

Evaluación de un Sustrato Orgánico y Biofermentos en la Producción Sustentable de Pimiento Morrón (*Capsicum annuum* L.) en Invernadero Performance Evaluation of Organic Substrate and Bioferments in Sustainable Greenhouse-Grown Bell Pepper (*Capsicum annuum* L.)

Pedro Sandoval-Estrada^{1†} , Daniel Emiliano Rodríguez-Medina¹ , Javier Perez-Inocencio² , Cruz Ernesto Aguilar-Rodríguez¹ y Oscar Eduardo Aguilar-Rodríguez¹

¹ Tecnológico Nacional de México, ITS de Los Reyes. Carretera Los Reyes-Jacona km 3, Col. San Rafael. 60330 Los Reyes de Salgado, Michoacán, México; (P.S.E.), (D.E.R.M.), (C.E.A.R.), (O.E.A.R.).

[†] Autor para correspondencia: pedro.se@losreyes.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México, IT de Jiquilpan. Carretera Nacional km 202, Col. Centro. 59514 Jiquilpan de Juárez, Michoacán, México; (J.P.I.).

RESUMEN

La búsqueda de alternativas sostenibles a los fertilizantes sintéticos ha intensificado el interés en sistemas de producción orgánica, especialmente en cultivos de alto valor económico como el pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.). El objetivo de esta investigación fue evaluar la efectividad de un sustrato orgánico formulado a partir de residuos agroindustriales y tres biofermentos como alternativa sostenible. El experimento se estableció en Los Reyes, Michoacán, bajo un diseño completamente al azar con seis tratamientos y diez repeticiones. El sustrato orgánico se formuló con estiércol bovino (30%), polvo de fibra de coco (25%), cascarilla de arroz (22%), cachaza de caña de azúcar (15%), harina de pescado (5%), roca fosfórica (2%) y cal dolomita (1%), se añadió el 1% de levadura de cerveza en relación con el volumen final del sustrato. Se evaluaron tres biofermentos (Bio.1, Bio.2, Bio.3) con diferentes formulaciones, comparándolos con solución Steiner y un testigo orgánico. Las variables medidas incluyeron altura de planta, diámetro de tallo, número de frutos y peso promedio de frutos. El sustrato orgánico presentó propiedades físicas óptimas: porosidad total 88%, porosidad de aireación 23.97% y capacidad de retención de agua 64.15%. Las características fisicoquímicas fueron apropiadas (pH 7.1, CE 0.85 dS m⁻¹, CIC 49.14 me 100g⁻¹). El biofermento Bio.3 mostró la mayor efectividad, con plantas de 79.1 cm de altura y frutos de 203 g, valores estadísticamente similares a los tratamientos con fertilización convencional (85.3 cm y 200-207 g). Los biofermentos cumplieron estándares microbiológicos (libres de patógenos). Los hallazgos demuestran que el sustrato orgánico combinado con Bio.3 constituye una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sostenible para la producción de pimiento morrón en invernadero, con rendimientos y calidad comparables a los sistemas convencionales mientras promueve la economía circular y reduce la dependencia de insumos sintéticos.

Palabras clave: agricultura sostenible, biofermentos, invernadero, residuos agroindustriales.

SUMMARY

The search for sustainable alternatives to synthetic fertilizers has intensified interest in organic production systems, especially in high-value crops such as bell pepper (*Capsicum annuum* L.). The objective of this research was to evaluate the effectiveness of an organic substrate formulated from agro-industrial waste and three biofertilizers as a sustainable alternative to conventional chemical fertilizers in bell pepper cultivation under greenhouse conditions. The experiment was established in



Cita recomendada:

Sandoval-Estrada, P., Rodríguez-Medina, D. E., Perez-Inocencio, J., Aguilar-Rodríguez, C. E., & Aguilar-Rodríguez, O. E. (2026). Evaluación de un Sustrato Orgánico y Biofermentos en la Producción Sustentable de Pimiento Morrón (*Capsicum annuum* L.) en Invernadero. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-13. e2387. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2387>

Recibido: 14 de agosto de 2025.
Aceptado: 21 de noviembre de 2025.
Artículo. Volumen 44.
Marzo de 2026.

Editor de Sección:
Dra. Circe Aidín Aburto-González

Editor Técnico:
Dr. Gerardo Cruz Flores



Copyright: © 2026 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Los Reyes, Michoacán, Mexico, under a completely randomized design with six treatments and ten replications. The organic substrate was formulated using bovine manure (30%), coconut fiber powder (25%), rice husks (22%), sugarcane filter cake (15%), fish meal (5%), phosphate rock (2%), dolomitic lime (1%), and brewer's yeast (1%). Three bioferments (Bio.1, Bio.2, Bio.3) with different formulations were evaluated and compared with the Steiner nutrient solution and an organic control. The measured variables included plant height, stem diameter, number of fruits, and average fruit weight. The organic substrate presented optimal physical properties, with total porosity of 88%, air porosity of 23.97%, and water retention capacity of 64.15%. Its physicochemical characteristics were also appropriate (pH 7.1, EC 0.85 dS m⁻¹, CEC 49.14 me 100 g⁻¹). Bioferment Bio.3 showed the highest effectiveness, producing plants with an average height of 79.1 cm and fruits weighing 203 g, values statistically similar to those obtained with conventional fertilization (85.3 cm and 200–207 g). All biofertilizers complied with microbiological standards and were free of pathogens. The findings demonstrate that the organic substrate combined with Bio.3 constitutes a technically viable and environmentally sustainable alternative for greenhouse bell pepper production, providing yields and fruit quality comparable to conventional systems while promoting circular economy principles and reducing dependence on synthetic inputs.

Index words: sustainable farming, organic agriculture, greenhouse, waste valorization.

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria ha intensificado la búsqueda de alternativas ecológicas al uso de los fertilizantes sintéticos convencionales en la agricultura moderna (Raj, Maharabam y Patel, 2024). Esta transición hacia prácticas agrícolas más sostenibles es especialmente relevante en el contexto actual, donde el mercado global de fertilizantes orgánicos se proyecta alcanzar US\$15.7 mil millones para 2029, reflejando una creciente demanda por sistemas de producción ambientalmente responsables (Mordor Intelligence, 2023).

El pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) representa una de las hortalizas de mayor importancia económica y nutricional a nivel mundial, caracterizada por su alto contenido de vitaminas, antioxidantes y compuestos bioactivos (Mejía-Pérez et al., 2023). En México en el año 2023, el cultivo protegido de *Capsicum annuum* L. en invernaderos permitió obtener rendimientos significativamente superiores (115.95 Mg ha⁻¹) comparados con la producción a campo abierto (43.72 Mg ha⁻¹), además de proporcionar mayor control sobre las condiciones ambientales y la calidad final del producto (SIAP, 2020).

