

Efecto de la composta de palma canaria y otros sustratos sobre la germinación de *Agave angustifolia* Haw. (Asparagales, Asparagaceae)

Effect of Canary Island Date Palm compost and other substrates on the germination of *Agave angustifolia* Haw. (Asparagales, Asparagaceae)

Sergio Hernández-Pablo^{1*}, Dionicio Alvarado-Rosales¹, Luz de Lourdes Saavedra-Romero¹,
María del Pilar Rodríguez-Guzmán¹, Víctor Manuel Zúñiga-Mayo¹,
José Abel López-Buenfil¹, Andrés Quezada-Salinas²

¹ Colegio de Postgraduados, carretera México-Texcoco km 36.5, 56264, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

² Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria-Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria, carretera Federal México-Pachuca km 37.5, 55740, Tecámac, Estado de México, México.

* Autor para correspondencia: sergio.hernandez@colpos.mx

Fecha de recepción:
19 de agosto de 2025

Fecha de aceptación:
9 de abril de 2026

Disponible en línea:
8 de septiembre de 2026

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



**Reconocimiento-
NoComercial-
CompartirIgual 4.0
Internacional
(CC BY-NC-SA 4.0)**

Cómo citar:
Hernández-Pablo, S., Alvarado-Rosales, D., Saavedra-Romero, L. de L., Rodríguez-Guzmán, M. del P., Zúñiga-Mayo, V. M., López-Buenfil, J. A., & Quezada-Salinas, A. (2026). Efecto de la composta de palma canaria y otros sustratos sobre la germinación de *Agave angustifolia* Haw. (Asparagales, Asparagaceae). *Acta Agrícola y Pecuaria*, 12, e0121034. <https://doi.org/10.30973/aap/2026.12.0121034>

RESUMEN

Diversos factores limitan la reproducción del *Agave angustifolia* Haw., entre ellos el bajo porcentaje de germinación. En este estudio se evaluaron *in vitro* cinco tratamientos para mejorar este proceso: composta, aserrín estéril, aserrín sin esterilizar, lixiviado de composta y agua de llave como testigo absoluto. La madurez de la composta de palma canaria (*Phoenix canariensis* H.Wildpret) se determinó de acuerdo con los criterios de la Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018. Adicionalmente, se realizaron pruebas de germinación con semillas de *Lactuca sativa* L. y *Raphanus sativus* L. para evaluar la fitotoxicidad y el índice de germinación del material composteado. En agave se evaluaron porcentaje de germinación, altura, longitud de raíz, grosor, peso húmedo y seco e índice de germinación; en las especies indicadoras solo se determinó este último. Los mejores tratamientos fueron aserrín estéril (65 %), aserrín sin esterilizar (59 %) y composta (49 %), con índices superiores al 100 %.

PALABRAS CLAVE

Composta de palma canaria, germinación, agave, índice de germinación.

ABSTRACT

Several factors limit the reproduction of *Agave angustifolia* Haw., including its low seed germination rate. This study evaluated five *in vitro* treatments to improve seed germination: compost, sterilized sawdust, non-sterilized sawdust, compost leachate, and tap water as the absolute control. The maturity of compost produced from Canary Island date palm (*Phoenix canariensis* H.Wildpret) residues was determined according to the criteria established in the Mexican Standard NMX-AA-180-SCFI-2018. In addition, germination assays using *Lactuca sativa* L. and *Raphanus sativus* L. seeds were conducted to assess the phytotoxicity and germination index of the composted material. In *A. angustifolia*, germination percentage, seedling height, root length, stem diameter, fresh weight, dry weight, and germination index were evaluated, whereas only the germination index was determined for the indicator species. The most effective treatments were sterilized sawdust (65 % germination), non-sterilized sawdust (59 %), and compost (49 %), all of which achieved germination indices greater than 100 %.

KEYWORDS

Canary Island date palm compost, germination, agave, germination index.

INTRODUCCIÓN

En el continente americano existen alrededor de 211 especies de *Agave*, de las cuales, el 75 % se encuentra en México (Castillejos-Reyes et al., 2023). En el estado de Oaxaca, a finales del siglo XIX y principios del XX se inició el proceso de selección y cultivo de agaves mezcaleros. Antiguamente, en los Valles Centrales de Oaxaca, el agave se utilizaba para la obtención de tres productos: pulque, ixtle y mezcal; y a partir de la década de los 40 del siglo pasado, el cultivo de los agaves pulqueros e ixtleros se abandonó (Bautista & Ramírez Juárez, 2008). De las 211 especies de agave reportadas, al menos nueve se utilizan para la elaboración de mezcal (Castillejos-Reyes et al., 2023). Destaca el maguey espadín (*Agave angustifolia* Haw.) con una superficie sembrada de 92,214 ha como la principal materia prima para la elaboración de mezcal, además de ser la de mayor demanda y la única que se cultiva de forma significativa en suelos semiáridos (Tlacolutla, Yautepec, Miahuatlán, Ejutla, Sola de Vega, Ocotlán, Zimatlán) (Bautista & Smit, 2012; Castañeda Hidalgo et al., 2025). Se sostiene que, en el medio rural de Oaxaca, la agricultura, a través de su carácter multifuncional, contribuye significativamente al mantenimiento de las estrategias de subsistencia, a la estabilidad económica de los hogares rurales, así como a la provisión de alimentos y a la generación de ingresos y empleo (Bautista-Cruz & Martínez-Gallegos, 2020; Bautista & Ramírez Juárez, 2008).

