuanto a la incorporación de inteligencia artificial para la detección de plagas, los avances iniciales muestran un potencial prometedor en la identificación temprana de daños en los cultivos. Sin embargo, el sistema aún presenta limitaciones relacionadas

con la precisión en condiciones variables y la diferenciación entre factores de estrés. Esto abre un campo de mejora en el entrenamiento del modelo y la integración de algoritmos más robustos. En general, FitoBot valida la hipótesis de que la implementación de robótica e inteligencia artificial en el sector agrícola contribuye a procesos más seguros, eficientes y sostenibles. No obstante, los hallazgos también sugieren la necesidad de continuar con fases de mejora en aspectos técnicos y operativos, lo cual abre la posibilidad de integrar versiones futuras con mayor autonomía, sistemas de aprendizaje en tiempo real y conectividad en línea para un monitoreo continuo.

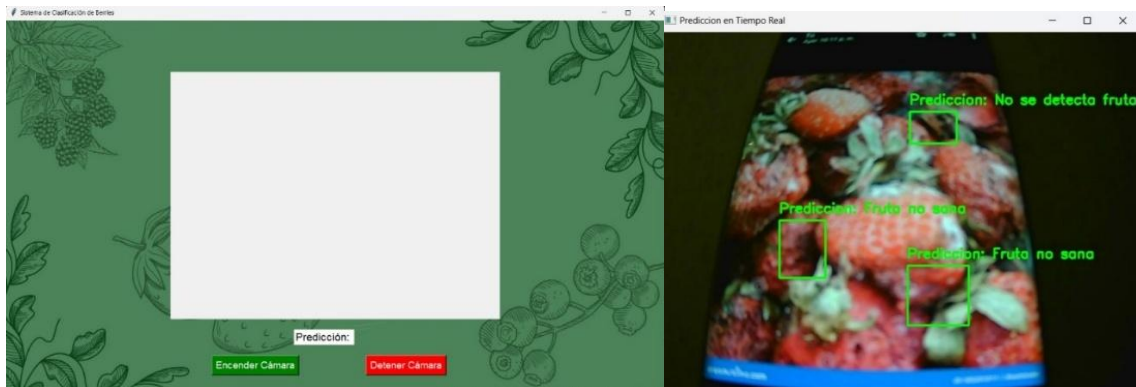


Figura 6.- Interfaz para el análisis de imágenes con IA (a). Prueba de detección con IA sobre una imagen fija (b).

## Referencias

- Agrogama. (2024). Beneficios de la automatización agrícola. Agrogama. Recuperado de <https://agrogama.es/beneficios-de-la-automatizacion-agricola/>
- Camarena-Pozos, D. (2023). Prácticas de manejo de plaguicidas y percepciones de impactos a la salud y al medio ambiente entre usuarios de la cuenca del Río Turbio, Guanajuato, México. *Acta Universitaria*, 33, e3749. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3749>
- Castillo Díaz, F. J. (2025, 7 de agosto). La progresiva digitalización de los invernaderos. Plataforma Tierra. Recuperado de <https://www.plataformatierra.es/148edalyc148ón/la-progresiva-digitalizacion-de-los-invernaderos>
- El Amraoui, K., El Ansari, M., Lghoul, M., El Alaoui, M., Abanay, A., Jabri, B., Masmoudi, L., & Valente de Oliveira, J. (2024). Embedding a Real-Time Strawberry Detection Model into a Pesticide-Spraying Mobile Robot for Greenhouse Operation. *Applied Sciences*, 14(16), 7195. <https://doi.org/10.3390/app14167195>
- FAO. (2015). La degradación de las tierras y el uso sostenible de los suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de <https://www.fao.org/desertification-and-drought-day/es>
- FAO. (2019). El uso de plaguicidas y su impacto en la salud y el medio ambiente. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/ca7033es/ca7033es.pdf>
- Ordoñez-Beltrán, V., Frías-Moreno, M. N., Parra-Acosta, H., & Martínez-Tapia, M. E. (2019). Estudio sobre el uso de plaguicidas y su posible relación con daños a la salud. *Revista de Toxicología*, 36(2), 148-162. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91967023011>
- Padhiary, M., Kumar, A. & Sethi, L.N (2025). Emerging technologies for smart and sustainable precision agriculture. *Discov. Robot.* 1, 6 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44430-025-00006-0>
- Rodríguez, F., Sánchez-Hermosilla, J., Rivera, L., & Giménez, A. (2016). Análisis de viabilidad de la utilización de robots en invernaderos. Propuesta para el modelo Almería [Actas del II Simposio Nacional de Ingeniería Hortícola:

- Automatización y TICs en agricultura, Acta N° 72]. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas (SECH). <http://www.sech.info/ACTAS/Acta%20n%C2%BA%2072.%20II%20Simposio%20nacional%20de%20Ingenier%C3%Ada%20Hort%C3%Adcola/A%CC%81rea%20Tema%CC%81tica%201.%20Automatizacio%CC%81n%20y%20Robotizacio%CC%81n/Ana%CC%81lisis%20de%20viabilidad%20de%20la%20utilizacio%CC%81n%20de%20robots%20en%20invernaderos.%20Propuesta%20para%20el%20modelo%20Almeri%CC%81a.pdf>
- Smitt, C., Halstead, M., Zaenker, T., Bennewitz, M., & McCool, C. (2020). PATHoBot: A robot for glasshouse crop phenotyping and intervention. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.16272>
- TrackitAgro. (2021). 5 Beneficios de la agricultura de Precisión en Cultivos de Exportación. TrackitAgro. Recuperado de <https://www.trackitagro.com/5-beneficios-de-la-agricultura-de-precision/>
- Sánchez Cortés, D. J., & Sánchez Cortés, E. (2020). *Análisis económico y ambiental por el uso de biodigestores y motogeneradores en el Estado de Puebla*. Universidad Autónoma Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/2199>

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D DIGITAL DE UN BIORREACTOR DE INMERSIÓN TEMPORAL PARA CULTIVO DE TEJIDOS VEGETALES.

[ANALYSIS AND DESIGN BY 3D PRINTING OF A TEMPORARY IMMERSION BIOREACTOR FOR PLANT TISSUE CULTURE]

Mario Ruiz Vázquez<sup>1</sup>, Luis Lorenzo Valera Montero<sup>1</sup>, Silvia Flores Benítez<sup>1</sup> y Apolinar Velarde Martínez<sup>1\*</sup>

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, División de Estudios de Posgrado e Investigación. El Llano, Aguascalientes, México.

\*Autor de correspondencia: apolinar.vm@llano.tecnm.mx

ORCID: 0000-0002-6867-9414

### Resumen

En esta investigación se presenta el desarrollo de un biorreactor con la capacidad de uso doble bajo el mismo diseño, combinando los métodos de: Tanques Gemelos y RITA<sup>®</sup>. Donde se muestra el análisis, el diseño, la construcción y costo de replicabilidad, realizada mediante la tecnología de Modelado por Deposición Fundida (FDM); fabricación aditiva, que crea objetos tridimensionales añadiendo material capa por capa según un diseño digital. Permitiendo fabricar piezas desde prototipos rápidos hasta productos finales con una gran variedad de materiales y precisiones de impresión 3D.

Palabras clave: Inmersión temporal, 3D, cultivo de tejidos vegetales.

### Abstract

This research presents the development of a bioreactor with dual functionality under the same design, combining the Twin Tank and RITA<sup>®</sup> methods. It shows the analysis, design, construction, and replicability cost, carried out using Fused Deposition Modeling (FDM) technology, an additive manufacturing process that creates three-dimensional objects by adding material layer by layer according to a digital design. This allows for the manufacture of parts ranging from rapid prototypes to final products with a wide variety of materials and 3D printing precision.

Keywords: Temporal immersion, 3D, plant tissue culture.

### Introducción

Los problemas relacionados con la deficiencia de la producción y la distribución de alimentos para consumo humano y animal, así como el alto consumo de estos con fines de producción de biocombustibles son problemas que se enfrentarán para el año 2030 (Chávez-García *et al.*, 2018; Muñíz, 2018; Chandran, 2020; Hasnain *et al.*, 2022; Sidik *et al.*, 2024). Aunado a lo anterior, existen otros dos problemas adicionales que el ser humano debe enfrentar (Muñíz, 2018; Morales *et al.*, 2022): el cambio climático y el poco margen de tierras cultivables algunas, con degradación y limitaciones relativas al tipo de suelo; se estima que para el 2030 un incremento del 80% sea necesario en la producción de alimentos y se tendrá que proceder a una intensificación agrícola que se traduzca en el aumento del rendimiento y la intensidad del cultivo en la misma área disponible, a través de prácticas sostenibles y sin duda no se podrá continuar con las prácticas degradantes del monocultivo y el uso irracional de los insumos agrícolas (Muñíz, 2018). La FAO (2009) y (Muñíz 2018) proponen el incremento de la producción a partir de la misma área de tierra, al tiempo que se reducen los efectos negativos para el medio ambiente y se aumenta la contribución al capital natural y humano y al flujo de servicios. Para lo anterior el cultivo de tejidos vegetales *in vitro* es una técnica de la biotecnología vegetal que ha venido enfrentando los problemas anteriores. El cultivo de tejidos vegetales *in vitro* ha permitido tener plantas libres de microorganismo, homogeneidad genética cuando así se requiere, obtención de plántulas completas de cualquier órgano de la planta, además de ser una herramienta para el mejoramiento genético.

