

Efecto de esquemas de fertilización en el crecimiento vegetativo de *Agave desmettiana* en invernadero (Apan, Hidalgo, México)

Effect of fertilization schemes on vegetative growth of *Agave desmettiana* under greenhouse conditions (Apan, Hidalgo, Mexico)

Jaime A. Cuervo Parra ^a, Víctor H. Pérez España ^b, Martín Peralta Gil ^c, María M. Armendáriz Ontiveros ^d, Sonia Herrera Monroy ^e, Teresa Romero Cortes ^f

Abstract:

The genus *Agave* represents a strategic resource for Mexico due to its high biodiversity, ecological importance, and extensive traditional and industrial uses. Mexico is a key center for the diversity and use of this genus, with 166 species distributed throughout the country, 119 of which are endemic. This study evaluated the effect of eight fertilization schemes on the vegetative growth of *Agave desmettiana* Jacobi (pita agave) seedlings, a species of ornamental value with potential to produce aguamiel (agave sap) and distillates. The treatments corresponded to a 2³ factorial design that evaluated the presence or absence of three factors: chemical foliar fertilizer, organic-mineral fertilizer, and a bioinoculant based on *Bacillus subtilis* (BF). In total, eight treatments were evaluated: one control, three individual treatments (FQ, FOM, and BF), three binary combinations (FQ×FOM, FQ×BF, and FOM×BF), and one triple combination (FQ×FOM×BF). The experiment was conducted under greenhouse conditions in Apan, Hidalgo, Mexico, measuring the number of leaves, leaf length, rosette diameter, plant height, and total fresh weight. Combined treatments consistently outperformed individual treatments, with treatment eight standing out in all variables (13.88 leaves, 18.34 cm leaf length, 36.68 cm rosette diameter, 23.86 cm height, and 67.88 g fresh biomass). These results support integrated nutrient management, in which readily available mineral nutrition, the biostimulant effects of organic-mineral components (e.g., humic substances), and microbial growth-promoting mechanisms act synergistically, favouring vegetative vigor and biomass accumulation in *A. desmettiana*. The values reported in Table 3 and 3.1 correspond to the final evaluation at 210 days after rhizome-offset planting, following 11 fertilizer applications scheduled at 21-day intervals.

Keywords:

Agave, plant nutrition, biofertilizers, vegetative growth, humic substances

Resumen:

El género *Agave* representa un recurso estratégico para México debido a su alta diversidad biológica, su importancia ecológica y su amplio aprovechamiento tradicional e industrial. México es un centro clave de la diversidad y del uso del género, ya que 166 especies

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-6586-8914>, Email: alioscha@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-2519-8677>, Email: victorhugo_perez@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1261-6633>, Email: martin_peralta10391@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-5273-6576>, Email: maria_armendariz@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-0275-2831>, Email: sonia_herrera@uaeh.edu.mx

^f Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-2615-1435>, Email: romero@uaeh.edu.mx

se distribuyen a lo largo del país y 119 son endémicas. En este trabajo se evaluó el efecto de ocho esquemas de fertilización sobre el crecimiento vegetativo de plántulas de *Agave desmettiana* Jacobi (maguey de pita), especie de valor ornamental y con potencial para la producción de aguamiel y destilados. Los tratamientos correspondieron a un diseño factorial 2^3 que evaluó la presencia o ausencia de tres factores: fertilizante foliar químico, fertilizante orgánico-mineral y un bioinoculante a base de *Bacillus subtilis* (BF). En total se evaluaron ocho tratamientos: un testigo, tres tratamientos individuales (FQ, FOM y BF), tres combinaciones binarias (FQ×FOM, FQ×BF y FOM×BF) y una combinación triple (FQ×FOM×BF). El experimento se realizó bajo condiciones de invernadero en Apan, Hidalgo, México, midiendo el número de hojas, la longitud de la hoja, el diámetro de la roseta, la altura de la planta y el peso fresco total. Los tratamientos combinados superaron consistentemente a los individuales, destacando el tratamiento ocho en todas las variables (13.88 hojas, 18.34 cm de longitud foliar, 36.68 cm de diámetro de roseta, 23.86 cm de altura y 67.88 g de biomasa fresca). Estos resultados respaldan un manejo nutrimental integrado, en el que la nutrición mineral de rápida disponibilidad, los efectos bioestimulantes de componentes orgánico-minerales (p. ej., sustancias húmicas) y los mecanismos microbianos promotores del crecimiento actúan sinérgicamente, favoreciendo el vigor vegetativo y la acumulación de biomasa en *A. desmettiana*. Los datos reportados en las Tablas 3 y 3.1 corresponden a la evaluación final a los 210 días después de la siembra de los hijuelos, tras 11 eventos de aplicación de fertilizantes programados cada 21 días.