La producción de mezcal, tequila, pulque y miel de agave implica la cosecha de plantas de agave en estado reproductivo, lo que ocasiona la pérdida total del polen y las semillas (Arrazola-Cárdenas et al., 2020). La extracción constante de individuos reproductivos lleva a la reducción de las poblaciones, lo que modifica los niveles y la distribución de la diversidad genética o la riqueza de los alelos (Sebbenn et al., 2008). También, la falta de propagación sexual del agave ha reducido las poblaciones silvestres, amenazando la variabilidad y estructura genética en los cultivares debido a que la inflorescencia es removida para asegurar la acumulación de azúcares en la piña, impidiendo la formación de semillas, pese a que *A. angustifolia* produce una gran cantidad de semillas; desafortunadamente, su porcentaje de germinación es bajo, ya que algunas semillas no poseen embrión y/o endospermo (también llamadas

semillas blancas), y otras que potencialmente poseen embrión y endospermo pueden no ser viables (semillas negras) (Mendoza-Galindo & Mora-Herrera, 2021; Sebbenn et al., 2008). Distintos estudios reportan porcentajes variables de germinación en *A. angustifolia*, de 2 %, 20 %, 23 %, 28 % y 85 %; esta variación también se observa en las especies estudiadas como *A. salmiana* Otto ex Salm-Dyck con porcentajes de 30 % a 98 % y *A. potatorum* Zucc. entre 4 % y 89 % en diferentes sustratos (Aguilar-Rito et al., 2024; Alvarado Cepeda et al., 2024; Gutiérrez-Hernández et al., 2020; Mendoza-Galindo & Mora-Herrera, 2021; Ramírez-Tobías et al., 2012; Vázquez-Díaz et al., 2011; Zárate-Martínez et al., 2024).

Respecto a los sustratos utilizados para la germinación y crecimiento del agave se han empleado varios, tanto solos como en mezcla, destacando entre los primeros: tezontle, turba, perlita, fibra de coco, olote, bagazo de agave, suelo, tepojal (grava volcánica), así como las mezclas de perlita + turba de musgo (1:1), tezontle + aserrín de quiote de agave (2:1), suelo + olote, *peat moss* (55 %) + agrolita (21 %) + vermiculita (24 %), corteza de pino (50 %) + mezcla base (50 %), turba (25 %) + perlita (75 %), turba + perlita (1:1) o turba + arena de río (1:1), suelo agrícola + perlita (1:1) y suelo agrícola + tezontle (3:1) (Alvarado Cepeda et al., 2024; Álvarez-Aragón et al., 2020; Arrazola-Cárdenas et al., 2020; Enríquez del Valle et al., 2018; Enríquez-del Valle et al., 2023; Luna-Luna et al., 2017; Ramírez-Tobías et al., 2014; Rosales-Mata et al., 2014).

Aunque el uso de compostas como sustrato ha sido limitado, actualmente, ante la problemática de la declinación y muerte de las palmas canarias (*Phoenix canariensis* H.Wildpret) en la Ciudad de México (Quezada-Salinas et al., 2023), la empresa Terramulch procesa los residuos orgánicos provenientes del derribo de centenares de palmas canarias para producir composta, por lo que se convierte en una opción como sustrato de germinación dada la gran cantidad de material composteado disponible y, además, porque esta composta ofrece buena porosidad, retención de agua de 107 % respecto al peso seco, nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, zinc, cobre y boro, sustancias húmicas y fúlvicas que pueden estimular la germinación y desarrollo radicular (Abid et al., 2020), motivo por el cual se plantea la siguiente hipótesis: la composta de palma canaria incrementará el porcentaje de germinación y la

vitalidad de las plántulas de *A. angustifolia*, respecto a otros sustratos. Sin embargo, antes de usar cualquier tipo de composta, es importante descartar sus efectos fitotóxicos, mediante pruebas de germinación con semillas de especies de germinación rápida y sensibles a los compuestos tóxicos (Alvarado et al., 2023; Camacho Céspedes et al., 2019). La elongación de la radícula es un indicador del grado de fitotoxicidad provocada por los compuestos solubles en las compostas; altos niveles fitotóxicos (ácidos fenólicos, ácidos grasos, terpenoides, sustancias hormonales, compuestos alelopáticos) pueden inhibir la germinación, retardar el desarrollo de la radícula y la capacidad de establecimiento y desarrollo de la planta (Fain Binda et al., 2018; Romano et al., 2025). Para estudios de toxicidad basados en la germinación de semillas y la elongación radical pueden utilizarse diversas especies, entre las cuales se incluyen plantas de importancia económica y de fácil acceso que, además, germinan y crecen rápidamente (Rodríguez Romero et al., 2014). Entre las especies empleadas en estas pruebas destacan el berro (*Lepidium sativum* L.), rábano (*Raphanus sativus* L.), col china (*Brassica rapa* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.), chícharo (*Pisum sativum* L.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.) (Acosta et al., 2006; Alvarado et al., 2023; Varnero M. et al., 2007).

Considerando la problemática descrita, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la composta de palma canaria y otros sustratos sobre la germinación de *A. angustifolia*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El presente estudio se realizó en el Laboratorio de Patología Forestal del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, mientras que la composta de palma canaria fue elaborada por la empresa TERRAMULCH S.A. de C.V., ubicada en la alcaldía Xochimilco, CDMX (UTM 49,1253.61 E, 2,133,817.13 N).

Control de la madurez de la composta de palma

Con los residuos triturados de palma canaria se estableció una pila trapezoidal con dimensiones de 120 m × 4.2 m × 1.2 m (largo × ancho × alto), y para determinar la presencia de compuestos fitotóxicos en la composta

de *P. canariensis* durante su proceso de maduración, se realizaron seis muestreos mensuales; en cada uno, se colectaron cinco submuestras de composta a 20 cm y 60 cm de profundidad a una separación de 20 m entre sí. Estas fueron mezcladas, homogeneizadas y posteriormente cribadas, empleando un tamiz marca Alcón del número 10 (2 mm) para eliminar partículas gruesas (Alcón Equipos de Laboratorio, Guadalajara, México). Se emplearon semillas de lechuga y rábano como referencia para los ensayos de fitotoxicidad e índice de germinación durante seis meses con el fin de monitorear la madurez y estabilidad de la composta y definir el período en el cual era óptima para su uso como sustrato de germinación, tomando como referencia las especificaciones establecidas en la Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 (Secretaría de Economía, 2018). La principal variable considerada para la madurez de la composta fue el índice de germinación (IG). Para ello se usaron 150 semillas de cada especie de referencia (rábano y lechuga).