La micropropagación *in vitro* se refiere al proceso de producir numerosas plantas a partir de pequeños fragmentos de tejido vegetal (Steward *et al.*, 1970; Ontaneda *et al.*, 2020; Castañeda-Nava *et al.*, 2021; Kulus *et al.*, 2024). La micropropagación *in vitro* aborda diversos desafíos que enfrentan los métodos tradicionales como las tasas de crecimiento lentas, la esterilidad de las plantas, la susceptibilidad a enfermedades, falta de uniformidad y la disponibilidad limitada de material de siembra; el cultivo *in vitro* mejora la eficiencia en la propagación de los cultivos y obtiene material de alta calidad genética y fitosanitaria, nos permite un mayor valor genético del material vegetal, preserva genotipos y complejos genéticos, en bancos clonales y arboretos (Chávez-García *et al.*, 2018; Muñiz, 2018; Ontaneda *et al.*, 2020); Chandran, 2020; Castañeda-Nava *et al.*, 2021; Hasnain *et al.*, 2022; Morales *et al.*, 2022; Sidik *et al.*, 2024; Dolcet-Sanjuan *et al.*, 2024; Kulus *et al.*, 2024). Los biorreactores para cultivo de tejidos vegetales (CTV) para plantas, reducen costos entre un 50 y 60% de producción por planta; esto como consecuencia de la mecanización y semi automatización de algunas etapas de la micropropagación. Los biorreactores obtienen el control de una propagación masiva de explantes expuestos a un volumen de medio líquido, con tiempo y frecuencia de inmersión determinados, mejorado la eficiencia y la realización de escalabilidad a nivel industrial (Muñiz, 2018; Ontaneda *et al.*, 2020; Castañeda-Nava *et al.*, 2021; Morales *et al.*, 2022; Kowalczyk *et al.*, 2022; Hasnain *et al.*, 2022; Dolcet-Sanjuan *et al.*, 2024). En el mercado existen diferentes tipos y marcas de SIT empleados para la micropropagación vegetal; los más utilizados son: biorreactores RITA®, Recipiente de Inmersión Temporal Automatizado (Alvard *et al.*, 1993; Spinoso-Castillo *et al.*, 2023; Arredondo-Ramírez *et al.*, 2025). A partir de este se han desarrollado varios modelos de biorreactores abiertos que cuentan con inyección de aire (Lotfi *et al.*, 2020), como son; biorreactor SETIS™ (Vervit, Bélgica, distribuido por Du chefa Biochemie), el BIT, Biorreactor de Inmersión Temporal (Escalona *et al.*, 1999), el BIG (Biorreactor de Inmersión por Gravedad) o también llamado de biorreactor de flujo y reflujo (Ducos *et al.*, 2007) y biorreactor MATIS® (Etienne *et al.*, 2013), frascos gemelos (Escalona *et al.*, 1999), Plantima® (Wu *et al.*, 2018), por mencionar algunos. Por otro lado, están los biorreactores cerrados que no utilizan inyección de aire, como el We Vitro by Magenta® y el biorreactor nacional BioMint™ (Robert *et al.*, 2006). En base lo anterior este proyecto tiene como objetivo presentar el análisis y diseño de un Biorreactor bajo el Sistema de Inmersión Temporal (SIT) para la clonación y/o multiplicación de plantas, utilizando un enfoque de bajo costo, materiales accesibles y reproducibilidad, enfocado en la utilización de materiales accesibles, buscando obtener resultados en la eficiencia y la viabilidad contra los sistemas de cultivo *in vitro* en medio semi sólido y líquido.

## Materiales y métodos

### Requisitos para la implementación de un biorreactor

#### *Requisitos biológicos*

Mantener la esterilidad durante los ciclos de inmersión. Evitar la acumulación de medio líquido (encharcamientos) en el recipiente-frasco en el estado de "aireación" o "exposición al aire", garantizando un intercambio gaseoso suficiente para evitar hipoxia en los explantes. Controlar la duración y frecuencia de las inmersiones (entre 1 a 5 minutos cada 4 a 12 horas). Evitar daños mecánicos a los tejidos por burbujeo excesivo o turbulencia (agitación brusca). Adaptar el sistema a medios de cultivo de distinto volumen. La opción a renovación de la atmósfera dentro del recipiente de cultivo, ya sea aireación pasiva o activa.

#### *Requisitos técnicos*

Capacidad total máxima promedio en los BIT comerciales 1000 mL (de una a dos cámaras dependiendo el modelo, por lo general requieres una cámara con 100 – 500 mL de capacidad de medio por ciclo). Diseño modular para permitir desmontaje, ya sea para una renovación de medio y continuar con el ciclo o uno nuevo, y/o para realizar su limpieza, desinfección y esterilización. Materiales resistentes a la temperatura y/o resistentes a procesos químicos de desinfección, como a la manipulación manual y mecánica en el SIT, manteniendo la presión de aireación. Opcionalmente se pueden incorporar los sensores de nivel, las electroválvulas, el motor y el controlador Arduino o los temporizadores (*Timers* por su nombre en inglés); la incorporación de estos dispositivos depende del diseño y del control (semi automatización) con el que se diseñe el modelo del BIT. Programación o semiautomatización del flujo de aire y tiempo de inmersión mediante relevadores controlados por un microcontrolador o por temporizadores para su accionamiento, esto también depende del modelo a realizar.

### Requisitos funcionales:

Ciclos de inmersión reproducibles y homogéneos. Hermeticidad con el ambiente externo del interno, evitando contaminación. Bajo consumo energético y de poco riesgo; la manipulación del prototipo debe ser de  $\leq 24$  V DC (Corriente Directa) para el control y de  $\leq 127$  V CA (Corriente Alterna) para la potencia, buscando seguir lo más acertado a la NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas. Adaptabilidad a distintos tipos de frascos o módulos.

### Diseños tomados como modelo del biorreactor

Se efectuó una revisión de alternativas de materiales disponibles en el mercado que ofrecieran buena relación costo-beneficio, priorizando aquellos que garantizan durabilidad, resistencia y compatibilidad con las condiciones de operación del dispositivo. El Cuadro 1 incluye lista de materiales y el método de fabricación que están construidos; de estos materiales se seleccionó el método de fabricación.

Cuadro 1. Tipos de biorreactores para cultivo de tejidos vegetales, con su material y método de fabricación.

Modelo	Material	Fabricación
BioMINT™II	Policarbonato transparente.	Inyección.
BIT® (Biorreactor de Inmersión Temporal) Frascos o tanques gemelos	Vidrio o policarbonato transparente (PET o policarbonato).	Soplado de Vidrio/inyección.
GreenTray® ajo Costo	Policarbonato o vidrio.	Inyección.
GreenTray®	PA12 (poliamida 12).	Impresión 3D (PBF).
RITA® (Recipiente de Inmersión Temporal Automatizado)	Policarbonato autoclavable.	Inyección.
Biorreactor mecánico BWA	Contenedor cilíndrico de vidrio Pyrex con tapa hermética de polipropileno.	Desarrollo propio del autor.
Shukla <i>et al.</i> , (2017)	Impreso en policarbonato (PC) y tapas secundarias impresas en PLA.	Impresión 3D (FDM)/ Inyección.

### Diseño de piezas del biorreactor

Para el diseño de piezas fue realizado en SolidWorks, que es un software de diseño asistido por computadora (CAD) especializado en modelado mecánico en 3D y planos en 2D. Todas las piezas son diseño propio, de igual manera las piezas fueron laminadas con el software Bambu Studio, impresas con una impresora 3D Bambu Lab A1, con una boquilla acero inoxidable de diámetro 0.4 mm y una placa PEI texturizada. Se uso filamento Ender PLA hecho en china, color blanco, con un diámetro de  $1.75 \pm 0.03$  mm, cada carrete con un peso de 1,000 gramos, con especificaciones de extrucción de la boquilla entre 190° - 220°C, con temperatura en la cama de impresión de 25° - 60°C y una velocidad recomendada de 40 - 80 mm/s.

### Concepción de la creación del biorreactor

Para la creación de un biorreactor consta de 3 empaquetados, 2 por la parte superior de la tapa y uno para la parte inferior que sella con el cuello roscado del frasco, como se muestra en el Cuadro 2. Para nuestro prototipo se reutilizaron frascos de Nescafé Dolca® de la presentación de contenido neto de 300 gramos.

Cuadro 2. Tipos y medidas de empaquetado a usar por biorreactor.