Los sustratos orgánicos y biofertilizantes han demostrado ser alternativas prometedoras que no solo aportan nutrientes esenciales, sino que también mejoran las propiedades físicoquímicas y biológicas del medio de crecimiento. La vermicomposta y sus lixiviados, por ejemplo, proporcionan una liberación gradual de nutrientes y favorecen el establecimiento de comunidades microbianas beneficiosas que promueven el crecimiento vegetal y la resistencia a patógenos (Héctor-Ardisana, Torres, Fosado, León, 2019¹).

Investigaciones recientes han confirmado los efectos positivos de estos sistemas orgánicos en el cultivo de pimiento. Héctor-Ardisana et al. (2019¹) reportaron incrementos significativos en el rendimiento y calidad del fruto mediante el uso de vermicompost, mientras que Camacho-Rodríguez et al. (2022), demostraron que los biofertilizantes basados en rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal mejoran significativamente el desarrollo y productividad de *Capsicum* spp. Adicionalmente, estos sistemas contribuyen a la reducción del impacto ambiental de la agricultura convencional, promoviendo la conservación de los recursos naturales y la biodiversidad del suelo.

En el contexto agroecológico actual, la restauración de suelos degradados mediante enmiendas orgánicas y rotaciones diversificadas constituye una parte intrínseca de la agricultura orgánica, especialmente considerando los desafíos impuestos por el cambio climático y la necesidad de desarrollar sistemas resilientes y sostenibles. La utilización de residuos agroindustriales como base para la formulación de sustratos y biofertilizantes representa una estrategia de economía circular que permite la valorización de subproductos mientras se reduce la dependencia de insumos sintéticos (Layek et al., 2023).

¹ Héctor-Ardisana, E. F., Torres-García, A., Fosado, O., & León-Aguilar, R. V. (2019). Influencia del vermicompost sobre variables fisiológicas y el rendimiento en pimiento (*Capsicum annuum* L.) híbrido Quetzal. En *Memorias del VII Congreso Latinoamericano de Agroecología*. Guayaquil, Ecuador.

Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación fue evaluar la efectividad de sustratos orgánicos formulados a partir de residuos agroindustriales y biofermentos como alternativa sostenible a los fertilizantes químicos convencionales en el cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de invernadero, considerando parámetros de rendimiento, calidad del fruto y sostenibilidad del sistema productivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del Experimento

El experimento se estableció en la nave de invernadero "A" del Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes, ubicado en el municipio de Los Reyes, Michoacán, México (19° 36' 52.5" N y 102° 28' 39.6" O, a 1300 m de altitud). Las condiciones ambientales promedio del invernadero durante el ciclo de cultivo fueron: temperatura diurna de 28 ± 3 °C, temperatura nocturna de 18 ± 2 °C y humedad relativa del $65 \pm 10\%$.

Preparación del Sustrato Orgánico (SO)

La formulación del sustrato orgánico se realizó utilizando residuos agroindustriales en las siguientes proporciones (base volumen): estiércol de bovino compostado (30%), polvo de fibra de coco (25%), cascarilla de arroz (22%), cachaza de caña de azúcar (15%), harina de pescado (5%), roca fosfórica (2%) y cal dolomita (1%), para acelerar el proceso de compostaje se añadió el 1% de levadura de cerveza en relación con el volumen final del sustrato. Los materiales se mezclaron y humedecieron homogéneamente y se sometieron a un proceso de compostaje durante 45 días, con volteos y riegos semanales para asegurar las condiciones adecuadas para su descomposición aeróbica y la estabilización del material.

Caracterización Físicoquímica del Sustrato

Las propiedades físicas del sustrato se determinaron siguiendo la metodología propuesta por Pire y Pereira (2003): porosidad total (%), porosidad de aireación (%), capacidad de retención de agua (%), densidad aparente (g cm^{-3}) y densidad de partículas (g cm^{-3}). Las propiedades químicas (pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, y contenido de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn) se analizaron conforme a las normas europeas UNE-EN 13040:2008 (AENOR, 2008).

Preparación de Biofermentos

Los biofermentos se elaboraron en base a la metodología establecida por Zúñiga, Melesio, Cortés y Raya (2016), con las siguientes formulaciones para un volumen de 100 L:

Bio.1. Estiércol de bovino fresco (58 L), levadura de cerveza (100 g), sulfato de amonio (400 g), sulfato de magnesio (250 g), sulfato de cobre (100 g), roca fosfórica (350 g), tierra de diatomeas (350 g) y melaza de caña (4 L).

Bio.2. Estiércol de bovino fresco (57 L), levadura de cerveza (100 g), suero de leche (8 L), ceniza vegetal (900 g), cáscara de huevo molida (120 g), sulfato de amonio (1000 g), sulfato de magnesio (700 g), sulfato de potasio (800 g) y bórax (2000 g).

Bio.3. Estiércol de bovino fresco (45 L), borra de café (15 L), melaza de caña (8 L), cascarilla de arroz (17.5 L), sulfato de cobre (1250 g), sulfato de zinc (750 g), sulfato de magnesio (2000 g), sulfato de amonio (500 g) y levadura de cerveza (100 g).

Los biofermentos se mantuvieron en fermentación anaeróbica durante 40 días a temperatura ambiente (22 ± 3 °C). Posteriormente se filtraron y almacenaron en recipientes herméticos hasta su uso.

Caracterización de Biofermentos

La caracterización química de los biofermentos (pH, conductividad eléctrica, contenido de macro y micronutrientes) se realizó siguiendo las normas europeas UNE-EN 13652:2001 (AENOR, 2008). La evaluación microbiológica incluyó la determinación de coliformes totales y fecales según la (NOM-113-SSA1-1994, 1995), *Escherichia coli*, y la detección de *Salmonella* sp. conforme a la (NOM-210-SSA1-1994, 2014).

Preparación de la Solución Nutritiva

La solución Steiner se preparó de acuerdo con las especificaciones del manual propuesto por Favela-Chavez Preciado y Benavides (2006) manteniendo una conductividad eléctrica de 2.0 ± 0.2 dS m^{-1} y un pH de 5.5 ± 0.3 , ajustado con ácido fosfórico cuando fue necesario.

Material Vegetal y Trasplante

Se utilizaron semillas certificadas de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) var. 'California. Antes de la siembra, las semillas se desinfectaron mediante inmersión en solución de hipoclorito de sodio al 1% durante 10 minutos, seguido de tres enjuagues con agua destilada.