Uso de sustratos para la germinación *in vitro* de agave

Para el ensayo de germinación, se estableció un tratamiento en composta y otro en lixiviado de composta. Para la germinación en composta, la muestra fue colectada en el sexto mes del proceso de compostaje, y para obtener el lixiviado de composta, se pesaron 25 g de material previamente tamizado, que se transfirió a un matraz Erlenmeyer de 250 mL, y se le adicionaron 100 mL de agua destilada estéril. La suspensión se agitó para humedecer adecuadamente la composta y se dejó en reposo durante 24 h; transcurrido este tiempo, se filtró el lixiviado con un embudo que contenía algodón con el propósito de eliminar los residuos. La metodología se basó en lo reportado por Alvarado et al. (2023), con ligeras modificaciones. Adicionalmente, se establecieron tres tratamientos: aserrín estéril, aserrín sin esterilizar y agua corriente (testigo absoluto). En los tratamientos con composta, aserrín estéril, y aserrín sin esterilizar, los materiales se colocaron en vasos de unicel de 414 mL y se humectaron con 125 mL de agua corriente (agua de llave); los dos ensayos restantes se realizaron en cajas de Petri empleando el lixiviado de la composta y agua corriente (testigo absoluto); en cada caja se colocaron un papel filtro y 5 mL de lixiviado o de agua corriente, según el tratamiento. Cada

tratamiento tuvo tres repeticiones de 50 semillas que se incubaron a 25 °C, registrando la temperatura cada hora durante el proceso de germinación.

En total se usaron 150 semillas de agave por tratamiento. Los contenedores con semillas fueron colocados en bolsas de polipapel para generar una cámara húmeda. La germinación de *A. angustifolia* se llevó a cabo bajo luz natural y se evaluó hasta los 26 días, cuando se observó la mayor cantidad de semillas germinadas. Posteriormente, con el fin de evaluar el vigor y desarrollo de las plántulas, se registraron variables morfológicas relacionadas con el crecimiento radicular y aéreo.

Indicadores de vigor en plántulas de agave

Las variables medidas fueron: longitud de radícula, altura de la plántula y grosor del tallo. Para realizar una mejor medición, las semillas germinadas se congelaron a -15 °C durante 4 h para separar y extender las raíces. Las medidas se realizaron con un vernier digital UNbit (IP54) (Measureman Direct, Guangzhou, China).

Biomasa en plántulas de agave

Las plántulas se pesaron para calcular el peso húmedo y, posteriormente, se colocaron en una estufa de secado (CRAFT) (Craft Instrumentos Científicos, Guadalajara, México) durante 48 h a 60 °C para obtener el peso seco.

Porcentaje de germinación (%) e índice de germinación en plántulas de agave

El porcentaje de germinación se calculó con la siguiente ecuación (Carbonel & Luciano, 2023):

$$\% \text{ de germinación} = \frac{\text{Número de semillas germinadas}}{\text{Número de semillas puestas a germinar}} \times 100$$

Para obtener el IG se empleó la fórmula de Miguel Martínez et al. (2020) para plántulas de agave y las especies de referencia.

$$IG = \frac{\%Genx}{\% > \frac{Lex}{\%}} \times 100$$

IG = índice de germinación.

Gex = porcentaje de semillas germinadas en el extracto.

Gt = porcentaje de semillas germinadas en el testigo absoluto.

Lex = longitud promedio de la radícula en el extracto de compostas.

Lt = longitud promedio de la radícula en agua corriente (testigo absoluto).

Análisis de datos

Los datos fueron analizados en RStudio versión 4.4.1 para evaluar diferencias entre tratamientos y las variables evaluadas: porcentaje de germinación (%), altura (mm), longitud de radícula (mm), grosor (mm), peso húmedo (g) y peso seco (g). Para ello, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Una vez que los datos cumplieron los supuestos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) seguido de la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$); cuando no se cumplieron, se empleó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$). Cuando se detectaron diferencias significativas en la prueba de Kruskal-Wallis, se aplicaron comparaciones múltiples post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni para identificar diferencias entre tratamientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Madurez de la composta

Después de 177 días de seguimiento, se determinó que el 84 % del material composteado estaba listo para su uso, con base en las especificaciones de la NMX-AA-180-SCFI-2018 (Secretaría de Economía, 2018). Para la composta cribada, se calculó la relación peso inicial-peso total muestreado, obteniéndose un 84 % del material con una granulometría ≤ 10 mm (Cuadro 1).

Azula-Barrera (2022) menciona que los residuos de poda de *Ulex europaeus* L. (espinillo) y *Genista monspessulana* L. (retamilla) pueden usarse como sustrato 100 días después del compostaje para la germinación de *Dodonaea viscosa* (L.) Jacq., *Verbesina crassiramea* S.F.Blake, y *Duranta mutisii* L.f.; por su parte, Fain Binda et al. (2018) mencionan que la composta de residuos de aves y viruta de madera en un sistema de pilas con

Cuadro 1. Especificaciones por tipo de composta terminada (NMX-AA-180-SCFI-2018) al que se le dio seguimiento por 177 días.

Parámetro	Tipo de composta		
	I	II	Composta útil (%)
Granulometría	≤ 10 mm	10 mm ≤ 30 mm	
Peso	998	193	84 %

volteo manual necesita al menos 140 días de compostaje para madurar y ser utilizada como biofertilizante, lo cual indica que el proceso de compostaje y, por ende, las compostas pueden estar listas en diferentes tiempos. Algunos factores que pueden intervenir en el proceso de maduración de la composta dependen de la relación C:N, tasa de aireación y contenido de humedad; por ejemplo, Tang et al. (2023) mencionan que las condiciones óptimas de compostaje de residuos de cocina son una relación de C:N (24:1), una tasa de aireación de 0.3 L·kg⁻¹ de materia seca·min⁻¹ y un contenido de humedad de 65 %. Por su parte, Xie et al. (2022) mencionan que la relación inicial C/N del sustrato tiene un efecto significativo en la comunidad microbiana y la degradación de la materia orgánica durante el compostaje de ramas de nogal, y que una relación C/N adecuada en los residuos de ramas permite una nutrición equilibrada, incrementa la abundancia de microorganismos, mejora la degradación de lignocelulosa y favorece la eliminación de fitopatógenos; en este sentido, se recomienda una relación C/N de 30:1 para la conversión biológica eficiente de residuos de ramas. Varnero M. et al. (2007) reportan que el grado de fitotoxicidad está relacionado con el tipo de residuo, la madurez de la composta y la sensibilidad de las especies empleadas en los ensayos a compuestos fitotóxicos como pueden ser los contenidos de amonio, ácidos volátiles orgánicos, metales pesados y sales que afectan directamente la germinación y el crecimiento radicular.