Pieza	Tipo de empaquetado	Medidas
Tapa parte inferior: sellado con el cuello roscado del frasco.	Empaque de nitrilo	TS. 2.625 x 3.000 x 0.203
Tapa parte superior: sellado con los conectores de aireación y Tapones agarradera - Tapa vs agua	O-ring y/o empaques de nitrilo (Puede ser ambos)	12x3

## Con

### sideraciones para la fabricación del biorreactor

Se valoraron los perfiles de impresión, la máquina a usar y el costo del filamento, teniendo una variación considerable si se adquieren filamento de alta calidad, tener una mala configuración en el laminador, como de la máquina y sus condiciones de operación y mantenimiento. Las geometrías se diseñaron para poder ser imprimibles sin soportes. Todos los cálculos fueron realizados de pieza en pieza por separado, los costos y tiempos son obtenidos de BambuStudio®. Para fines prácticos no se considera los filtros, las mangueras, la bomba y los temporizadores que constituyen el medio de control; todas estas piezas constituyen un presupuesto con costos de mercado

## Resultados

### Tiempo y costo de impresión de piezas del biorreactor

En el Cuadro 3 se indica tiempo de fabricación (impresión) y costo de material, se presentan las piezas del prototipo y la funcionalidad del mismo. Para este ejercicio el costo del filamento fue considerado en \$455.00. De igual manera acorde al tamaño de las camas de impresión se puede generar más piezas en una sola ejecución.

Cuadro 3. Tiempo y costos de impresión de piezas para construir un biorreactor con doble modo de operación como Tanques Gemelos y RITA.

Pieza	Tiempo de impresión	Costo por pza.
Contenedor de Aireación: (250 ml.)	54 m 27 s	\$10.78
Contenedor de Explantes	3 h 20 m	\$15.35
Eje Soporte central de aireación: (250 ml.)	1 h 56 m	\$6.30
Conector de aireación de 4mm -6mm, con M12x1.5.	33 m 23 s	\$1.24
Conector de aireación de 6mm, con M12x1.5.	33 m 5 s	\$1.25
Tapones agarradera - Tapa vs agua con M12x1.5.	27 m 54 s	\$0.96
Tapones lisos - Tapa vs agua con M12x1.5.	24 m 36s	\$0.82
Filtro de explantes 6mm con M12x1.5.	29 m 48 s	\$.86
Tapa con roscas M10x1.5 y M12x1.5	3 h 15 m	\$23.8
Empaque de nitrilo TS. 2.625 x 3.000 x 0.203	N/A	\$29
O-ring y/o empaques de nitrilo, 12x3, 14x2.5, 16x2.5	N/A	\$10

### Diseño de los componentes de un biorreactor

En la Figura 1 se muestran los componentes individuales de un biorreactor, así como la función específica dentro del mismo.

#### *Contenedor de aireación (Figura 1a)*

Sirve de almacenamiento de aire, permitiendo el desplazamiento del medio líquido una vez que se almaceno en el mismo contenedor, esto permite cambiar la altura del medio liquido dentro del frasco y no solo burbujear, la altura que se desplaza (volumen), está relacionado directamente con el volumen de esté, lo que le permite manejar diferentes volúmenes. Cuerda central: N/A. Altura: Variable. Diámetro: 6.5 cm.

#### *Contenedor de explantes (Figura 1b)*

Almacena los explantes vegetales, permitiendo que se expongan al medio líquido y a retenerlos en el mismo, donde se lleva el crecimiento, multiplicación y/o enraizamiento de los explantes. Cuenta con una cuerda en la parte central lo que le permite sujetarse al “Eje soporte central de aireación”. Cuerda central: M10x1.5. Altura: 7.5 cm. Diámetro: 6.5 cm.

#### *Eje central soporte de aireación (Figura 1c)*

El sistema fija los contenedores de aireación y de explantes a la tapa, permitiendo cambiar de frasco sin manipular los explantes. Integra dos cuerdas: la superior para enroscar con la tapa y la inferior para acoplar el contenedor de explantes, además de una base inferior que se une al módulo de aireación. Cuerdas centrales: M10x1.5. Altura: Variable.

#### *Conector de aireador (Figura 1d)*

Admite mangueras de 4 mm y 6 mm, lo que lo hace universal. Se instala en la parte superior de la tapa para aireación activa o pasiva. Puede funcionar como conector de medio en configuraciones de tanques gemelos, aunque no es la opción recomendada. Cuerda central: M12x1.5. Altura-Conector: 20 mm.

#### *Conector de aireador tipo dual (Figura 1e)*

Permite la conexión de mangueras de 6 mm y se instala en la parte superior de la tapa para aireación activa o pasiva. También puede emplearse como conector de medio en sistemas de tanques gemelos, siendo la opción recomendada para ese uso. Cuerda central: M12x1.5. Altura-Conector: 10 mm.

#### *Tapones tipos agarradera (Figura 1f)*

Permite sellar la tapa para pruebas de hermeticidad. Se coloca en la tapa en las conexiones de aireación, se llena el frasco con agua, se cierra y se invierte durante 36 horas, verificando la integridad del empaque de la tapa y de las conexiones de aireación, como de las piezas impresas. Cuerda: M12x1.5.

#### *Tapones tipo lisos (Figura 1g)*

Permite sellar la tapa para pruebas de hermeticidad. Se coloca en la tapa en las conexiones de aireación, se llena el frasco con agua, se cierra y se invierte durante 36 horas, verificando la integridad del empaque de la tapa y de las conexiones de aireación, como de las piezas impresas. Cuerda: M12x1.5.

#### *Filtros de explantes (Figura 1h)*

Permite filtrar el medio de los explantes. Se conecta mediante una manguera de 6 mm a la salida de aireación pasiva de la tapa y al filtro, dejándolo boca abajo en la parte inferior del frasco para optimizar la filtración. Longitud de conexión: 15 mm. Diámetro de orificios: 2 mm.

#### *Tapa de conexión dual (Figura 1i)*

Pieza central con dos roscas M12x1.5 en la parte superior para acoplar conectores de aireación o tapones. En la parte inferior integra una rosca M10x1.5 para unir el “Eje Soporte central de aireación” y permitir una estructura desmontable. Incluye además una conexión lateral de 6 mm para conducir una manguera hacia la base del frasco y habilitar el modo de tanques gemelos. Diámetro Interno: 77.2 mm.

Contenedor de Aireación (a)	Contenedor de explantes (b)	Eje Soporte central de aireación ©
-----------------------------	-----------------------------	------------------------------------

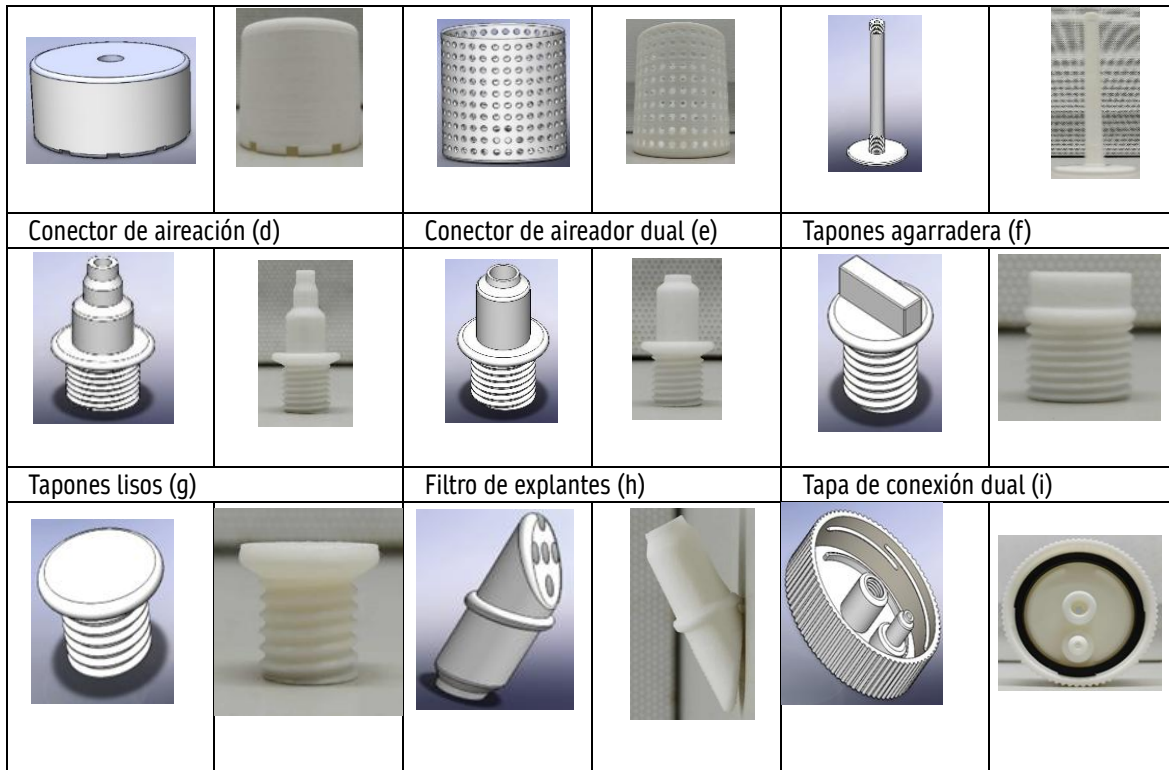


Figura 1. Diseño y elaboración en impresora 3D de elementos de un biorreactor

### Biorreactor generado

Con lo anterior se construyó un biorreactor de operación dual con las siguientes características como se observa en la Figura 2, el cual se caracteriza con los siguientes atributos.