La siembra se realizó en charolas de poliestireno expandido de 200 cavidades (25 cm³ por cavidad) rellenas con Peat Moss (pH 6.0 ± 0.2 , CE 0.8 ± 0.1 dS m^{-1}). Se colocó una semilla por cavidad a una profundidad de 0.5 cm, cubiertas ligeramente con vermiculita fina para mantener la humedad y facilitar la emergencia.

Proceso de germinación. Las charolas se colocaron en el área de germinación con las siguientes condiciones: temperatura ambiente promedio de 22 ± 3 °C, humedad relativa del $85 \pm 5\%$, y obscuridad parcial durante los primeros 10 días. El sustrato se mantuvo con humedad constante mediante atomización manual 2 veces al día hasta su trasplante en invernadero. La emergencia se inició a los 6-8 días después de la siembra (dds), alcanzando el 95% de germinación a los 12 dds.

Transición a invernadero. Una vez completada la emergencia, las charolas se trasladaron gradualmente al invernadero de producción mediante un proceso de aclimatación de 48 horas.

Selección. Las plántulas que se seleccionaron para trasplante fueron aquellas que cumplieron los siguientes criterios morfológicos y fisiológicos: presencia de 4-5 hojas verdaderas completamente expandidas, altura promedio de 12-15 cm.

Trasplante. El trasplante se realizó durante las horas de menor radiación solar (17:00-19:00 h) para minimizar el estrés hídrico. Las plántulas se extrajeron cuidadosamente de las charolas manteniendo intacto el cepellón radicular y se colocaron en el centro de cada maceta a la misma profundidad que tenían en las charolas. Inmediatamente después del trasplante, se aplicó un riego abundante.

Diseño Experimental y Tratamientos

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con seis tratamientos y diez repeticiones cada uno ($n=60$ unidades experimentales). Los tratamientos evaluados fueron (Cuadro 1).

Se utilizaron macetas de polietileno color naranja de 12 L de capacidad, con una planta por maceta. Los biofermentos y la solución Steiner se aplicaron semanalmente de forma manual a una concentración del 1% v/v, iniciando a los 15 días después del trasplante.

Cuadro 1. Diseño de tratamientos experimentales.
Table 1. Experimental Treatment Design.

Tratamiento	Descripción
T1*	SO
T2	SO + Bio.1
T3	SO + Bio.2
T4	SO + Bio.3
T5	SO + SS
T6**	S + SS

* = testigo orgánico; ** = testigo convencional; SO = sustrato orgánico; Bio = biofermento; SS = solución Steiner; S = suelo.

* = organic control; ** = conventional control; SO = organic substrate; Bio = bioferment; SS = Steiner solution; S = soil.

Manejo del Cultivo

El riego se realizó diariamente manteniendo la humedad del sustrato al 80% de la capacidad de campo. Se implementó un sistema de tutorado vertical con rafia plástica para el soporte de las plantas. Las labores culturales incluyeron poda de brotes axilares, deshoje sanitario y control preventivo de plagas mediante trampas cromáticas amarillas.

Variables Evaluadas

Las evaluaciones se realizaron semanalmente desde los 20 días después del trasplante hasta la cosecha final. Las variables medidas fueron:

Altura de planta (cm). Medida desde la base del tallo hasta el ápice vegetativo usando una cinta métrica.

Diámetro de tallo (mm). Determinado a 5 cm de la base del tallo con un vernier digital (precisión ± 0.01 mm).

Número total de frutos. Cuento de frutos cosechados por planta durante todo el ciclo (a partir de los 90 ddt).

Peso promedio de frutos (g). Peso individual de frutos en estado de madurez comercial, determinado con una balanza analítica (precisión ± 0.1 g).

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) para un diseño completamente al azar, y cuando se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), se realizó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey. Previamente se verificaron los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene). Los análisis estadísticos se realizaron con el software SAS versión 9.4 (SAS Institute, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Físicas del Sustrato Orgánico (SO)

Las propiedades físicas constituyen parámetros críticos para el desarrollo vegetal óptimo, ya que determinan la disponibilidad de agua y oxígeno en la zona radicular. La evaluación inicial de estos parámetros es fundamental, ya que resulta imposible modificarlas una vez establecido el cultivo (Siriprom, Teanchai y Chamchoi, 2022).

La densidad aparente (D_a) del sustrato fue de 0.81 g cm^{-3} , mientras que la densidad de partícula (D_p) 1.18 g cm^{-3} , lo que indica que el sustrato es ligero y no corre el riesgo de compactación, la porosidad total (PT) fue de 88% la cual superó el valor mínimo recomendado de 85%, lo que indica que el sustrato cuenta con excelente capacidad de retención hídrica, facilitado el intercambio gaseoso. La distribución de poros mostró una porosidad de aireación (PA) de 23.97%, valor óptimo dentro del rango de 10-30% recomendado, lo que garantiza una adecuada oxigenación radicular. La capacidad de retención de agua (CRA) de 64.15% se ubicó dentro del rango óptimo de 55-70% (Abad, Noguera y Bures, 2001) (Cuadro 2a).

La comparación con turba (Peat moss) de alto grado de descomposición, sustrato de referencia en México, reveló características similares. En este sentido, Evans (2014) reporta para este material una D_a de $0.16\text{-}2.2 \text{ g cm}^{-3}$, PT de 82-85%, CRA de 60-68% y PA de 10-15%, valores que validan la calidad del sustrato formulado. Sin embargo, el sustrato desarrollado presenta ventajas en términos de disponibilidad local y menor impacto ambiental comparado con la turba importada.

Propiedades Fisicoquímicas del Sustrato Orgánico

Las características fisicoquímicas determinan la dinámica de transferencia de nutrientes entre el sustrato y la solución de este. Los materiales orgánicos contribuyen especialmente a la química del sustrato mediante la formación de sustancias húmicas, productos finales de la descomposición que mejoran la capacidad de intercambio catiónico (Guo, Liu y Wu, 2019).

El pH registrado de 7.1 (Cuadro 2b) indica condiciones ligeramente alcalinas. Aunque este valor se encuentra levemente por encima del rango óptimo de 5.5-6.8 para cultivos hortícolas, no representa una limitación significativa, ya que puede ser ajustado mediante el manejo de la solución nutritiva. La conductividad eléctrica (CE) de 0.85 dS m^{-1} se clasifica como moderadamente salina, pero permanece por debajo del umbral crítico de 1.5 dS m^{-1} establecido por Abad et al. (2001) y Gayosso-Rodríguez, Borges, Villanueva, Estrada y Garruña (2018), sin presentar riesgos por estrés salino en plantas sensibles.