Germinación e índice de germinación *in vitro* de agave bajo diferentes tratamientos

La prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) mostró diferencias significativas entre los tratamientos. Los mayores porcentajes de germinación de semillas de *A. angustifolia* se registraron en el aserrín estéril (65 %), seguido del aserrín sin esterilizar (59 %) y la composta de palma canaria (49 %). En contraste, los porcentajes más bajos

se observaron en el tratamiento control (26 %) y en el lixiviado (22 %) (Figuras 1 y 3).

En cuanto al *ig* (desarrollo radicular), los mejores tratamientos estuvieron por encima del 100 %: aserrín estéril (263 %), aserrín sin esterilizar (257 %), composta (239 %), lixiviado (155) y agua de llave (100 %) (Figuras 2 y 3).

Garrido et al. (2005) mencionan que las semillas pueden variar de tamaño en diferentes especies de plantas y que esta variación se localiza dentro de la planta superando a la variación entre plantas y entre poblaciones; además, también se ha propuesto que la asignación de recursos de la planta y el tipo de polinización son las principales fuentes de tal variación, por lo cual podría inferirse que la germinación de las semillas de agave se ve afectada por estas variaciones que ocurren dentro de la misma planta. Por ejemplo, en *A. angustifolia* se reportan porcentajes de germinación que van de 2 %, 20 %, 23 %, 28 % y 85 % en condiciones *in vitro* (Aguilar-Rito et al., 2024; Mendoza-Galindo & Mora-Herrera, 2021; Ramírez-Tobías et al., 2012; Zárate-Martínez et al., 2024), mientras que Hernández-Castro et al. (2021) mencionan que se puede alcanzar entre 65 % y 95 % bajo invernadero, y Sánchez-Salas et al. (2017) determinaron que el porcentaje de germinación en *A. victoriae-reginae* a temperatura de 25 °C oscila entre 92 % y 100 % en agua, de 96 % a 100 % en arena, mientras que la germinación de las semillas enterradas en arena fluctúa de 42 % a 74 %, y que la germinación comienza entre el tercero y cuarto día cuando son colocadas en arena y agua, en tanto que, cuando están enterradas, puede ocurrir entre 15 d a 26 d. En el presente estudio, la germinación *in vitro* de *A. angustifolia* inició a los cuatro días después de la siembra, registrándose los mayores porcentajes de germinación entre los días 11 y 15.

Por su parte, Vázquez-Díaz et al. (2011) obtuvieron entre 62 % y 66 % de germinación en *A. salmiana* de las variantes blanco y chino sembradas en mayo y diciembre, pero en la variante liso fue del 71 %, y



Figura 1. Germinación de *Agave angustifolia* en aserrín estéril, aserrín sin esterilizar y composta de palma canaria (de derecha a izquierda).

en junio del siguiente año solo germinó el 30 % de las semillas de la variante liso; estas diferencias se atribuyen a los cambios de temperatura que se tuvieron durante el estudio. Otro factor que puede influir en el bajo porcentaje de germinación es el tiempo de almacenamiento de la semilla, como lo mencionan Gutiérrez-Hernández et al. (2020), quienes reportan que la germinación de *A. potatorum* osciló entre 4 % y 87 % a 25 °C, siendo mayor en semillas almacenadas entre 6 y 17 meses, resaltando que el tiempo de almacenamiento es un factor de importancia.

En el presente estudio, la germinación *in vitro* con temperatura de 25 °C resultó en una germinación promedio de 65 % en aserrín estéril, 59 % en aserrín no esterilizado, 49 % en composta y 26 % a 22 % en el control y lixiviado, respectivamente. Considerando estudios anteriores, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los porcentajes de germinación aceptables para *A. angustifolia*, dado que las variaciones son muy altas en los diferentes estudios documentados, sin embargo, estadísticamente no se encontraron diferencias significativas entre el uso de uno u otro sustrato para la germinación de semillas de *A. angustifolia*. En el presente estudio se determinó que la composta de palma canaria después de 177 d de compostaje presentó valores altos de IG en agave (239 %) y por encima del 100 % en las especies de referencia empleadas para corroborar la madurez de la composta (Figuras 2 y 3). De acuerdo con los resultados observados en la

Figura 3, la composta y el lixiviado se pueden calificar como fuente de fitonutrientes o fitoestimulantes para *A. angustifolia* al alcanzar valores de IG por encima del 100 % según lo propuesto por Zucchini et al. (1985). Emino y Warman (2004), mencionan que valores de IG inferiores a 50 % indican una fitotoxicidad alta; entre 50 % y 80 % fitotoxicidad moderada y valores superiores a 80 % revelan que la composta no presenta fitotoxicidad.

En el presente estudio, los IG superiores a 80 % en el lixiviado y composta reflejaron ausencia de fitotoxicidad. Los estudios previos mencionan que las especies más sensibles a los fitotóxicos responden con bajos porcentajes de germinación y menor desarrollo radicular, de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, los porcentajes de germinación de agave en la composta y lixiviado fueron de 49 % y 22 %, respectivamente, mientras que los valores de IG en agave y en las especies de referencia están por encima del 100 %, lo cual indica que no existen efectos fitotóxicos sobre el desarrollo de la planta.

Indicadores de vigor (longitud radicular, altura, grosor de tallo)

La prueba de Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en la longitud radicular entre tratamientos ($p = 0.01$), indicando que al menos uno difiere del resto. Sin embargo, el análisis post hoc de Dunn con correc-



Figura 2. Longitud radicular para el cálculo del Índice de germinación (IG) de arriba hacia abajo: aserrín estéril, aserrín sin esterilizar, composta, lixiviado y agua de llave.