#### *Flexibilidad operativa*

El sistema puede configurarse en dos modos independientes, permitiendo ajustar el comportamiento del biorreactor sin necesidad de cambiar de equipo. Esto facilita comparar condiciones experimentales bajo la misma geometría y mismo conjunto de materiales.

#### *Control independiente de volúmenes*

El diseño dual permite modificar de forma precisa: Volumen total de medio. Volumen útil disponible para los explantes. Volumen interno del recipiente. Lo anterior permite estudiar cómo la relación medio/biomasa afecta la calogénesis, organogénesis o enraizamiento.

#### *Variabilidad estructurada para experimentación*

El usuario puede evaluar cómo los cambios en volumen, flujo de aire o altura de inmersión afectan: disponibilidad de oxígeno, velocidad de crecimiento, hidratación del tejido, acumulación de compuestos inhibitorios, sin tener que construir múltiples prototipos.

#### *Comparación directa de aireación*

El mismo dispositivo permite realizar comparaciones entre: modo de aireación pasiva, modo de aireación activa. Modo de tanques gemelos, reduciendo ruido experimental porque la geometría y los materiales se mantienen constantes.

#### *Optimización del medio y recursos*

El usuario puede operar con volúmenes reducidos o expandidos sin modificar la infraestructura, permitiendo: pruebas preliminares con menos insumos, escalamiento más racional y ahorro de medio y reactivos.

### Reconfiguración sin alterar los explantes

La estructura modular permite cambiar el modo de operación sin exponer los explantes o manipularlos directamente, reduciendo: contaminación, daños mecánicos y variabilidad por manipulación.

Figura 2. Diseños y armado del biorreactor "Dual" en sus dos modos de operación.



Figura 4. Biorreactores Dual y sus componentes. Fuente Propia.

### Conclusiones

En este trabajo se generó un diseño integral de un biorreactor basado en el Sistema de Inmersión Temporal. La fabricación empleó materiales de bajo costo y procesos reproducibles, lo que facilita la posterior replicación del sistema. La incorporación de impresión 3D por tecnología FDM demostró ser una herramienta altamente útil en el entorno de laboratorio. El biorreactor es una alternativa accesible, adaptable y eficiente para estudios de propagación vegetal en sistemas de inmersión temporal.

## Referencias

- Chávez-García, J. A., Andrade-Rodríguez, M., Juárez-López, P., Villegas-Torres, O. G., Sotelo-Nava, H., & Perdomo-Roldan, F. (2018). EVALUATION OF THREE *in vitro* CULTURE SYSTEMS FOR THE MULTIPLICATION OF GLADIOLUS MICROCORMS. *Revista fitotecnica mexicana*, 41(4a), 551-554.
- Muñiz, R. (2018). La propagación in vitro de plantas con Sistemas de Inmersión Temporal. Una Tecnología Apropriada para la agricultura sustentable. *Tekhné*, 21(3).
- Chandran, H. M. (2020). Plant tissue culture as a perpetual source for production of industrially important bioactive compounds. *Biotechnology reports*, 1-10.
- Hasnain, A., Naqvi, S. A., Ayesha, S. I., Khalid, F., Ellahi, M., Iqbal, S., & Abdelhamid, M. M. (2022). Plants in vitro propagation with its applications in food, pharmaceuticals and cosmetic industries; current scenario and future approaches. *Frontiers in plant science*, 1-21.
- Sidik, N. J., Agha, H. M., Alkamil, A. A., Alsayadi, M. M., & Mohammed, A. A. (2024). A Mini Review of Plant Tissue Culture. The Role of Media Optimization, Growth Regulators in Modern Agriculture, Callus Induction and the Applications, 96-109.
- Morales, C. R., Dolcet-Sanjuan, R., Caballero, M. L., Sánchez, M. I., Angel, M. B., & Antonio, D. I. (2022). Micropropagación de *Agave marmorata* utilizando un nuevo sistema de inmersión temporal. *Cienc. Tecnol.*, 10-16.
- FAO, (2009) Expert Meeting on How to Feed the World in 2050. Disponible en: <https://www.fao.org/4/ak542e/ak542e06.pdf>.
- Steward F., Ammirato P., Mapes M. 1970. Growth and development of totipotent cells; some problems, procedures and perspectives. *Ann. Bot.* 34:761-787
- Ontaneda, A. L. C., Herrera, A. M., & Batista, R. M. G. (2020). Eficiencia del sistema de inmersión temporal frente al método de propagación convencional in vitro. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 3(2), 173-182.
- Castañeda-Nava, J. J., & Diaz, E. L. Temporal Immersion Systems an Alternative for Micropropagation. *Tópicos de Herramientas Biotecnológicas para el Desarrollo Agrícola*, 28.
- Kulus, D., & Tymoszuk, A. (2024). Advancements in in vitro technology: A comprehensive exploration of micropropagated plants. *Horticulturae*, 10(1), 88.
- Dolcet-Sanjuan, R., Casanovas, M., Franquesa, S., Alsina, E., Carrasco-Cuello, F., Torres, E., & Teixidó, N. (2024). GreenTray®, a TIS Bioreactor for Plant Micropropagation and Abiotic or Biotic Stress Bioassays. *Applied Sciences*, 1-18.
- Kowalczyk, T., Merez-Sadowska, A., Picot, L., Brčić Karačonji, I., Wieczfinska, J., Śliwiński, T., & Sitarek, P. (2022). Genetic manipulation and bioreactor culture of plants as a tool for industry and its applications. *Molecules*, 795.
- Shukla, M. R., Singh, A. S., Piunno, K., Saxena, P. K., & Jones, A. M. P. (2017). Application of 3D printing to prototype and develop novel plant tissue culture systems. *Plant Methods*, 13(1), 6.
- Arredondo-Ramírez, C. A. ., Arellano-Ostoa, G. ., Chávez-Franco, S. H. ., García-Villanueva, E. ., López-Reyna, M. del C. ., & Caamal-Velázquez, J. H. . (2025).
- Gautheret, R. (1983). Plant tissue culture: a history. *Bot. Mag. Tokyo* 96: 393-410
- Convenio sobre la Diversidad Biológica. (1992). Disponible en: <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>.
- Monja-Mio, K.M., Olvera-Casanova, D., Herrera-Herrera, G. et al. Mejora de la fase de enraizamiento y aclimatación ex vitro de *Agave tequilana* mediante sistema de inmersión temporal (BioMINT)™. *Célula in vitro.Dev.Biol.-Plant* 56, 662-669 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11627-020-10109-5>
- Delfino, P., Rivata, R., & Bima, P. (2020). Sistema de Inmersión Temporal (SIT): alta eficiencia en la propagación in vitro del portainjerto híbrido *Prunuspersica* x *P. amygdalus*. *Nexo agropecuario*, 8(1), 13-18.
- SPINOSO-CASTILLO, J. L. Utilización de biorreactores semiautomatizados como herramienta para la micropropagación sustentable de agave (*Agave potatorum* Zucc.). *AGAVE Y MEZCAL ENTRE LA TRADICIÓN Y LA DENOMINACIÓN DE ORIGEN*, 214.
- Alvard, D., Cote, F. y Teisson, C. (1993). Comparison of methods of liquid medium culture for banana micropropagation. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 32(1), 55-60. Recuperado de <https://acortar.link/rxzLYP>

- Lotfi, M., Bayoudh, C., Werbrouck, S., & Mars, M. (2020). Effects of meta-topolin derivatives and temporary immersion on hyperhydricity and in vitro shoot proliferation in *Pyrus communis*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 143(3), 499-505.
- Escalona, M., Lorenzo, J. C., González, B., Daquinta, M., González, J. L., Desjardins, Y. y Borroto, C. G. (1999). Pineapple (*Ananas comosus* L. Merr) micropropagation in temporary immersion systems. *Plant Cell Reports*, 18(9), 743-748. Recuperado de <https://acortar.link/z8DikB>
- Ducos, J. P., Lambot, C. y Pétiard, V. (2007). Bioreactors for coffee mass propagation by somatic embryogenesis. *International Journal of Plant Developmental Biology*, 1(1), 1-12.
- Etienne, H., Bertrand, B., Georget, F., Lartaud, M., Montes, F., Dechamp, E., Verdeil, J. L. y Barry-Etienne, D. (2013). Development of coffee somatic and zygotic embryos to plants differs in the morphological, histochemical and hydration aspects. *Tree Physiology*, 33(6), 640-653. Recuperado de <https://acortar.link/L7FP3j>
- Wu, H. C., Kuo, M. L., & Chen, C. M. (2018). Promotion of vegetative growth in force-ventilated *Protea cynaroides* L. explants cultured in modified temporary immersion culture vessels. *HortScience*, 53(2), 231-235.
- Robert, M. L.; Herrera-Herrera, J. L.; Herrera-Herrera, G.; Herrera-Alamillo, M. Á. and Fuentes-Carrillo, P. 2006. A new temporary immersion bioreactor system for micropropagation. In: Loyola-Vargas, V. M. and Vázquez-Flota, F. *Methods in Molecular Biology*. 318(2):121-130. Humana Press. <https://doi.org/10.1385/1-59259-959-1:121>.
- Ruta, C., De Mastro, G., Ancona, S., Tagarelli, A., De Cillis, F., Benelli, C. y Lambardi, M. (2020). Large-scale plant production of *Lycium barbarum* L. by liquid culture in temporary immersion system and possible application to the synthesis of bioactive substance. *Plants*, 9(7), 1-10. Recuperado de <https://acortar.link/E60rll>
- Murthy, H. N., Joseph, K. S., Paek, K. Y., & Park, S. Y. (2023). Bioreactor systems for micropropagation of plants: present scenario and future prospects. *Frontiers in plant science*, 1-17.
- Gautheret, R. (1983). Plant tissue culture: a history. *Bot. Mag. Tokyo* 96: 393-410
- Convenio sobre la Diversidad Biológica. (1992). Disponible en: <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>.