Cuadro 2. Caracterización del física, fisicoquímica y nutrimental del sustrato.
Table 2. Characterization of the physical, physicochemical and nutritional substrate.

Variable	Unidad de medida	Resultado
a) Propiedades físicas		
Da	g cm ⁻³	0.81
Dp		1.18
PT		88
PA	%	23.97
CRA		64.15
b) Caracterización fisicoquímica		
pH		7.1
CE	dS m ⁻¹	0.85
CIC	me 100g ⁻¹	49.14
c) Macronutrientes		
N		1.16
P		508
K	mg kg ⁻¹	28.61
Ca		49.4
Mg		19.78
d) Micronutrientes		
Fe		36
Mn		70
Cu	mg kg ⁻¹	11.1
Zn		10.6

Da = densidad aparente; Dp = densidad de partículas; PT = porosidad total; PA = porosidad de aireación; CRA = capacidad de retención de agua; CE = conductividad eléctrica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; N = nitrógeno; P = fósforo; K = potasio; Ca = calcio; Mg = magnesio; Fe = hierro; Mn = manganeso; Cu = cobre; Zn = zinc; dS m⁻¹ = deciSiemens por metro; mg kg⁻¹ = miligramos del elemento por cada kilogramo de sustrato; me 100 g⁻¹ = miliequivalentes del elemento por cada 100 gramos de sustrato. Da = bulk density; Dp = particle density; PT = total porosity; PA = air-filled porosity; CRA = water retention capacity; EC = electrical conductivity; CEC = cation exchange capacity; N = nitrogen; P = phosphorus; K = potassium; Ca = calcium; Mg = magnesium; Fe = iron; Mn = manganese; Cu = copper; Zn = zinc; dS m⁻¹ = deciSiemens per meter; mg kg⁻¹ = milligrams of element per kilogram of substrate; me 100 g⁻¹ = milliequivalents per 100 grams of substrate.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 49.14 me 100 g⁻¹ se considera alta, excelente capacidad del sustrato para retener e intercambiar cationes esenciales como Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ (Daniels y Wright, 1988). Esta característica favorece la eficiencia en el uso de fertilizantes y proporciona un buffer nutricional que mitiga fluctuaciones en la disponibilidad de nutrientes.

Composición Nutricional del Sustrato Orgánico

Macronutrientes

El análisis de macronutrientes (Cuadro 2c) reveló concentraciones adecuadas de nitrógeno según los criterios establecidos por Bergstrand (2022) para sustratos orgánicos. Las concentraciones elevadas de fósforo, calcio y magnesio, aunque potencialmente beneficiosas para el desarrollo vegetal, requieren monitoreo cuidadoso para prevenir antagonismos nutricionales.

El fósforo, elemento clave para el desarrollo radicular, floración y fructificación (Puga, Poza, Martínez, Pérez y Paz, 2024), mostró concentraciones elevadas que podrían inducir deficiencias de micronutrientes por competencia iónica. Similarmente, las altas concentraciones de calcio y magnesio, aunque importantes para el desarrollo estructural, pueden inhibir la absorción de zinc, hierro, cobre y manganeso. No obstante, la ausencia de sintomatologías de deficiencia durante el ciclo de cultivo sugiere que las concentraciones, aunque elevadas, no alcanzaron niveles tóxicos ni antagónicos (Bergstrand, 2022).

Micronutrientes

Las concentraciones de micronutrientes (Cuadro 2d) se encontraron dentro de rangos apropiados según Marschner (2012). El hierro (36 mg L^{-1}), esencial para la síntesis de clorofila y transporte de electrones, el manganeso (70 mg L^{-1}), cofactor enzimático en reacciones metabólicas, el cobre (11.1 mg L^{-1}), participante en fotosíntesis y formación de ligninas, y el zinc (10.6 mg L^{-1}), fundamental para síntesis proteica y regulación metabólica, presentaron niveles que aseguran disponibilidad adecuada para el crecimiento vegetal.

Caracterización Química de los Biofermentos

Los biofermentos constituyen fuentes naturales de nutrientes y microorganismos benéficos en sistemas de producción orgánica. Según Rojas-Espinoza, Hernández, Rodríguez y Linares (2023), estos preparados “enriquecen la zona radicular con nutrientes vegetales a través de la fijación de N, mineralización de P y K, y estimulan los reguladores del crecimiento vegetal”.

El análisis químico (Cuadro 3a) mostró variabilidad en pH (tendencia ácida) y contenido de macronutrientes (concentraciones elevadas) (Cuadro 3b) entre los diferentes biofermentos. Esta variabilidad refleja las diferencias en materias primas y condiciones de fermentación utilizadas. El pH ácido de los biofermentos complementa el pH ligeramente alcalino del sustrato, contribuyendo al equilibrio químico del sistema de cultivo.

La composición de micronutrientes (Cuadro 3c) mostró que Bio.3 presentó las mayores concentraciones de Fe (45.3 mg L^{-1}), Cu (88.82 mg L^{-1}) y Zn (1419 mg L^{-1}). Esta variabilidad en la composición, según Rojas-Espinoza et al. (2023), depende de factores como materia prima utilizada, condiciones de fermentación y procesos de producción, lo que subraya la importancia de la estandarización en la producción de biofermentos.

Caracterización Microbiológica de los Biofermentos

El proceso de fermentación en la producción de biofertilizantes implica una sucesión microbiana compleja donde se favorece el crecimiento de microorganismos benéficos mientras se eliminan o reducen los patógenos, constituyendo un indicador fundamental de la madurez del producto fermentado (Guo et al., 2019). Los biofertilizantes son producto del proceso de fermentación, constituyendo microorganismos eficientes del suelo que mejoran el crecimiento y productividad de las plantas a través del suministro de nutrientes fácilmente utilizables.

Durante el proceso fermentativo, la actividad termofílica (temperaturas superiores a 65°C) desempeña un papel crítico en la eliminación de patógenos. Cuando el proceso entra en la fase de fermentación termofílica, los coliformes totales disminuyen por debajo de $3 \text{ NMP } 100 \text{ ml}^{-1}$, y los biofertilizantes obtenidos presentan buena calidad higiénica, ya que bacterias patógenas como *Escherichia coli* y *Salmonella dysenteriae* no son detectadas en el compost maduro (Magdiel-Torres et al., 2023).

Los microorganismos indicadores, particularmente los coliformes, se encuentran ampliamente distribuidos en el ambiente y son especialmente prevalentes en condiciones de alta humedad. La presencia de estas bacterias constituye un parámetro de evaluación de la calidad sanitaria del producto, mientras que la detección de patógenos específicos como *Salmonella spp.*, indica fermentación incompleta o condiciones inadecuadas de procesamiento (Mishra y Barolia, 2020).