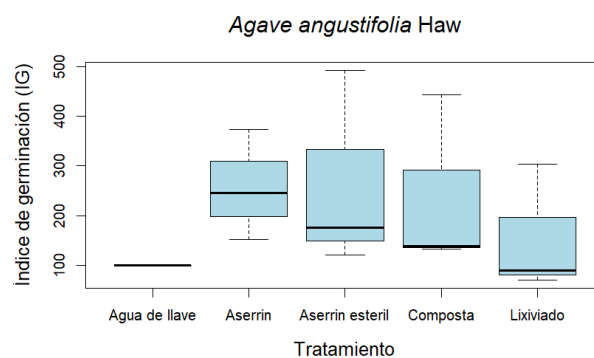
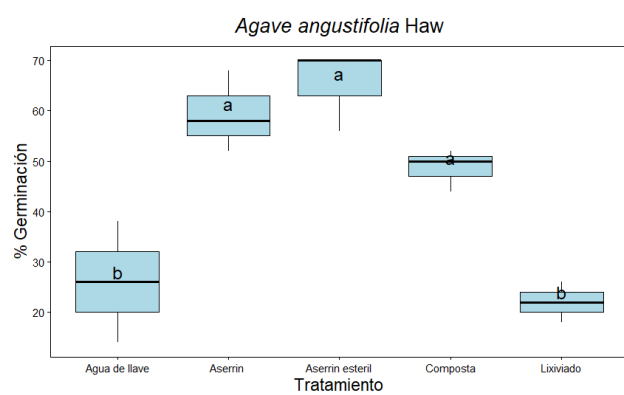


Figura 3. Porcentaje de germinación de *Agave angustifolia* *in vitro* e IG en cuatro sustratos.

ción de Bonferroni evidenció diferencias significativas únicamente entre los tratamientos de agua de llave y lixiviado ($p < 0.05$). Entre los demás tratamientos no se detectaron diferencias estadísticas significativas. De manera descriptiva, la mayor longitud de raíz se observó en el tratamiento con lixiviado, mientras que el tratamiento con agua de llave presentó los valores más bajos; los demás tratamientos mostraron respuestas intermedias (Figura 4). En cuanto a la altura de las plántulas, la prueba de Dunn con ajuste de Bonferroni indicó diferencias significativas entre aserrín y composta ($p < 0.05$), siendo mayor la altura en el tratamiento con aserrín. Asimismo, el aserrín también difirió significativamente del lixiviado ($p < 0.05$). Por otro lado, los tratamientos con composta y lixiviado no mostraron diferencias significativas entre sí. Los tratamientos con agua de llave y aserrín estéril presentaron valores intermedios, sin diferencias estadísticas claras con los grupos extremos (Figura 4). En el caso del grosor, no se encontraron diferencias estadísticas (Figura 4).

Enríquez del Valle et al. (2018) encontraron que plantas de agave establecidas sin abono y sin fertirrigación desarrollaron raíces más largas, menos ramificadas y con menor volumen, así como hojas y tallos más pequeños, en comparación con plantas abonadas y fertirrigadas. Por otra parte, Leal-Robles et al. (2024) mencionan que las raíces se desarrollan mejor cuando se mezcla la composta de *A. lechuguilla* con estiércol y *peat moss*, en cambio, cuando las plantas crecen directamente en composta se observa una menor longitud radicular, debido a que la textura se compacta con el riego constante, de tal forma que se limitan los espacios de aire, reduciendo el desarrollo de las raíces. Esto pudo haber afectado el desarrollo radicular en el presente estudio, ya que no se observó claramente el efecto de la composta sobre el desarrollo radicular (Figura 4).

Biomasa (peso húmedo y peso seco)

La prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) indicó que no hay diferencias significativas en *A. angustifolia* en el peso húmedo; en cuanto al peso seco, se encontró que existen diferencias significativas ($p = 0.0000001$) y que los mejores tratamientos fueron aserrín sin esterilizar

y aserrín estéril, seguidos de composta, lixiviado y el control (testigo absoluto) (Figura 5).

Las raíces representan un componente clave en la distribución de biomasa vegetal y pueden constituir entre el 20 % y el 50 % del peso seco total en diversas especies; esta proporción puede incrementarse bajo condiciones de estrés hídrico o limitación nutricional, donde las plantas priorizan la asignación de carbono hacia estructuras subterráneas como estrategia de adquisición de recursos (Luna-Luna et al., 2017; Poorter et al., 2012). En el presente estudio no se detectaron diferencias significativas en el peso fresco entre tratamientos, lo que sugiere que el contenido hídrico de las plántulas fue relativamente homogéneo durante la fase de evaluación. Este comportamiento es consistente con la naturaleza del peso fresco, el cual presenta alta variabilidad asociada al estado hídrico y menor sensibilidad para detectar cambios estructurales en biomasa (Taiz et al., 2015). En contraste, el peso seco mostró diferencias significativas entre tratamientos, indicando variaciones reales en la acumulación de biomasa estructural. Este resultado sugiere que los distintos sustratos evaluados influyeron en la eficiencia de crecimiento y en la asignación de recursos durante el establecimiento *in vitro*. En este sentido, tratamientos como aserrín, aserrín estéril, composta, lixiviado y agua de llave favorecieron distintos patrones de crecimiento radicular, lo cual puede estar asociado a diferencias en disponibilidad de nutrientes y condiciones fisicoquímicas del medio. Además, la relación observada entre la longitud de la raíz y el peso seco sugiere un acoplamiento entre el desarrollo radicular y la acumulación de biomasa estructural; se ha demostrado que el crecimiento de la radícula es un indicador temprano del vigor de las plántulas y se asocia positivamente con la eficiencia en la adquisición de agua y nutrimentos, lo que impacta directamente en la acumulación de biomasa seca (Bewley et al., 2013; Finch-Savage & Bassel, 2016). Sin embargo, la variabilidad entre tratamientos de este estudio indica que esta relación no siempre es uniforme, sino que depende de las condiciones del sustrato y de la respuesta fisiológica específica de las plantas.