Palabras Clave:

Agave, nutrición vegetal, biofertilizantes, crecimiento vegetativo, sustancias húmicas

Introducción

El género *Agave* (Asparagaceae) es endémico del continente americano y se asocia principalmente a regiones áridas y semiáridas (SNICS, 2017), donde sus adaptaciones (suculencia, eficiencia en el uso del agua y metabolismo CAM) les permiten prosperar en ambientes con limitaciones hídricas y nutrimentales (Alducin-Martínez et al., 2023). Además de su relevancia ecológica, los magueyes sostienen prácticas culturales y cadenas productivas: históricamente han aportado alimentos, fibras y bebidas (Carmona et al., 2017; Onofre-Sánchez et al., 2022). Asimismo, se han documentado más de 70 usos tradicionales, los cuales se agrupan en múltiples categorías, como alimentación, medicina, fibras, cercos vivos, forraje, ornamentación, bebidas fermentadas y destiladas, entre otros (García-Suárez y Serrano, 2021; Padilla-Camberos et al., 2023).

En México, la alta diversidad de especies de agaves y su aprovechamiento han impulsado sistemas de cultivo con diferentes niveles de tecnificación (Ceja-Ramírez et al., 2017). Sin embargo, un reto frecuente es mejorar el establecimiento y crecimiento vegetativo, especialmente en etapas tempranas (plántulas o plantas jóvenes), donde el manejo del sustrato y la nutrición pueden definir la supervivencia y el vigor (Alvarado-Cepeda et al., 2024). En este sentido, *Agave desmettiana* se utiliza principalmente como planta de ornato; sin embargo, también presenta usos potenciales en la elaboración de mezcal debido a su perfil de sabor, además de atribuirse propiedades medicinales (diuréticas) y valor como fuente de fibra y antioxidantes (CONABIO, 2023). En otras especies con interés mezcalero, se ha observado que la fertilización mineral (NPK) puede promover variables de crecimiento (altura, diámetro, biomasa y número de

hojas), aunque la respuesta depende del contexto edáfico y de la dosis (Martínez-Ramírez et al., 2013). A escala ecofisiológica, se han documentado respuestas diferenciadas de los agaves a la aplicación de nutrientes, incluyendo nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y boro (B), en ambientes contrastantes, lo que respalda que la nutrición actúa como un factor modulador del crecimiento (Nobel et al., 1988; Canseco-Santiago et al., 2024; Sánchez, 2025).

Paralelamente, el interés por alternativas sostenibles ha favorecido el uso de fertilizantes orgánicos u orgánico-mineral (Sánchez, 2025), como productos con fracciones húmicas y/o nutrientes complementarios, ya que componentes como las sustancias húmicas pueden actuar como promotores del crecimiento y moduladores fisiológicos, además de mejorar la disponibilidad de nutrientes en el sistema suelo-planta (Nardi et al., 2021). En este sentido, subproductos de los magueyes, como el bagazo, han sido probados como fertilizantes orgánicos vía tratamientos biológicos complementados con vermicomposta, lo que sugiere oportunidades de generar economía circular (Moran-Salazar et al., 2016).