El análisis microbiológico de los biofertilizantes evaluados (Cuadro 3d) reveló que los tratamientos (Bio.1, Bio.2 y Bio.3) están libres de patógenos.

La presencia de patógenos en productos fermentados se atribuye a diversos factores: la temperatura insuficiente durante la fase termofílica, tiempo de fermentación inadecuado, pH no óptimo, contaminación cruzada durante el procesamiento, o inadecuada relación carbono/nitrógeno en la mezcla inicial (Bharti y Suryavanshi, 2021).

Cuadro 3: Caracterización físico-química y microbiológica de los fermentos.
Table 3: Physical-chemical and microbiological characterization of fermentes.

Variable	Unidad de medida	Bio.1	Bio.2	Bio.3
a) Propiedades fisicoquímicas				
pH		4.91	5.62	3.44
b) Macronutrientes				
N	%	55	275	184
P	mg L ⁻¹	1500	1000	500
K		3204	3583	3152
Ca	me 100 ml ⁻¹	94.85	75.85	90.26
Mg		165.8	91.24	138.4
c) Micronutrientes				
Fe	mg L ⁻¹	nd	nd	45.3
Cu		nd	nd	88.82
Mn		nd	nd	nd
Zn		9.02	1730	1419
d) Microbiología				
CT	NMP 100 ml ⁻¹	nd	nd	nd
CF		nd	nd	nd
<i>Salmonela</i> spp.		nd	nd	nd
<i>E. coli</i>		nd	nd	nd

N = nitrógeno; P = fósforo; K = potasio; Ca = calcio; Mg = magnesio; Fe = hierro; Cu = cobre; Mn = manganeso; Zn = zinc; mg L⁻¹ = miligramos del elemento por cada litro de biofermento; me 100 mL⁻¹ = miliequivalentes del elemento por cada 100 mililitros de biofermento; Bio = biofermento; CT = coliformes totales; CF = coliformes fecales; NMP = número más probable por cada 100 mililitros de biofermento; E. = Escherichia; nd = no detectado.

N = nitrogen; P = phosphorus; K = potassium; Ca = calcium; Mg = magnesium; Fe = iron; Cu = copper; Mn = manganese; Zn = zinc; mg L⁻¹ = milligrams of element per liter of bioferment; me 100 mL⁻¹ = milliequivalents of element per 100 milliliters of bioferment; Bio = bioferment; CT = total coliforms; CF = fecal coliforms; NMP = most probable number per 100 milliliters of bioferment; E. = Escherichia; nd = not detected.

Los resultados obtenidos subrayan la importancia de implementar protocolos rigurosos de control de calidad microbiológica en la producción de biofertilizantes. La evaluación de indicadores patógenos debe constituir un requisito obligatorio antes de la aplicación de estos productos, asegurando tanto la eficacia agronómica como la seguridad sanitaria del sistema de producción.

Respuesta de Crecimiento Vegetativo

Altura de Planta

El análisis de altura de planta (Figura 1) no mostró diferencias significativas entre tratamientos hasta los 20 días después del trasplante (ddt), esto indica que las condiciones iniciales de las plantas son homogéneas. A partir de los 40 ddt, se evidenciaron diferencias en el desarrollo vegetativo, con los tratamientos T4, T5 y T6 con mayor crecimiento en altura.

Al final del experimento (90 ddt), T5 (sustrato + solución Steiner) alcanzó la mayor altura (85.3 cm), seguido por T6 (suelo + Steiner, 80.5 cm) y T4 (sustrato + Bio.3, 79.1 cm), sin diferencias estadísticamente significativas entre estos tratamientos. En contraste, T1 (sustrato solo) mostró el menor desarrollo (31.9 cm a los 40 ddt), evidenciando la importancia de la fertilización suplementaria.

Estos resultados concuerdan con Osco *et al.* (2020) quienes establecen que la altura de planta refleja el estado nutricional y el potencial productivo. La respuesta favorable del sustrato orgánico combinado con Bio.3 (T4) sugiere que este biofermento proporciona nutrientes en forma disponible para el crecimiento vegetal, constituyendo una alternativa viable a la fertilización convencional.

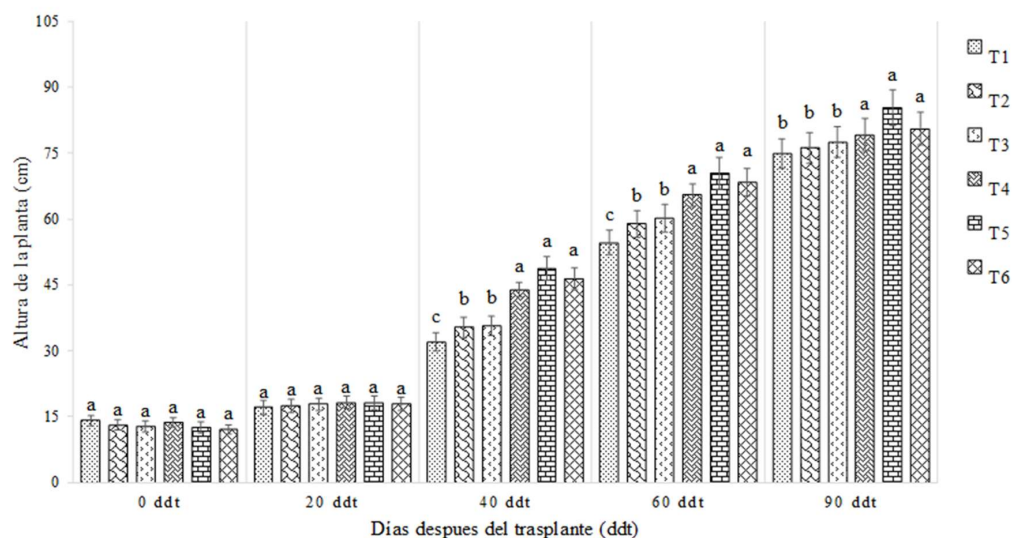


Figura 1. Altura de las plantas de *C. annuum* L. ddt = días después del trasplante; cm = centímetros.
Figure 1. Plant height of *C. annuum* L. ddt = days after transplanting; cm = centimeters.

Diámetro de tallo

El análisis del diámetro de tallo (Figura 2) reveló diferencias significativas a partir de los 40 ddt, con T1, T5 y T6 presentando los mayores valores (11.3, 11.3 y 11.1 mm, respectivamente). Esta respuesta aparentemente contradictoria del tratamiento T1 (sustrato solo) puede atribuirse a un mecanismo compensatorio, donde la limitación nutricional induce mayor inversión en biomasa estructural para optimizar la captura de recursos.