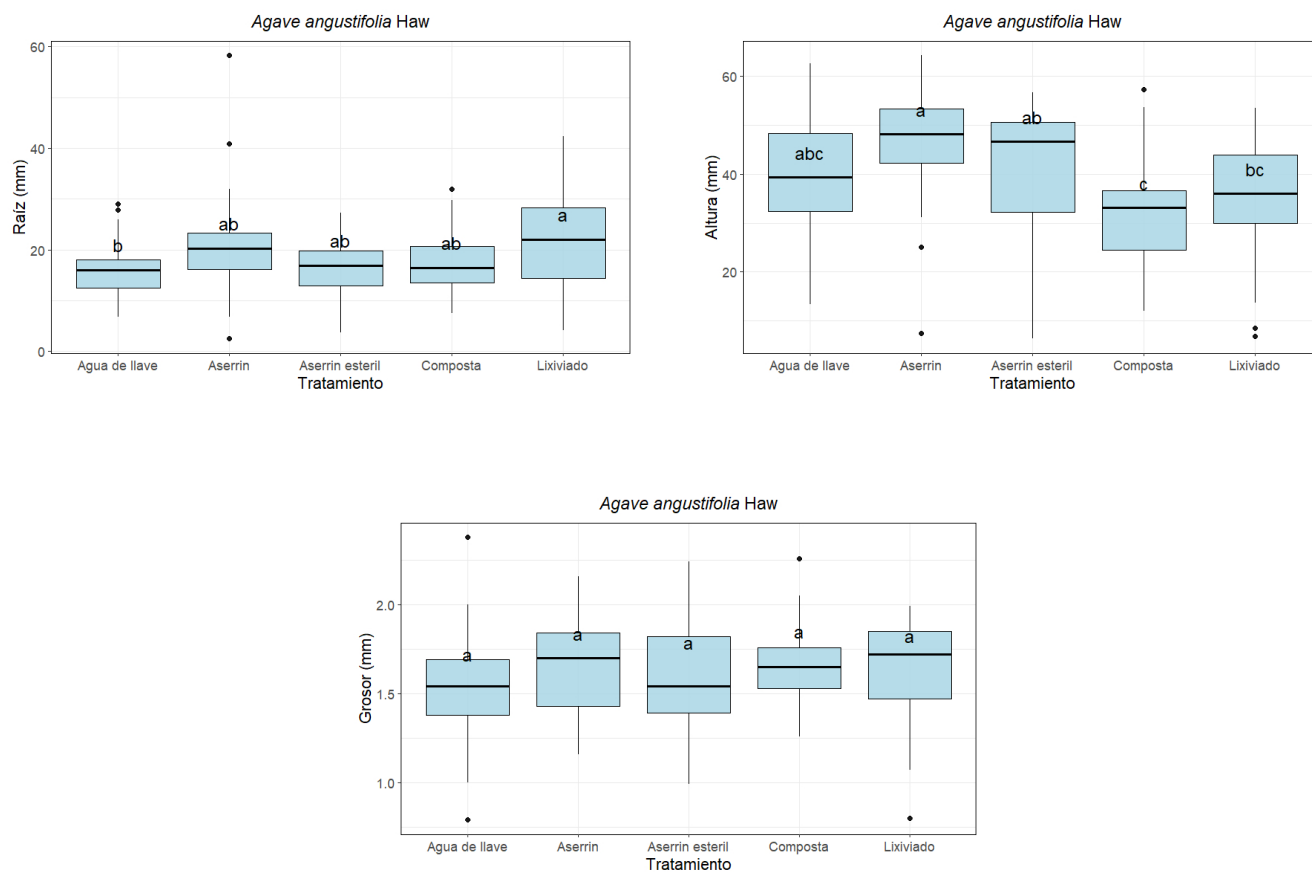


Figura 4. Longitud de raíz, altura y grosor de *Agave angustifolia* obtenidos de manera *in vitro*, $n = 150$ y analizados con la prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$) y análisis post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni.

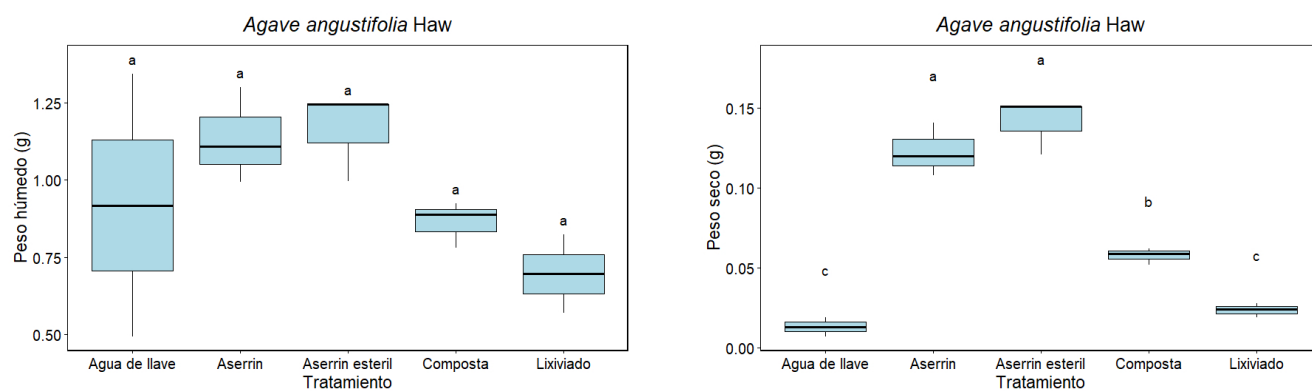


Figura 5. Peso húmedo y peso seco en los diferentes tratamientos de *Agave angustifolia*, $n = 150$, ambos analizados con pruebas de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Alvarado Cepeda et al. (2024) encontraron que el bagazo de agave y la turba promovieron una mayor altura de la hoja cotiledonar, lo que sugiere que el bagazo puede ser una alternativa superior frente a algunos sustratos comerciales. En el presente estudio, los resultados sugieren que la composta de palma canaria, el lixiviado de composta y el mismo aserrín pueden ser usados como sustrato para germinación. Por otro lado, Enríquez-del Valle et al. (2023) mencionan que el sustrato perlita (100 %) afecta significativamente la altura de la planta, diámetro del tallo, volumen de la raíz, peso seco de raíz, peso seco de la parte aérea y longitud de la raíz. El sustrato debe proporcionar soporte a la planta y proveer condiciones estables de aireación, retención de humedad, drenaje y capacidad de intercambio catiónico (Lazcano-Bello et al., 2021). Los resultados obtenidos sugieren que la longitud de raíz, la altura de las plántulas y el grosor estuvieron influenciados por las características físicas, químicas y biológicas de los sustratos evaluados.

CONCLUSIONES

En la germinación *in vitro* de *Agave angustifolia* no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre los sustratos evaluados; sin embargo, el aserrín estéril, el aserrín sin esterilizar y la composta madura mostraron los mayores porcentajes de germinación. El lixiviado de composta *in vitro* promovió una mayor longitud radicular, lo que sugiere la presencia de compuestos capaces de estimular el desarrollo inicial del sistema radical de las plántulas. La composta de palma canaria y su lixiviado pueden ser alternativas viables para la propagación temprana de *A. angustifolia*, debido a la ausencia de efectos fitotóxicos, los altos índices de germinación observados y su capacidad para favorecer el crecimiento inicial de las plántulas.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. A la empresa TERRA-MULCH por brindarnos sus materiales para llevar a cabo los estudios de fitotoxicidad.