Un tercer enfoque lo constituyen los bioinoculantes microbianos, conocidos también como biofertilizantes. El uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal es relevante por su capacidad de mejorar la adquisición de nutrientes, estimular el desarrollo radicular, modular fitohormonas y contribuir a la sanidad del cultivo. Al respecto, *Bacillus subtilis* destaca por su colonización de raíces, formación de biopelículas y múltiples mecanismos benéficos observados (Adjei et al., 2025). *Bacillus thuringiensis*, conocido como un agente biocontrolador de patógenos, también ha sido evaluada sus propiedades de biofertilización/bioestimulación (Azizoglu, 2019). En

sistemas de plantaciones intensivas de *Agave tequilana*, se han evaluado en campo formulaciones microbianas (hongos y/o bacterias) promotoras del crecimiento, con efectos positivos en variables de interés productivo como el contenido de azúcares fermentables (Guardado-Fierros et al., 2024). También se han documentado mejoras en variables de crecimiento bajo condiciones de campo en magueyes pulqueros (*Agave salmiana*), en Apan, Hidalgo (Sánchez, 2025).

En este contexto, el manejo integral de nutrientes plantea que la combinación estratégica de insumos químicos, orgánicos y biológicos puede generar complementariedades (disponibilidad inmediata de nutrientes, mejora del entorno rizosférico y estímulo microbiano), además de aumentar la eficiencia del sistema (Amanullah et al., 2023). Con base en ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar bajo condiciones de invernadero en Apan, Hidalgo, el efecto de la fertilización química (FQ), orgánica-mineral (FOM), biofertilizante microbiano (BF) y sus combinaciones sobre el crecimiento vegetativo de plantas de *Agave desmettiana* Jacobi, especie nativa de México y frecuentemente cultivada (Reveal & Hodgson, 2002).

Materiales y métodos

Se trabajó con hijuelos de rizoma de *Agave desmettiana*, cultivados bajo condiciones de invernadero en Apan, Hidalgo. Se evaluaron ocho tratamientos de fertilización (Tabla 1), organizados con un diseño factorial completo 2³ (presencia/ausencia) con tres factores fijos: Micrafol® (fertilizante químico foliar; FQ), Maxi-Grow® Excel (fertilizante orgánico-mineral; FOM) y *Bacillus subtilis* (biofertilizante; BF). El tratamiento T1 correspondió al testigo (0-0-0, sin aplicación de insumos) y los tratamientos T2-T8 correspondieron a las siete combinaciones restantes del diseño factorial, incluyendo los efectos principales y las combinaciones dobles y triple de los tres factores evaluados: FQ, FOM y BF (FQ×FOM, FQ×BF, FOM×BF y FQ×FOM×BF), con lo cual se cubrieron todas las combinaciones posibles. Cada tratamiento se evaluó con tres repeticiones y en cada repetición se incluyeron 20 plantas independientes como unidades experimentales, para un total de 60 plantas por tratamiento (n = 60) y 480 plantas en todo el experimento. El ensayo se realizó de marzo a septiembre de 2025 en el invernadero de la Escuela Superior de Apan (UAEH), Apan, Hidalgo, México, ubicado a 2490 m. s. n. m. (19° 39' 16.5" N, 98° 31' 06.4" O). Los valores presentados en las Tablas 3 y 3.1 corresponden al cierre del ciclo experimental, es decir, 210 días después de la siembra/establecimiento de los hijuelos; posteriormente,

de octubre a diciembre de 2025, se realizó el procesamiento estadístico de los datos.

Tabla 1. Esquemas de fertilización aplicados

Clave	Tratamientos
T1	Testigo sin aplicación de fertilizante
T2	Fertilizante Químico (FQ)*
T3	Fertilizante Orgánico-Mineral (FOM)**
T4	Biofertilizante (BF)***
T5	FQ + FOM
T6	FQ + BF
T7	FOM + BF
T8	FQ + FOM + BF

*Fertilizante químico foliar marca Micrafol® de Glebar, ** Fertilizante orgánico-mineral líquido marca Maxi-Grow® Excel, ***Cepa de *Bacillus subtilis* inoculada pulverizando 100 mL de una suspensión de 1 x 10⁹ UFC/g por planta en la rizosfera del sustrato de cada planta de maguey.