A los 90 ddt, las diferencias se redujeron, con T4 mostrando desarrollo comparable a los tratamientos mejor nutridos, confirmando la efectividad del Bio.3 como fuente nutricional. Sharma y Sharma (2023) reportaron resultados similares en tomate, demostrando que la fertilización orgánica influye significativamente en parámetros biométricos, validando el uso de enmiendas orgánicas para mejorar el crecimiento vegetal.

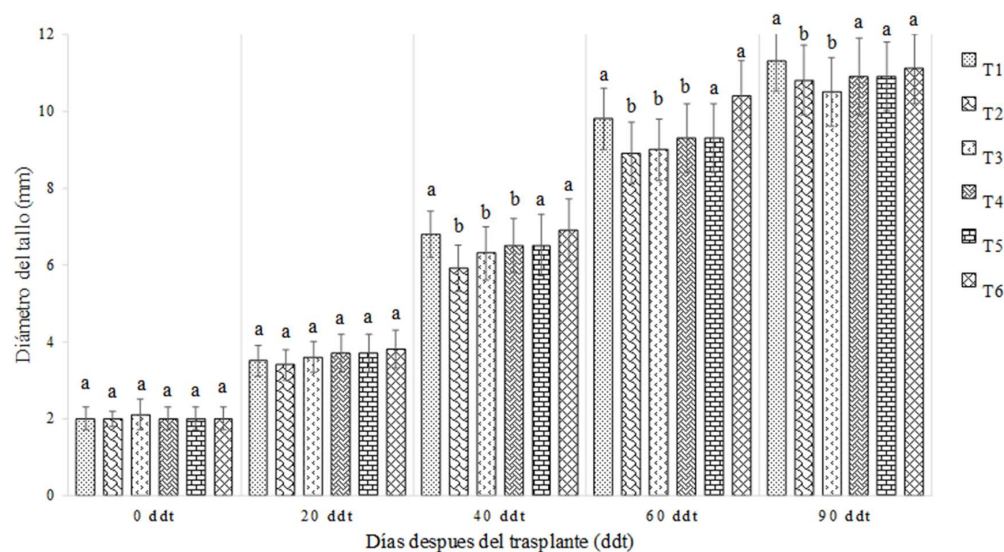


Figura 2. Diámetro de tallo de las plantas de *C. annuum* L. ddt = días después del trasplante; mm = milímetros.
Figure 2. Stem diameter of *C. annuum* L. plants. ddt = days after transplanting; mm = millimeters.

Rendimiento y Calidad de Frutos

Número de Frutos

La evaluación del rendimiento mediante tres cortes secuenciales (intervalos de 7 días) mostró diferencias significativas entre tratamientos (Figura 3). En el primer corte, T5, T6 y T4 produjeron el mayor número de frutos (51, 50 y 49 frutos, respectivamente), sin diferencias estadísticamente significativas. T1 exhibió la menor producción (41 frutos), haciendo notoria la limitación impuesta por la ausencia de fertilización suplementaria.

El segundo corte mostró reducción general en la producción, con la misma dinámica de desarrollo entre los diferentes tratamientos. En el tercer corte, T5 y T6 (nutridos con solución Steiner) mostraron incremento significativo, lo que confirma la sostenibilidad de la fertilización mineral en el tiempo.

Peso de Frutos

El análisis del peso promedio por fruto (Figura 4) reveló que T4, T5 y T6 no presentaron diferencias significativas en el primer corte (203, 200 y 207 g, respectivamente), diferenciándose significativamente de los demás tratamientos. Esta respuesta indica que el Bio.3 proporciona nutrientes suficientes para mantener la calidad del fruto comparable a la fertilización convencional.

En cortes posteriores, T4 mantuvo la calidad del fruto por encima de los tratamientos con solución Steiner, sugiriendo una liberación más sostenida de nutrientes del biofermento. Esta respuesta concuerda con resultados de Lara-Capistrán *et al.* (2020), quienes reportaron incrementos significativos en la producción de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) al combinar *Bacillus subtilis* con lombricomposta en invernadero, observando los mayores valores con la dosis más alta del abono orgánico más la bacteria.

El rendimiento total aproximado de 2 kg por planta obtenido en el presente estudio para pimiento morrón evidencia el potencial productivo del sistema evaluado. Esta alta productividad puede atribuirse a un manejo agronómico optimizado, que incluyó una densidad de plantación adecuada y la aplicación de prácticas de poda dirigidas. Resultados similares fueron reportados por Elizondo-Cabalceta y Monge-Pérez (2017), quienes evaluaron distintas densidades y prácticas de poda en híbridos de pimiento, y observaron que el rendimiento por planta mejoró notablemente con una poda bien dirigida y densidades intermedias. Asimismo, Carrillo-Montoya y Vargas-Rojas (2023) concluyeron que la combinación de poda tipo española con una densidad ajustada permitió maximizar la producción por planta y mejorar la calidad del fruto. Estos hallazgos respaldan que el rendimiento individual del cultivo de pimiento puede incrementarse significativamente mediante ajustes estratégicos en la densidad de plantación y el tipo de poda, lo cual optimiza la distribución de luz, aire y asimilados, esto reduce la competencia intraespecífica.

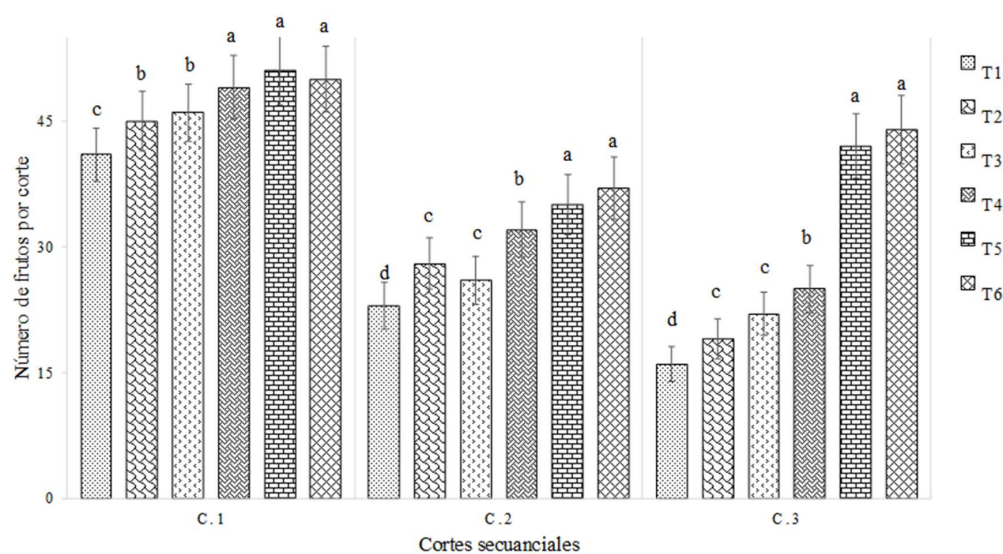


Figura 3: Número de frutos cosechados en tres cortes, C= corte de fruta.
Figure 3: Number of fruits harvested in three harvests, C = fruit harvest.