LITERATURA CITADA

- Abid, W., Mahmoud, I. B., Masmoudi, S., Triki, M. A., Mounier, S., & Ammar, E. (2020). Physico-chemical and spectroscopic quality assessment of compost from date palm (*Phoenix dactylifera* L.) waste valorization. *Journal of Environmental Management*, 264, 110492. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110492>
- Acosta, Y., Cayama, J., Gómez, E., Reyes, N., Rojas, D., & García, H. (2006). Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *Multiciencias*, 6(3), 220-227.
- Aguilar-Rito, M. G., Arzate-Fernández, A. M., García-Núñez, H. G., & Norman-Mondragón, T. H. (2024). Establecimiento de un protocolo eficiente de desinfección *in vitro* en semillas de siete especies de *Agave* spp. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 42(1), 5. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2310-1>
- Alvarado Cepeda, Y. A., Vega-Chávez, J. L., Felipe-Victoriano, M., & Reyes Arreozola, M. I. (2024). Evaluación de residuos agrícolas como sustratos en la emergencia y desarrollo de plántulas de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck. *Acta Universitaria*, 34, e4041. <https://doi.org/10.15174/au.2024.4041>
- Alvarado, D., Saavedra, L. L., Mares, S., Mares, O., Rodríguez, O., & Maldonado, J. (2023). Caracterización del compostaje de residuos de palma canaria en la Ciudad de México. *Agro Sur*, 51(3), 23-33. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2023.v51n3-04>
- Álvarez-Aragón, C., Arzate-Fernández, A. M., Martínez-Martínez, S. Y., & Martínez-Velasco, I. (2020). Regeneración de plantas de *Agave marmorata* Roetzl, vía embriogénesis somática. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23, 36. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3117>
- Arrazola-Cárdenas, L., García-Nava, J. R., Robledo-Paz, A., Ybarra-Moncada, M. C., & Muratalla-Lúa, A. (2020). Sustratos y dosis de fertirrigación en la acumulación de azúcares totales y el crecimiento de *Agave salmiana* (Asparagaceae). *Polibotánica*, 50, 109-118. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.50.8>
- Azula-Barrera, M. C. (2022). Validación del compost producido a partir de especies invasoras como sustrato de propagación en el proceso de restauración ecológica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(1), 1-19. <https://doi.org/10.15359/rca.57-1.12>

- Bautista-Cruz, A., & Martínez-Gallegos, V. (2020). Promoción del crecimiento de *Agave potatorum* Zucc. por bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 555-567. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.647>
- Bautista, J. A., & Ramírez Juárez, J. (2008). Agricultura y pluriactividad de los pequeños productores de agave en la región del mezcal, Oaxaca, México. *Agricultura Técnica en México*, 34(4), 443-451.
- Bautista, J. A., & Smit, M. A. (2012). Sustentabilidad y agricultura en la "región del mezcal" de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(1), 5-20. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i1.1477>
- Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2013). *Seeds: Physiology of development, germination and dormancy*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4>
- Camacho Céspedes, F., Uribe Lorío, L., Newcomer, Q., Masters, K., & Kinyua, M. (2019). Fitotoxicidad de compost producido con cultivos de microorganismos de montaña y lodos de biodigestor. *Cuadernos de Investigación UNED*, 11(2), 75-84. <https://doi.org/10.22458/urj.v11i2.2197>
- Carbonel, D., & Luciano, T. (2023). Composting of kitchen waste and pet feces: Quality and effect on vegetable germination and growth. *Enfoque UTE*, 14(3), 1-9. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.958>
- Castañeda Hidalgo, E., Aquino López, R., Santiago Martínez, G. M., Lozano Trejo, S., & Jerez Salas, M. P. (2025). Evolución y dinámica del cultivo de agave en Oaxaca: un análisis de tendencias. *Textual*, (85), e2409. <https://doi.org/10.5154/r.textual/2024.85.09>
- Castillejos-Reyes, C., Bautista-Cruz, A., Sánchez-Mendoza, S., & Quiñones-Aguilar, E. E. (2023). Respuesta de agave coyote (*Agave spp.*) a la aplicación de fertilizantes de liberación lenta en condiciones de campo. *Revista Bio Ciencias*, 10, e1431. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1431>
- Enríquez del Valle, J. R., Rodríguez-Ortiz, G., Ruiz-Luna, J., Pacheco Ramírez, A. J., & Vásquez Vásquez, L. (2018). Crecimiento y condición nutrimental de plantas micropropagadas de *Agave angustifolia* abonadas y fertirrigadas en vivero. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 5(2), 106-115.
- Enríquez-del Valle, J. R., Chávez-Cruz, I. L., Rodríguez-Ortiz, G., & Campos-Angeles, G. V. (2023). Vitroplantas de *Agave angustifolia* Haw. obtenidas en ambientes de incubación contrastantes, aclimatadas en diferentes sustratos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(3), 291-298. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.3.298>
- Emino, E. R., & Warman, P. R. (2004). Biological assay for compost quality. *Compost Science & Utilization*, 12(4), 342-348. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2004.10702203>
- Fain Binda, V., Butti, M., & Torti, M. J. (2018). Índice de germinación como indicador de madurez en compost de residuos de incubación. *Revista de Tecnología Agropecuaria-RTA*, 10(37), 54-57.
- Finch-Savage, W. E., & Bassel, G. W. (2016). Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 67(3), 567-591. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>
- Garrido, J. L., Rey, P. J., & Herrera, C. M. (2005). Fuentes de variación en el tamaño de la semilla de la herbácea perenne *Helleborus foetidus* L. (Ranunculaceae). *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 62(2), 115-125. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2005.v62.i2.10>
- Gutiérrez-Hernández, G. F., Ortiz-Hernández, Y. D., Corzo-Ríos, L. J., & Aquino-Bolaños, T. (2020). Composición química y germinación de semillas de tobalá (*Agave potatorum*). *Interciencia*, 45(5), 223-228.
- Hernández-Castro, E., López-Sandoval, Y. Y., Escobar-Álvarez, J. L., Ramírez-Reynoso, O., Maldonado-Peralta, M. de los Á., & Valenzuela-Lagarda, J. L. (2021). Análisis morfométrico de semilla y desarrollo de plántulas de maguey sacatoro (*Agave angustifolia* Haw.). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(3), e2964. <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.2964>
- Lazcano-Bello, M. I., Sandoval-Castro, E., Tornero-Campante, M. A., Hernández-Hernández, B. N., Ocampo-Fletes, I., & Díaz-Ruiz, R. (2021). Evaluación de sustratos, solución nutritiva y enraizador en producción de plántulas de jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(1), 61-76. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2450>
- Leal-Robles, A. I., Méndez-López, A., Hidalgo-De León, A., Pérez-Rivera, M. F., & Núñez-Colima, J. A. (2024). Efecto del compost con bagazo de lechuguilla en el crecimiento de *Agave salmiana*. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, num. esp. 4, e4066. <https://doi.org/10.19136/era.a11nIV.4066>
- Luna-Luna, S., Enríquez-del Valle, J. R., Rodríguez-Ortiz, G., Carrillo-Rodríguez, J. C., & Velasco-Velasco, V. A. (2017). Anatomía y morfología de plantas micropropagadas-aclimatadas de *Agave potatorum* Zucc. fertirrigadas