Tabla 2. Matriz de tratamientos (✓ = aplicado; — = no aplicado)

Clave tratamientos*	Testigo (sin Micrafol® fertilizante)	Micrafol® (químico)	Maxi-Grow® Excel (orgánico-mineral)	<i>Bacillus subtilis</i> (biológico)
T1	✓	—	—	—
T2	—	✓	—	—
T3	—	—	✓	—
T4	—	—	—	✓
T5	—	✓	✓	—
T6	—	✓	—	✓
T7	—	—	✓	✓
T8	—	✓	✓	✓

*El conjunto T1–T8 equivale a un diseño factorial 2³ (presencia/ausencia) con tres factores: Micrafol®, Maxi-Grow® Excel y *Bacillus subtilis*; T1 opera como testigo (0-0-0).

Dosis y esquema de aplicación de los tratamientos

Las aplicaciones de los fertilizantes se realizaron con una frecuencia fija de 21 días, para un total de 11 eventos por ciclo anual, de acuerdo con una frecuencia de manejo reportada para agaves (Castillo-Quiroz et al., 2012). El calendario de aplicaciones fue: 1 de marzo, 21 de marzo, 11 de abril, 2 de mayo, 23 de mayo, 14 de junio, 5 de julio, 26 de julio, 16 de agosto, 6 de septiembre y 27 de septiembre de 2025.

Se evaluaron ocho tratamientos (T1–T8), aplicando en cada evento 250 mL de solución directamente al sustrato por planta (Tabla 2). El tratamiento testigo (T1) recibió

únicamente agua destilada. El tratamiento T2 consistió en un fertilizante foliar aplicado a la dosis baja recomendada por el fabricante ($0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), preparado disolviendo 4.5 g del producto en 15 L de agua. El tratamiento T3 consistió en un fertilizante orgánico-mineral aplicado a la dosis recomendada (3.3 mL de la solución madre diluida en 15 L de agua, equivalente a 0.055 mL por cada 250 mL aplicados por planta). El tratamiento T4 utilizó un bioinoculante comercial a base de *Bacillus subtilis* ($2 \times 10^{10} \text{ UFC} \cdot \text{g}^{-1}$ en el producto sólido). Para su preparación, se inoculó 1 g del concentrado en 200 L de caldo de cultivo suplementado con 500 g de glucosa, se fermentó durante 30 días y se ajustó la suspensión final a una concentración de $1 \times 10^9 \text{ UFC} \cdot \text{mL}^{-1}$.

Los tratamientos T5 a T7 correspondieron a combinaciones binarias de los insumos anteriores (T5 = T2 + T3; T6 = T2 + T4; T7 = T3 + T4), mientras que el tratamiento T8 integró los tres insumos (T2 + T3 + T4). En todas las combinaciones, cada componente se empleó a la misma concentración que en su tratamiento individual, manteniendo un volumen total de aplicación de 250 mL por planta en cada evento.

Análisis estadístico

El número de hojas, como variable de conteo, se analizó mediante un modelo lineal generalizado (GLM) con distribución de Poisson y función de enlace logarítmica. Cuando se detectó sobredispersión, se empleó en su lugar una distribución binomial negativa. Las variables continuas (longitud de hoja, diámetro de roseta, altura de planta y peso fresco total) se analizaron mediante un modelo lineal en un diseño factorial 2^3 , correspondiente a los tres factores evaluados (fertilizante foliar, fertilizante orgánico-mineral y bioinoculante), cada uno con dos niveles (presencia o ausencia). Los supuestos del modelo lineal se verificaron mediante el análisis de residuales: normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y gráficos cuantiles-cuantiles (Q-Q), y homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Para el peso fresco total, cuando fue necesario cumplir los supuestos, se aplicó una transformación logarítmica a los datos. En caso de asimetría pronunciada que persistía tras la transformación, se ajustó alternativamente un modelo lineal generalizado con distribución Gamma y función de enlace logarítmica.