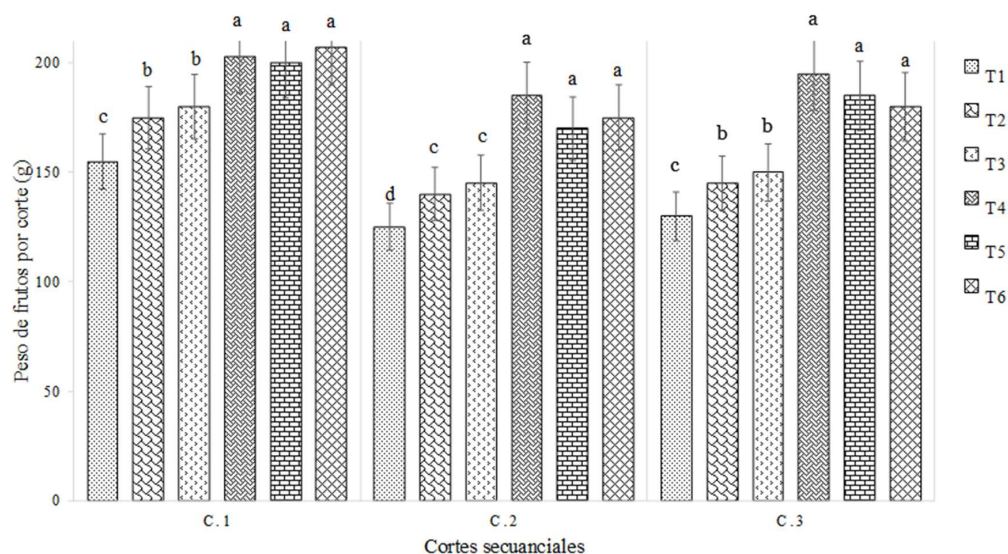


Figura 4. Peso de frutos cosechados; g= gramos.
Figure 4. Weight of harvested fruits; g = grams.

Implicaciones Agronómicas y Perspectivas Futuras

Los resultados demuestran que el sustrato orgánico formulado presenta características físicas, químicas y nutricionales apropiadas para el cultivo de *Capsicum annuum* L. El Bio.3, elaborado con estiércol bovino, borra de café, melaza, cascarilla de arroz y micronutrientes adicionados, mostró efectividad como fuente nutricional, produciendo resultados comparables a la fertilización convencional.

La implementación de este sistema presenta ventajas en términos de sostenibilidad ambiental, reducción de costos de insumos externos y aprovechamiento de residuos orgánicos locales. Sin embargo, se requiere investigación adicional para optimizar las formulaciones de biofermentos, estandarizar procesos de producción y evaluar la respuesta en diferentes condiciones ambientales y cultivos.

Las futuras investigaciones deberían enfocarse en: (1) caracterización microbiológica de los biofermentos, (2) evaluación de la persistencia de nutrientes en el tiempo, (3) análisis económico comparativo con sistemas convencionales, y (4) estudios de escalamiento para condiciones comerciales.

CONCLUSIONES

El objetivo de evaluar la efectividad de sustratos orgánicos y biofertilizantes como alternativa sostenible en el cultivo de pimiento morrón fue alcanzado satisfactoriamente. El sustrato orgánico formulado a partir de residuos agroindustriales presentó propiedades físicas y fisicoquímicas apropiadas para el desarrollo vegetal, cumpliendo con los estándares recomendados para producción hortícola en invernadero.

Los tratamientos con solución Steiner (T5 y T6) obtuvieron los mejores resultados en crecimiento vegetativo y mayor número de frutos, confirmando la efectividad de la fertilización convencional. Sin embargo, entre las alternativas orgánicas evaluadas, el biofermento Bio.3 (T4) demostró ser la opción más efectiva, alcanzando resultados estadísticamente similares en rendimiento total a los tratamientos convencionales. Aunque T4 produjo menor cantidad de frutos que T5 y T6, esta diferencia fue compensada por el mayor peso individual de los frutos, logrando así niveles de productividad comercialmente viables y calidad comparable. Los biofermentos cumplieron con los estándares microbiológicos de calidad, garantizando la seguridad sanitaria del sistema.

La utilización de residuos agroindustriales locales para la formulación de sustratos y biofermentos representa una estrategia viable de economía circular que contribuye a la valorización de subproductos mientras reduce la dependencia de insumos sintéticos. El sistema orgánico evaluado constituye una alternativa ambientalmente sostenible que, aunque no superó a la fertilización convencional, ofrece un balance adecuado entre productividad y sostenibilidad ambiental para la producción de pimiento morrón en invernadero.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos analizados durante el estudio y presentados en este documento están disponibles a solicitud razonable dirigida al autor de correspondencia.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Tecnológico Nacional de México / ITS de Los Reyes