- das en vivero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(4), 491-494. <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.4.491-494>
- Mendoza-Galindo, E. J., & Mora-Herrera, M. E. (2021). Germinación de semillas de *Agave angustifolia* en diferente madurez fisiológica de la inflorescencia. *Revista PCTI*, 12(197), 1.
- Miguel Martínez, M., Pliego Marín, L., Robles, C., & Zárate Altamirano, G. (2020). Fitotoxicidad de materiales compostados destinados para uso agrícola. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 7(2), 64-75.
- Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 193(1), 30-50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
- Quezada-Salinas, A., García-Díaz, S. E., Almaraz-Sánchez, A., Alvarado-Rosales, D., Saavedra-Romero, L. de L., Aranda-Ocampo, S., Fredy-Ortiz, C., & Equihua-Martínez, A. (2023). Fungi associated with the decline and death of *Phoenix canariensis* in Mexico City. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 41(2), 241-256. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2302-8>
- Ramírez-Tobías, H. M., Peña-Valdivia, C. B., Aguirre R., J. R., Reyes-Agüero, J. A., Sánchez-Urdaneta, A. B., & Valle G., S. (2012). Seed germination temperatures of eight Mexican *Agave* species with economic importance. *Plant Species Biology*, 27(2), 124-137. <https://doi.org/10.1111/j.1442-1984.2011.00341.x>
- Ramírez-Tobías, H. M., Peña-Valdivia, C. B., & Aguirre, J. R. (2014). Respuestas bioquímico-fisiológicas de especies de *Agave* a la restricción de humedad. *Botanical Sciences*, 92(1), 131-139. <https://doi.org/10.17129/botsci.156>
- Rodríguez Romero, A. J., Robles Salazar, C. A., Ruíz Picos, R. A., López López, E., Sedeño Díaz, J. E., & Rodríguez D., A. (2014). Índices de germinación y elongación radical de *Lactuca sativa* en el biomonitorio de la calidad del agua del río Chalma. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(3), 307-316.
- Romano, P., Mordos, L. S., Stifani, M., Zorzi, G., Aprile, A., Rustioni, L., & Cardinale, M. (2025). Allelopathic properties of compost: could we use a fertilizer as an herbicide for tree crops? *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 37, 42. <https://doi.org/10.1007/s40626-025-00388-x>
- Rosales-Mata, S., Hernández-Antuna, M., Sarmiento-López, H., & Sigala-Rodríguez, J. A. (2014). Producción de planta de *Agave durangensis* en sistema de acolchado y riego por goteo. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Sánchez-Salas, J., Flores, J., Jurado, E., Sáenz-Mata, J., Orozco-Figueroa, P., & Muro Pérez, G. (2017). Hidrocoria en semillas de *Agave victoriae-reginae* T, Moore, especie en peligro de extinción: Morfología y anatomía como facilitadores de la hidro-dispersión y germinación. *Gayana Botánica*, 74(2), 251-261. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432017000200251>
- Sebbenn, A. M., Degen, B., Azevedo, V. C. R., Silva, M. B., De Lacerda, A. E. B., Ciampi, A. Y., Kanashiro, M., Carneiro, F. da S., Thompson, I., & Loveless, M. D. (2008). Modelling the long-term impacts of selective logging on genetic diversity and demographic structure of four tropical tree species in the Amazon forest. *Forest Ecology and Management*, 254(2), 335-349. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.08.009>
- Secretaría de Economía. (2018). NMX-AA-180-SCFI-2018. *Determinación del grado de madurez de compostas: Especificaciones y método de prueba*. Dirección General de Normas.
- Tang, R., Liu, Y., Ma, R., Zhang, L., Li, Y., Li, G., Wang, D., Lin, J., Li, Q., & Yuan, J. (2023). Effect of moisture content, aeration rate, and C/N on maturity and gaseous emissions during kitchen waste rapid composting. *Journal of Environmental Management*, 326(Part A), 116662. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116662>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development*. Sinauer Associates.
- Varnero M., M. T., Rojas A., C., & Orellana R., R. (2007). Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 7(1), 28-37. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912007000100003>
- Vázquez-Díaz, E., García-Nava, J. R., Peña-Valdivia, C. B., Ramírez-Tobías, H. M., & Morales-Ramos, V. (2011). Tamaño de la semilla, emergencia y desarrollo de la plántula de maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34(3), 167-173. <https://doi.org/10.35196/rfm.2011.3.167>
- Xie, Y., Zhou, L., Dai, J., Chen, J., Yang, X., Wang, X., Wang, Z., & Feng, L. (2022). Effects of the C/N ratio on microbial community and lignocellulose degradation, during branch waste composting. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 45, 1163-1174. <https://doi.org/10.1007/s00449-022-02732-w>

- Zárate-Martínez, W., Castillo Quiroz, D., Castillo Reyes, F., Bautista, A. A., & Ávila Flores, D. Y. (2024). Germinación de semillas de *Agave* colectadas en Oaxaca. *Idesia*, 42(2), 40-50. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292024000200040>
- Zucconi, F., Monaco, A., & Forte, M. (1985). Phytotoxins during the stabilization of organic matter. En J. K. R. Gasser (Ed.), *Composting of Agricultural and Other Wastes* (pp. 73-86). Elsevier.