## SECCIÓN: TECNOLOGIA DE INFORMACION



2025,3(1): 160 - 169.

**DIEZ HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN Y SEGUIMIENTO DE PROGRAMAS ACADÉMICOS EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR: REVISION**

## TEN ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS FOR IMPLEMENTING AND MONITORING ACADEMIC PROGRAMS IN HIGHER EDUCATION: REVIEW

Ana Lucía Noriega Durón<sup>1</sup>, Laura Tristán de la Cruz<sup>1</sup>, Ma. Del Carmen Arias González<sup>1</sup>, Gabriela Jaime Carachure<sup>1</sup>, Ramón Favio Ramírez Báez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Km 18 carr. Ags.-S.L.P., El Llano, Ags., C.P. 20330 México.

Autor de correspondencia: [laura.td@llano.tecnm.mx](mailto:laura.td@llano.tecnm.mx)

ORCID:0009-0009-2772-3376.

### Resumen

La inteligencia artificial (IA) se ha consolidado como una herramienta transformadora en la educación superior, al facilitar la implementación y seguimiento de programas académicos. Esta revisión explica el uso de diversas plataformas como Zotero, Grammarly, Perplexity, Canvas, QuillBot, NotebookLM, Quizizz, Flameshot y Poe, destacando su facilidad de acceso y empleo tanto para estudiantes como para profesores. Estas aplicaciones resultan valiosas para apoyar la formación profesional y la investigación, al ofrecer procesos simples y rápidos que optimizan las actividades académicas. En el ámbito estudiantil, la IA permite un aprendizaje adaptable con retroalimentación personalizada, ajustada a los estilos cognitivos individuales. Esto contribuye a mejorar el rendimiento académico, fortalecer competencias digitales, incrementar la motivación y fomentar la autonomía en el proceso formativo. Para el profesorado, las herramientas digitales representan una ventaja al reducir tiempos en tareas administrativas, optimizar la evaluación y el análisis de datos, y permitir mayor dedicación a la tutoría, la investigación y la innovación pedagógica. Además, favorecen la diversificación de estrategias didácticas apoyadas en tecnología. A nivel institucional, la IA impulsa la eficiencia en la gestión académica y administrativa, así como en la planificación de programas y en la toma de decisiones estratégicas basadas en datos, lo que fortalece la calidad educativa y la competitividad universitaria. Sin embargo, su implementación enfrenta limitaciones: la necesidad de infraestructuras robustas, inversiones sostenibles y la persistencia de la brecha digital. Asimismo, existe resistencia al cambio entre docentes y administradores, derivada de la falta de formación y tiempo, junto con preocupaciones éticas y normativas sobre la protección de datos y la equidad en el acceso tecnológico.

**Palabras clave:** Inteligencia artificial; Educación superior; Innovación educativa; Gestión académica; Competencias digitales; Transformación pedagógica

### Abstract

Artificial Intelligence (AI) has become a transformative element in higher education by facilitating the implementation and monitoring of academic programs. This review explains the use of tools such as Zotero, Grammarly, Perplexity, Canvas, QuillBot, NotebookLM, Quizizz, Flameshot, and Poe in undergraduate education. These tools, characterized by their accessibility and ease of use, offer practical guidance for both students and faculty, supporting professional preparation and research activities. The integration of AI is increasingly recognized as a core strategy in higher education, reshaping experiences at the student, faculty, and institutional levels. For students, AI enables personalized learning through immediate and adaptive feedback, enhancing academic performance, digital competencies, motivation, and autonomy. For faculty, AI tools streamline administrative tasks, optimize assessment and data analysis, and allow greater focus on mentoring, research, and innovation. They also support the diversification of teaching strategies through technological resources. At the institutional level, AI contributes to more efficient management, resource optimization, and program planning. Moreover, it strengthens decision-making processes with data-driven insights, thereby improving the quality and positioning of universities competitively. Despite these benefits, several challenges remain. Effective implementation requires robust infrastructure and sustainable investment, which can exacerbate inequalities in resource-limited settings. Additionally, resistance to change among faculty and administrators persists, often due to insufficient training and lack of time for adaptation. Ethical and regulatory

concerns, particularly regarding data protection and equitable access, also continue to pose obstacles. These factors highlight the dual role of AI in higher education: as both a driver of innovation and a source of ongoing challenges.

Keywords: Artificial intelligence; Higher education; Educational innovation; Academic management; Digital skills; Pedagogical transformation.

## Introducción

La educación superior está viviendo en este instante una transformación radical por causa del rápido crecimiento de las tecnologías digitales, principalmente de la inteligencia artificial (IA). Las universidades y centros de educación superior tienen el reto de preparar a los estudiantes para un entorno laboral cuya característica saliente es el proceso automatizado, la toma de decisiones basada en datos e informaciones y la continua necesidad de actualizar las competencias digitales. Por tanto, las herramientas que incorporan IA están siendo integradas en la educación no solamente como un posible recurso pedagógico, sino también como un aspecto estratégico de la gestión, seguimiento y mejora de los programas académicos. La implementación de la IA en la educación superior está justificada por un conjunto de factores. Por un lado, el aumento de la cantidad de información que existe en el ámbito científico, tecnológico y educativo ha hecho necesario desarrollar sistemas que permitan la búsqueda, organización y análisis de datos, pero, por otro lado, el modelo de enseñanza-aprendizaje implica una forma de enseñar y aprender flexible, personalizada y eficaz que induce la autonomía del alumno y la mejora continua del docente. Las herramientas de IA permiten hacer frente a estos retos al optimizar procesos, así como reducir tiempos administrativos, e incluso facilitar feedback inmediato para los estudiantes y para los docentes. Hasta llegar a un grupo de plataformas como Zotero, Grammarly, Perplexity, Canvas, Quillbot, NotebookLM, Quizizz, Flameshot y Poe, que representan una diversidad de aplicaciones desde la redacción o gestión de referencias hasta la realización de entornos de aprendizaje interactivos y documentación de evidencias (como se aprecia en la Figura 1). El impacto que tienen estas tecnologías no queda circunscrito a la gestión de los programas académicos, sino que involucra también la formación de los estudiantes en competencias digitales (como se puede observar en el Cuadro 2). La UNESCO (2023) indica que la educación superior debe encontrar su papel principal en el fomento del desarrollo de capacidades para la crítica y ética de la IA para que quienes serán los futuros profesionales hagan uso de estas herramientas teniendo conocimiento de sus limitaciones y riesgos. Por lo tanto, no se han de evaluar las plataformas en sí mismas únicamente en los términos de eficacia técnica, sino que se han de poner a prueba también las medidas éticas, pedagógicas y sociales. Este manuscrito examina la utilización de estas herramientas de inteligencia artificial para poner en práctica y hacer un seguimiento a los programas de formación en la educación superior. La intención es determinar las ventajas, desventajas y expectativas de uso a corto y medio plazo; con este fin se presenta un espacio de convivencia como una estructura de integración estratégica que aborde la técnica, la pedagogía y la ética.

## Herramientas de IA aplicables en la educación superior

### Zotero: gestión automatizada de referencias

**Zotero** es un gestor de bibliografía totalmente gratuito que ayuda a recoger, organizar y citar literatura científica. Aunque no es una herramienta de IA en el sentido estricto de la palabra, incorpora algoritmos que aseguran la detección automática de metadatos en artículos, libros, páginas web, entre otros, facilitando el proceso de investigación en ciencias. En el ámbito de la educación superior, Zotero es un recurso más que importante para los programas académicos que incorporan investigación formativa y trabajos finales de titulación, tal y como es su posibilidad de sincronizarse en la nube. Las propiedades de trabajo colaborativo en los grupos de investigación que lo puede ofrecer en el caso de proyectos de investigación convierten a Zotero en un gran aliado del trabajo en proyectos de investigación.

Figura 1. Aplicación de programas de IA para seguimiento y fortalecimiento de programas académicos.

### PROGRAMAS DE IA PARA

Diseño curricular	Perplexity NotebookLM
Producción de materiales	Grammarly Quillbot, Poe
Gestión académica	Canva
Evaluación y seguimiento	Quizizz + Canvas
Documentación y evidencias	Flameshot
Investigación y extensión	Zotero



### Guía rápida para utilizar Zotero

Accede a la web oficial de Zotero: <https://www.zotero.org>, Descarga e instala:

Acceder a Zotero Desktop: es el programa principal para gestionar referencias.