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, P.S.E.; metodología, P.S.E.; validación, J.P.I. y C.E.A.R.; análisis formal, D.E.R.M. y O.E.R.M.; investigación, P.S.E.; recursos, P.S.E.; curación de datos, P.S.E.; escritura: preparación del borrador original, P.S.E.; escritura: revisión y edición, J.P.I. y C.E.A.R.; D.E.R.M. y O.E.R.M.; supervisión, J.P.I. y C.E.A.R. D.E.R.M. y O.E.R.M.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Tecnológico Nacional de México / ITS de Los Reyes por las facilidades otorgadas para el uso de sus equipos e instalaciones durante el desarrollo de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Abad, M., Noguera, P., & Bures, S. (2001). National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: Case study in Spain. *Bioresource Technology*, 77(2), 197-200. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00152-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00152-8)
- AENOR (Asociación Española de Normalización). (2008). Norma UNE-EN 13040:2008. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Preparación de la muestra para ensayos físicos y químicos. Determinación del contenido de materia seca, del contenido de humedad y de la densidad aparente compactada en laboratorio. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, España: AENOR.
- Bergstrand, K. J. (2022). Organic fertilizers in greenhouse production systems - a review. *Scientia Horticulturae*, 295, 110855. <https://doi.org/10.1016/J.SCIEN.2021.110855>
- Bharti, N., & Suryavanshi, M. (2021). Quality control and regulations of biofertilizers: Current scenario and future prospects. En A. Rakshit, V. S. Meena, M. Parihar, H. B. Singh, & A. K. Singh (Eds.). *Biofertilizers* (pp. 133-141). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821667-5.00018-X>
- Camacho-Rodríguez, M., Almaraz-Suárez, J. J., Vázquez-Vázquez, C., Angulo-Castro, A., Ríos-Vega, M. E., & González-Mancilla, A. (2022). Efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en el desarrollo y rendimiento de chile jalapeño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(28), 185-196. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3273>
- Carrillo-Montoya, K., & Vargas-Rojas, J. C. (2023). Yield, morphological characteristics, and quality of Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.) under two planting densities and pruning methods. *Agronomía Mesoamericana*, 34(3), 1-13. <http://dx.doi.org/10.15517/am.2023.53659>
- Daniels, W. L., & Wright, R. D. (1988). Cation Exchange Properties of Pine Bark Growing Media as Influenced by pH, Particle Size, and Cation Species. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 113(4), 557-560.
- Elizondo-Cabalceta, E., & Monge-Pérez, J. E. (2017). Evaluación de rendimiento y calidad de 15 genotipos de pimienta (*Capsicum annuum* L.) cultivados bajo invernadero en Costa Rica *Tecnología en Marcha*, 30(4), 1-12. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3407>
- Evans, M. R. (2014). *Substrates*. Common Substrate Components. Consultado el 24 de Abril de 2024 desde: https://greenhouse.hosted.uark.edu/Unit07/Section05.html?utm_source=chatgpt.com
- Favela-Chávez, E., Preciado-Rangel, P., & Benavides-Mendoza, A. (2006). *Manual para la preparación de soluciones nutritivas*. México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Gayosso-Rodríguez, S., Borges-Gómez, L., Villanueva-Couoh, E., Estrada-Botello, M. A., & Garruña, R. (2018). Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia*, 52(4), 639-652.

- Guo, X. X., Liu, H. T., & Wu, S. B. (2019). Humic substances developed during organic waste composting: Formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions. *Science of The Total Environment*, 662, 501-510. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.01.137>
- Lara-Capistrán, L., Zulueta-Rodríguez, R., Murillo-Amador, B., Romero-Bastidas, M., Rivas-García, T., & Hernández-Montiel, L. G. (2020). Respuesta agronómica del chile dulce (*Capsicum annuum* L.) a la aplicación de *Bacillus subtilis* y lombricomposta en invernadero. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 693-704. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.737>
- Layek, J., Das, A., Ansari, M. A., Mishra, V. K., Rangappa, K., Ravisankar, N., ... & Paramanik, B. (2023). An integrated organic farming system: innovations for farm diversification, sustainability, and livelihood improvement of hill farmers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1151113. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1151113>
- Marschner, P. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). London, UK: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
- Mejía-Pérez, M. A., Mendiola-Beltrán, I. P., Pérez-Negrete, D., Morales-Rodríguez, C., Nuñez-Palenius, H. G., & Ruiz-Aguilar, M. de la L. (2023). *Sustratos y soluciones nutritivas en la producción de plántulas de pimiento (Capsicum annuum L.)*. México: Universidad de Guanajuato.
- Mishra, B. K., & Barolia, S. K. (2020). Quality Assessment of Microbial Inoculants as Biofertilizer. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(10), 3715-3729.
- Mordor Intelligence (2023). Tamaño del mercado de fertilizantes orgánicos análisis de participación - Tendencias y Pronóstico de crecimiento Hasta el 2029. Consultado el 12 de marzo de 2024. desde <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/global-organic-fertilizer-market>
- Oscó, L. P., Junior, J. M., Ramos, A. P. M., Furuya, D. E. G., Santana, D. C., Teodoro, L. P. R., ... & Teodoro, P. E. (2020). Leaf nitrogen concentration and plant height prediction for maize using UAV-based multispectral imagery and machine learning techniques. *Remote Sensing*, 12(19), 3237. <https://doi.org/10.3390/RS12193237>
- Pire, R., & Pereira, A. (2003). Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. propuesta metodológica. *Bioagro*, 15(1), 55-64.
- Puga, M. I., Poza-Carrión, C., Martínez-Hevia, I., Pérez-Liens, L., & Paz-Ares, J. (2024). Recent advances in research on phosphate starvation signaling in plants. *Journal of Plant Research*, 137(3), 315-330. <https://doi.org/10.1007/s10265-024-01545-0>
- Raj, A., Maharabam Devi, A., Singh, S. D., & Patel, M. (2024). Sustainable agriculture practices. En *Advances in agronomy: A compilation of research* (pp. 117-138). New Delhi, India: Stella International Publication.
- Rojas-Espinoza, B. F., Hernández-Chontal, M. A., Rodríguez-Orozco, N., & Linares-Gabriel, A. (2023). Concentración de nutrientes de dos formulaciones de fertilizantes fermentados (bioles) elaborados con insumos locales. *Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V41I0.1658>
- SAS Institute. (2020). *Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide. version 9.4*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Sharma, A., & Sharma, D. P. (2023). Assessment of the effect of organic manure and biofertilizers on physiological attributes of cherry tomato genotypes. *Journal of Eco-friendly Agriculture*, 18(1), 16-19. <https://doi.org/10.5958/2582-2683.2023.00003.5>
- SIAP (2020, diciembre 31). *Servicio de Información Agraria y Pesquera*. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Consultado el 15 de marzo de 2024 desde https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Siriprom, W., Teanchai, K., & Chamchoi, N. (2022). The physical properties of substrate cultures: A preliminary characterization. *Materialstoday: Proceedings*, 65(4), 2358-2361. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.310>
- SSA (Secretaría de Salud). (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014. Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores, patógenos y toxinas microbianas. *Diario Oficial de la Federación*. Ciudad de México, México: Secretaría de Gobernación (SEGOB).
- SSA (Secretaría de Salud). (1995). Norma Oficial Mexicana NOM-113-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método para la cuenta de microorganismos coliformes totales en placa. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: Secretaría de Gobernación (SEGOB).
- Torres, V., M., Ochoa-Álvarez, N. A., Nieto-Garibay, A., Murillo-Amador, B., Lavastida P, G., & Alfonso, P. (2023). Inactivation of pathogens in poultry residues through composting. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 34(4). <https://doi.org/10.15381/rivep.v34i4.24488>
- Zúñiga, W., Melesio, J., Cortés, V., & Raya, L. (2016). Evaluación de un biofermento elaborado a partir de extractos naturales en cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* itálica). *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 3(8), 53-56.