Acceder al conector de Zotero: es la extensión para tu navegador (Chrome, Firefox o Edge) que permite capturar referencias directamente de páginas web, bases de datos y catálogos.

#### a). Crear tu biblioteca

Ejecuta Zotero Desktop.

Dirígete a "Mi biblioteca" a continuación haz clic en "Nueva colección" para organizar tus documentos por proyecto, tema o materia. En el interior de la colección que hayas creado puedes empezar a añadir documentos manualmente pinchando en el botón "Nuevo ítem" y seleccionando el tipo (título de un libro, un artículo, una entrada de una página web, una tesis, etcétera.)

#### b). Captura automática de referencias

Con el instalador del **Zotero Connector** ya activado, dirígete a cualquier fuente académica (por ejemplo, Google Scholar o bien una base de datos local). Haz clic en el icono que aparece en la barra del navegador. El Zotero Connector detectará automáticamente qué tipo de fuente es y guardará todos sus datos (autor, título, año, DOI, etc.) en tu colección. Puedes arrastrar PDFs directamente en el interior de tu referencia para tenerlos como adjuntos.

#### c). Tomar notas y organizar

Haz clic en el acceso directo a una referencia y "**Notas**". Puedes redactar comentarios, resúmenes o citas clave. Clasifica tus referencias a través de etiquetas y carpetas según tema, interés o proyecto.

#### d). Insertar citas y bibliografía en Word o Google Docs

Procede con el proceso que has de hacer para instalar el **plugin de Zotero para Word o LibreOffice** (que se instala generalmente de manera automática en el Zotero Desktop). En el documento en que estás trabajando: debes elegir "**Agregar cita**" y buscar la referencia que deseas citar. Elige el estilo de citación que desees (APA, MLA, Chicago, etc.). Si quieres la bibliografía completa: simplemente añade "**Agregar bibliografía**" y Zotero te generará automáticamente la lista de todas las referencias que has citado.

#### e). Sincronización y trabajo colaborativo

Abre una cuenta Zotero gratuita y ve a **Editar** → **Preferencias** → **Sincronización** para activar la sincronización en línea. Podrás acceder a tu biblioteca desde cualquier computadora o dispositivo. Forma **grupos de colaboración** para poder compartir referencias y PDFs con tus compañeros de clase o equipo de investigación.

### **Grammarly: escritura académica asistida por IA**

La herramienta de corrección gramatical y de estilo **Grammarly** hace uso de algoritmos de procesamiento del lenguaje natural (NLP) para detectar errores relacionados con la ortografía, la puntuación y la coherencia entre las distintas partes del texto. Su opción premium hace recomendaciones relacionadas con el tono, la claridad y la concisión, características que la convierten en un recurso clave para una producción académica de calidad. En la educación superior, se utiliza Grammarly tanto en asignaturas en que se enseña la escritura académica como en másteres donde la producción de artículos científicos constituye el eje central del programa. Gracias a su uso, el alumnado tiene la posibilidad de mejorar sus propias habilidades de redacción en el mismo proceso de escribir, y a la vez va disminuyendo la carga que la corrección de textos representa para los docentes (Dale, 2021).

### **Guía rápida para usar Grammarly**

#### **a). Acceso y configuración**

Ingresa a Grammarly.com. Regístrate con tu correo (puedes usar Google o Microsoft). Instala la extensión en tu navegador (Chrome/Edge), o descarga la app para escritorio y móvil.

#### **b) Modos de uso**

Existen numerosas formas de cómo puedes usar Grammarly:

**La extensión del navegador:** a dominio de Chrome, trabaja en Gmail, Google Docs, WhatsApp Web.

**El editor web:** puedes pegar o escribir el texto que deseas en app.grammarly.com.

**La aplicación de escritorio/móvil:** trabaja con las aplicaciones Word, Outlook, etc.

**La integración con Microsoft Word y Outlook:** descargando el complemento desde la página de Grammarly.

#### **c). Funciones principales**

**Corrección de la gramática y ortografía:** Indica si tienes errores en inglés y corrígelos.

**Estilo y claridad:** Ofrece sugerencias de frases más cortas y fáciles de entender.

**Tono de escritura:** Modifícalo si deseas ponerte formal, simpático, académico, persuasivo, etc.

**Plagio (Premium):** Compara tu texto con fuentes que puedas encontrar online para comprobar que no hay plagio.

**AI Writing (GrammarlyGO):** generar o volver a escribir un texto con Inteligencia Artificial (resumir, generar correos, ensayos, ideas...). Cómo usar GrammarlyGO (AI) Escribe o copia tu texto. Haz clic en el icono de la “**estrella AI**” ✨.

Selecciona qué deseas hacer: reescribir el texto, hacerlo más corto, formal o persuasivo, generar nuevas ideas o ejemplos... Revisa las sugerencias y acepta las que sean de tu interés.

### **Perplexity: búsqueda inteligente y síntesis de información**

**Perplexity** es un motor de búsqueda basado en IA que combina técnicas de NLP con modelos de generación de lenguaje para proporcionar respuestas contextualizadas a preguntas complejas. A diferencia de los motores de búsqueda convencionales, Perplexity no solo aporta enlaces, sino que tiende a mostrar información relevante de diversas fuentes de forma comprensible. En programas académicos, esta herramienta se puede emplear en actividades de investigación documentales, seminarios de tesis, proyectos interdisciplinarios y, al proporcionar resúmenes y referencias, facilita la búsqueda y disminuye la sobrecarga informativa (Kraus, 2023)

#### **Guía Rápida para Utilizar Perplexity AI**

**a). Acceder** Utiliza tu navegador de Internet y usa el enlace <https://www.perplexity.ai> para acceder. Si no tienes una cuenta regístrate usando tu correo electrónico.

**b). Introducir las Consultas** Introduce tu consulta en lenguaje natural, por ejemplo: "Describe las teorías principales del aprendizaje aplicadas a la educación superior". Haz un Enter y obtendrás los resultados.

**c). Consultar los Resultados** Lee el resumen que da Perplexity AI, consulta las referencias que se citan y comprueba la información. Si necesitas más información ve haciendo preguntas de seguimiento.

**d). Usar la Información** Copia la información relevante para tu trabajo, trabajo de investigación o estudio. Acuérdate siempre de citar las fuentes correspondientes siguiendo las normas académicas (independientemente de que sean del tipo APA, MLA, etc..).

### **Canvas: gestión de cursos y seguimiento académico**

**Canvas** es una de las plataformas LMS más usadas a nivel mundial. Este software incluye algoritmos de analítica de aprendizaje que permiten la monitorización en tiempo real del progreso de los estudiantes, la generación de reportes automáticos y la personalización de rutas de aprendizaje. En el contexto de la educación superior, Canvas se aplica en la gestión de los cursos virtuales e híbridos, en la distribución de los materiales didácticos, en la gestión de la evaluación y en la comunicación relativa a la atención del alumnado. Su interfaz fácilmente usable y sus capacidades de accesibilidad hacen de Canvas una opción flexible para instituciones con programas académicos diversos (Brown, 2021).

### **Guía Rápida para uso de Canvas**

**a). Acceso a la plataforma:** Abrir el navegador web, acceder al enlace de canvas institucional. Iniciar sesión con las credenciales que se entregan desde la universidad. Verificar el perfil personal (nombre, fotografía, correo electrónico).

**b). Navegar en un primer momento:** Consultar el panel de control (dashboard) donde se visualizarán los cursos a los que se ha sido asignado. Ingresar en el curso/navegar en él. Familiarizarse con los menús: módulos, tareas, calificaciones, foros, anuncios y calendario.

**c). Configuración del curso (para docentes):** Desglosar los bloques o módulos temáticos según la planificación del curso. Subir materiales de estudio: pdf, presentaciones, vídeos, enlaces. Configurar actividades: tareas, cuestionarios, encuestas. Configurar fechas de entregas y parámetros de evaluación. Activar actividades de comunicación: foros, mensajes internos, anuncios.

**d). Participar en las actividades (para estudiantes):** Consultar los módulos liberados atendiendo al cronograma. Descargar y revisar los materiales de estudio. Cumplir con las tareas a lo largo de las entregas establecidas. Participar en foros, discusiones, cumpliendo las normas de convivencia académica. Completar los cuestionarios y exámenes en la plataforma.

**e). Seguimiento y retroalimentación:** Los docentes revisan entregas, proporcionan comentarios y califican las tareas enviadas. Los estudiantes pueden consultar en tiempo real la retroalimentación. Consultar las estadísticas del progreso y la participación disponibles en el curso.

**f). Comunicación y soporte:** Utilizar la mensajería interna para resolver dudas con los docentes o compañeros. Consultar la sección de Ayuda de Canvas en caso de problemas. Participar en sesiones de soporte institucional si se requiere más ayuda.

**Quillbot: parafraseo y apoyo a la redacción**

**Quillbot** constituye un asistente de escritura que opera con inteligencia artificial y que se dedica al parafraseo, la revisión del estilo de redacción y la producción de resúmenes. Hace uso de modelos de NLP penetrados en grandes cuerpos textuales, de modo que es capaz de reformular párrafos enteros mientras se mantiene el sentido original de los mismos. En el ámbito de la educación superior, Quillbot se utiliza en talleres de escritura académica, en la redacción de ensayos y en la elaboración de artículos de investigación. Puede asumir, por tanto, la función de reformular textos que contribuyan a mejorar la claridad y a modificar los riesgos de plagio involuntario (Dwiwedi et al. 2023).

### Guía rápida para uso de QuillBot

#### a). Acceso a QuillBot.

Ve al sitio web: <https://quillbot.com/es/>. Regístrate o inicia sesión en el caso de que ya tuvieras una cuenta.

**b). Selección de herramienta.** Parafraseo: para reescribir textos y evitar plagio. Resumen: para sintetizar textos extensos. Corrector gramatical: para detectar y corregir errores. Generador de citas: para crear automáticamente las referencias.

**c). Introducción del texto.** Copia y pega el texto que deseas trabajar en el cuadro de entrada.

**d). Revisión y edición.** Revisa las sugerencias que da QuillBot. - Reescribir el texto de acuerdo con tus gustos e intercálalo como se consideren necesarias.

**e). Generación de Citas.** Emplea el generador de citas para obtener las referencias en formato APA; requiere otra. Transfiere la cita para poder usarla en los trabajos académicos.

### NotebookLM: organización del conocimiento académico

**NotebookLM** es un programa de Google que une las características de un cuaderno digital, junto con un procesador de textos y capacidades de IA conversacional. Permite cargar documentos y hacer preguntas para interrogar la información que contienen, facilitando así la organización de la información compleja en las investigaciones. En el ámbito de los programas de investigación, ha sido utilizado para analizar literatura científica, escribir revisiones sistemáticas o elaborar informes. NotebookLM se ha convertido en un “asistente de investigación” capaz de responder preguntas específicas a partir de los documentos cargados (Google Research, 2023).

### Guía rápida para usar NotebookLM (AI)

**a). Iniciar** Ve a [notebooklm.google.com](https://notebooklm.google.com) y entra con tu cuenta de Google. Google NotebookLM Ayuda de Google. Crea tu primer "notebook" y sube tus fuentes: pueden ser PDFs, Google Docs, enlaces web, Google Slides, texto copiado o incluso vídeos con transcripción. DataCamp Ayuda de Google.

**b). Características clave.** **Resumen automático:** obtén un resumen al subir tus documentos junto a temas principales e ideas para investigar. [blog.google](https://blog.google) Ayuda de Google **Chat contextual:** haz preguntas en lenguaje natural para profundizar en los contenidos, respuestas fundamentadas y referenciadas. DataCamp Ayuda de Google. **Formatos útiles:** genera documentos tipo guía de estudio, hoja de ruta, pregunta-respuesta (FAQ), cronogramas, esquemas. [blog.google](https://blog.google) Google Sites. **Audio Overviews (resúmenes en audio/podcast):** transforma tus contenidos en conversaciones tipo podcast con voces fluidas y naturales. DataCamp TIME Cinco Días

**c). Consejos para sacarle partido** al servicio Comienza por tus documentos recientes / Si son diversos, mejor para experimentar toda su potencia. [blog.google](https://blog.google) . **Crea un notebook todo y otros notebooks temáticos** / Como manera de investigar ideas generales o de profundizar en proyectos específicos. [blog.google](https://blog.google). **Utiliza las preguntas sugeridas** / Como manera de moverte entre los contenidos de manera más efectiva si no sabes por qué preguntar primero. [blog.google](https://blog.google) Solicita diferentes formatos / Por ejemplo, resúmenes, presentaciones, audio o cronologías, según tu estilo

de aprendizaje. [blog.google](https://www.google.com) Sites. **Guarda los resultados importantes** / Al final del chat, puedes guardar respuestas como notas dentro del notebook. DataCamp

### Quizizz: evaluación gamificada con analíticas

**Quizizz** es una herramienta de evaluación online muy aplicada que combina elementos de gamificación y algoritmos de retroalimentación directa. Permite a los docentes crear cuestionarios interactivos y extraer métricas del rendimiento en tiempo real. Después de diez años apoyando a docentes y estudiantes en cualquier lugar del mundo, Quizizz ha pasado a ser Wayground. La nueva marca refleja la transformación del producto, que del cuestionario original ha pasado a ser una plataforma complementaria de aprendizaje automatizado por IA. En la educación superior Quizizz se usa en cursos preliminares a los cursos de grado, exámenes de diagnóstico y actividades de repaso. El diseño lúdico de su interfaz fomenta la motivación de los estudiantes e induce prácticas colaborativas (Kahoot & Quizizz Research, 2022).

#### Para ingresar a Quizizz

**a). Guía rápida** para el uso de Quizizz. Entra a [Quizizz.com](https://quizizz.com); regístrate como profesor utilizando tu correo institucional o con tu cuenta Google.

**b) Crear cuestionario.** Haz clic en "Create" (Crear). Escoge Quiz (Cuestionario). Agrega preguntas (puede ser de tipo opción múltiple, verdadero-falso, completar el espacio en blanco, etc.). Personaliza con imágenes, audio o memes educativos.

**c) Asignar a los estudiantes.** En vivo (clase): Haz clic en el módulo "Start a Live Quiz" (Empieza un cuestionario en vivo) escoge el modo Clásico (individual) o Equipo. Los estudiantes deben entrar en [joinmyquiz.com](https://joinmyquiz.com) con un código PIN. Como tarea (homework): Haz clic en "Assign Homework" (Asignar tarea). Define hasta cuándo tendrás abierta la tarea. Comparte el enlace o el código con los estudiantes.

**e) Seguimiento y resultados** Terminada la actividad, revisa el panel de reportes. Identifica los aciertos y errores. Explora las estadísticas del desempeño global o por cada estudiante de la actividad o por grupo.







### Flameshot: documentación y evidencias gráficas



**Flameshot**, como herramienta para la captura de pantalla, se vale de un amplio repertorio de recursos de edición y anotación. No se puede considerar una aplicación de IA en sentido estricto, pero encuentra su espacio en el ámbito académico como recurso para evidenciar procesos y actividades de tipo gráfico. En programas académicos, Flameshot tiene su uso en la elaboración de manuales o el diseño de reportes visuales, así como en la manutención de la evaluación de proyectos. Su simpleza y versatilidad contribuyen para que se presente como especialmente útil en la docencia en la virtualidad, entre otros (Santos, 2022). Pedagógicamente Flameshot aporta una mejora a la comunicación visual y va a contribuir a mencionar y definir la forma en la que va la retroalimentación de la docencia.

#### Guía Rápida para uso de Flameshot.

Descárgalo desde la página oficial: <https://flameshot.org/>.. Ejecútalo desde el terminal Flameshot GUI. También lo puedes configurar para ejecutarlo desde atajos de teclado, p. ej.: PrtSc → abre Flameshot directamente.

#### a). Funciones principales:

-  **Dibujar** → trazar líneas o formas.
-  **Rectángulo / Elipse** → marcar zonas de interés.
-  **Texto** → agregar anotaciones.
-  **Resaltador** → subrayar o marcar información.
-  **Flechas** → señalar elementos.
-  **Pixelar / Difuminar** → ocultar datos sensibles.

-  **Copiar al portapapeles** → pegar en documentos o chats.
-  **Guardar como archivo** → exportar en formatos como PNG o JPG.

### **Poe: integración de modelos conversacionales**

**Poe** es una herramienta que permite combinar varios modelos de IA conversacionales (por ejemplo, ChatGPT, Claude, etc.) en un mismo espacio. Su función es dar diferentes respuestas rápidas, análisis de textos y la generación de textos adaptados. En el contexto de la educación superior, Poe es usada como tutor online, asistente de escritura y ayuda para resolver dudas académicas. Al combinar los varios modelos, el alumnado tiene la oportunidad de comparar las respuestas y desarrollar su pensamiento crítico a partir de la información recibida (Quora, 2023).

#### **Iniciar Poe**

**a) Entra en la página** web [poe.com](https://poe.com) o bien descárgate la app para dispositivos de iOS [makeuseof.com](https://makeuseof.com) Digital Trends. Regístrate con tu cuenta de Google, Apple o tu cuenta de correo de All About AI.

**b) Dar una vuelta y escoger bots Dentro de la plataforma**, tendrás la posibilidad de utilizar los bots oficiales Assistant, Web Search además de LLMs precargados (GPT-4, Claude) [business.quora.com](https://business.quora.com) Whatsmind. También podrás explorar bots generados por otros usuarios ordenados en distintas categorías como la programación, la enseñanza, juego, escritura, etc. [es.dztechy.com](https://es.dztechy.com)Whatsmind.

**c) Interacción con los bots**, Elige un bot de la lista y escribe tu pregunta o solicitud en el cuadro de chat. Poe te dará una respuesta en cuestión de segundos, por ejemplo "All About AIDigital Trends". Puedes realizar el mismo "prompt" en múltiples bots, de forma que puedes comparar respuestas y elegir la mejor, por ejemplo: "WhatsmindIthy".

**d) Crear tu propio bot**, Poe te permite crear tu propio chatbot sin necesidad de programación. Puedes configurarlos con "prompts" personalizados e incluso monetizarlos, por ejemplo: "[es.dztechy.com/Ithyesdelatino.com](https://es.dztechy.com/Ithyesdelatino.com)". También existe una opción avanzada de bots de servidor, en la que alojas un bot en Python y debes conectarlo mediante URL (por ejemplo: "[es.dztechy.com/](https://es.dztechy.com/)").

#### **e). Compartir y monetizar**

Puedes compartir tus chats fácilmente, con los enlaces de WhatsmindIthy, si creas bots, ahora Poe ofrece también n sistemas monetizados de ingreso por mensajes o bien comisiones por suscripciones Ithyesdelatino.com.

### **Scite.ai.**

Plataforma potenciada por inteligencia artificial que permite a investigadores, académicos, estudiantes y demás evaluar la calidad y el contexto de artículos científicos por medio de lo que se identifica como Smart Citations (o citas inteligentes), mediante un sistema que analiza patrones y tipos de dichas citas para clasificarlas con base en la intención de la misma (es decir, si es de "apoyo", "contradicción" o bien "simplemente una mención") ofreciendo así un entendimiento más rico sobre el impacto de una publicación a partir de ese simple recuento de citas en WikipediaScite.

#### **Estrategia de trabajo con Scite.ai**

##### **a). Búsqueda y diferenciación de citas.**

Acceda a [scite.ai](https://scite.ai), utilice el buscador para encontrar artículos o afirmaciones de citas que le parezcan válidas desde su punto de vista. El uso de la búsqueda avanzada permite filtrar por título, resumen o por tipo de cita referente a los tipos de citas (apoyo, contradicción, mención) utilizando operadores booleanos como AND, OR, NOT <https://biblioteca.hkust.edu.hk/guías/lib.fsu.edu>.

##### **b). Reference Check al escribir**

Comprobación de las referencias escribiendo. Cuando sea necesario preparar el manuscrito puede subirlo a Scite.ai y hacer uso del chequeador de referencias. Reciba advertencias sobre artículos retirados o en entredicho antes de enviar su trabajo <http://library.hkust.edu.hk/Scita>.

#### **c). Tableros personalizados y seguimiento**

Crea un tablero para tus artículos o para tus áreas temáticas. Puedes agregar listas de DOI o trabajos propios para seguir tendencias de citas, alarmas y análisis [Library.hkust.edu.hk](http://library.hkust.edu.hk). Escita

#### **d). Uso del asistente Scite**

Emplea el asistente para preguntas directas como “¿qué impacto tiene el artículo X?”, o para resumir áreas temáticas desde tu tablero. Puedes ajustar parámetros (modelo, longitud de respuesta, años, fuentes, activar “Table Mode” para comparación estructurada) [biblioteca.hkust.edu.hk](http://biblioteca.hkust.edu.hk).

#### **e). Extensión del navegador y otras integraciones**

Instale la extensión para ver las Citaciones inteligentes (Smart Citations?) directamente mientras navega por la literatura académica en línea. Emplea la API o las insignias para incrustar datos de Scite.ai en tu plataforma [researchsolutions.comlibguides.library.arizona.edu](http://researchsolutions.comlibguides.library.arizona.edu).

#### **Proyecciones futuras en educación superior.**

La educación superior se encamina hacia la instalación de enfrentamientos mixtos con la colaboración de la IA el monitoreo del aprendizaje y la gestión académica y los maestros insertan el aspecto crítico y humanista de la enseñanza (Selwyn, 2019). Se prevé un conjunto de ecosistemas digitales integrados capaces de combinar sistemas de gestión, bibliotecas en línea, tecnologías de investigación y sistemas de tutorización en un entorno integrado. La implementación de políticas para la gobernanza de los datos, programas formativos para dotar a los maestros de habilidades digitales y el uso de marcos éticos para el ejercicio responsable y sostenido de la IA serán claves para garantizar el uso equitativo de la IA en la educación superior. La IA se convierte en un aliado estratégico con el fin de garantizar la educación para el siglo XXI de calidad, eficaz e inclusiva.

#### **Referencias**

- Brown, M. (2021). Canvas como sistema de gestión del aprendizaje en educación superior: Adopción e impacto. *Journal of Online Learning Research*, 7(2), 145-160
- Dale, R. (2021). El regreso de los chatbots. *Natural Language Engineering*, 27(1), 1-28. <https://doi.org/10.1017/S135132492000025X>
- Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Baabdullah, A., Ribeiro-Navarrete, S., Giannakis, M., Al-Debei, M., Dennehy, D., Metri, B., Buhalis, D., Cheung, C. M. K., Conboy, K., Davison, R. M., Gupta, B., He, W., Lal, B., Lucini, B., Mossberger, K., Raman, R., Rana, N. P., ... Wirtz, J. (2023). El metaverso más allá de la moda: Perspectivas multidisciplinares sobre los desafíos emergentes, oportunidades y agenda para la investigación, la práctica y la política. *International Journal of Information Management*, 71, 102642. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2022.102642>
- Google Research. (2023). Presentamos NotebookLM: Un cuaderno con inteligencia artificial, basado en tus propios documentos. Google AI Blog. <https://blog.google/technology/ai/notebooklm/>
- Kahoot! & Quizizz Research. (2022). Gamificación en la educación: El impacto de las plataformas de cuestionarios en el aprendizaje y la motivación estudiantil. *EdTech Research Review*, 12(3), 55-68.
- Kraus, S. (2023). El impacto de los motores de búsqueda con inteligencia artificial en la investigación académica y la educación superior. *Journal of Business Research*, 157, 113580. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113580>.

- Quora. (2023). Poe: Una plataforma para asistentes conversacionales impulsados por IA. Quora Inc. <https://poe.com>
- Santos, J. (2022). Flameshot: Una herramienta de código abierto para la documentación visual en entornos de aprendizaje en línea. *International Journal of Educational Technology*, 19(4), 88-96.
- Selwyn, N. (2019). ¿Deberían los robots reemplazar a los docentes? IA y el futuro de la educación. Polity Press.
- UNESCO. (2023). IA y educación: Orientaciones para los responsables de políticas. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000376709>



Imagen creada con Chat GPT con la siguiente instrucción: Apoyarme con una imagen tipo dibujo que implique la aplicación de programas de inteligencia artificial en programas académicos en la educación superior.



**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



# CONVOCATORIA NUEVO INGRESO ENERO 2026

## A DISTANCIA

INGENIERÍA EN SISTEMAS  
COMPUTACIONALES

INGENIERÍA EN GESTIÓN  
EMPRESARIAL

## SABATINO

LICENCIATURA EN ADMINISTRACIÓN  
INGENIERÍA EN AGRONOMÍA

Acreditado por COMESA



### PARA MÁS INFORMACIÓN



449-507-0193



449-962-1100 Ext. 208



@tecnm\_llano



@TecnMLlanoAgs



TecnM  
CERCA  
DE TI



SOLICITUD



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



**ITEL**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO EL LLANO  
AGUASCALIENTES

# MAESTRÍA EN CIENCIAS EN BIOTECNOLOGÍA AGROPECUARIA

**Ciencia y  
Tecnología**

Secretaría de Ciencia, Humanidades,  
Tecnología e Innovación



Programa acreditado por  
el Sistema Nacional  
de Posgrados  
(SNP)

## Líneas de investigación:

BIOTECNOLOGÍA PARA PLANTAS DE ZONAS ÁRIDAS  
Y SEMIÁRIDAS  
Mejoramiento y conservación del genoplasma in vitro.  
Manejo integrado de cultivos.

BIOTECNOLOGÍA EN CIENCIA ANIMAL  
Diagnóstico y epidemiología de enfermedades,  
alimentación y nutrición.



### Inversión inicial:

Inscripción semestral  
**\$5,941.00**  
Examen de Admisión:  
**650.00**

Inicio de cursos:  
**Agosto 2026**

@TecNMLlanoAgs

@itel\_ags

@TecNMLlanoAgs

(449) 962 11 00 Ext. 212 y 101

depi\_llano@tecnm.mx

www.llano.tecnm.mx



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



**ITEL**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO EL LLANO  
AGUASCALIENTES

# DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIOTECNOLOGÍA EN PROCESOS AGROPECUARIOS

POSGRADO MULTISEDE CON EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TLAJOMULCO



**Ciencia y Tecnología**

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

POSGRADO RECONOCIDO POR EL SISTEMA NACIONAL DE POSGRADOS



**LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:**

**BIOTECNOLOGÍA DE ALIMENTOS (ITTJ)**

**BIOTECNOLOGÍA APLICADA A CIENCIA ANIMAL**

**BIOTECNOLOGÍA DE PLANTAS**

**Inversión inicial**

Inscripción semestral

**\$7,921.00**

Ficha: **\$650.00**

**Mayor información**

depi\_llano@llano.tecnm.mx

luis.vm@llano.tecnm.mx

**INICIO DE CURSOS:**

**ENERO 2026**



<https://llano.tecnm.mx/>

@itel\_ag

@TecNMLlanoAgs

@TecNMLlanoAgs



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