En todos los modelos ajustados, se estimaron las medias mínimas cuadráticas (LSMEANS) y las comparaciones múltiples entre tratamientos se realizaron mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). Los ocho tratamientos evaluados correspondieron a las combinaciones factoriales completas de los tres factores (fertilizante foliar,

fertilizante orgánico-mineral y bioinoculante), cada uno con dos niveles (ausencia o presencia). El peso fresco total se definió como la biomasa fresca total por planta (raíces + parte aérea), determinada inmediatamente después de la cosecha mediante pesaje de la planta completa recién extraída. Todos los análisis se realizaron con SAS/STAT® versión 15.3 (SAS, 2023).

Resultados y discusión

Efectos generales de los tratamientos

Los resultados revelan un patrón consistente: las variables morfológicas de *A. desmettiana* (número de hojas, longitud de hoja, diámetro de roseta, altura de planta y peso fresco total) aumentaron progresivamente al pasar de tratamientos individuales (T2-T4) a combinaciones binarias (T5-T7) y, finalmente, a la combinación triple (T8) (Tabla 3 y Tabla 3.1). Este incremento sugiere sinergias entre los componentes evaluados (fertilizante foliar químico, fertilizante orgánico-mineral y bioinoculante con *B. subtilis*), alineándose con el concepto de manejo integrado de nutrientes (INM, por sus siglas en inglés), que promueve la complementariedad entre fuentes minerales, orgánicas y microbianas para optimizar el crecimiento vegetal (Paramesh et al., 2023; Amanullah et al., 2023). En consecuencia, la interpretación de estos resultados se circunscribe al desempeño vegetativo observado al cierre del ciclo experimental de 210 días después de la siembra de los hijuelos.

El tratamiento testigo (T1) mostró el menor desempeño (Tabla 3 y Tabla 3.1), mientras que el tratamiento T8 alcanzó los valores máximos en todas las variables (13.88 hojas, 18.34 cm de longitud de hoja, 36.68 cm de diámetro de roseta, 23.86 cm de altura de planta y 67.88 g de biomasa fresca). Estos resultados indican que la integración de los tres componentes maximiza tanto el desarrollo estructural (tamaño) como la acumulación de biomasa en condiciones de invernadero.

Efectos de la fertilización química individual

El tratamiento T2 (fertilizante foliar químico) mejoró significativamente todas las variables respecto al tratamiento testigo (Tabla 3), consistente con respuestas documentadas en otras especies de *Agave* a la fertilización NPK, que promueve la altura, diámetro, número de hojas y biomasa (Nobel, 1988; Martínez-Ramírez et al., 2013; Sánchez, 2025). Sin embargo, su desempeño fue inferior al de las combinaciones binarias y terciarias de fertilizantes, lo que sugiere que la nutrición mineral, por sí sola, no explota plenamente el potencial del

sistema rizosférico en este sistema. Además, estudios recientes en agaves con fertilizantes de liberación lenta respaldan que el manejo nutrimental puede modificar el crecimiento y el estado nutricional de las plantas (Bautista-Cruz et al., 2025).

Efecto del fertilizante orgánico-mineral individual

El tratamiento T3 presentó mejoras similares a T2 en varias variables (Tabla 3 y Tabla 3.1). Este efecto se atribuye no solo al aporte nutricional, sino también a componentes bioestimulantes como los ácidos húmicos y fúlvicos, que favorecen el desarrollo radicular, la absorción de nutrientes y respuestas fisiológicas positivas (Canellas et al., 2015; Nardi et al., 2021). Esta interpretación se refuerza con literatura reciente que reconoce a los extractos húmicos como bioestimulantes capaces de favorecer el crecimiento y la tolerancia de los cultivos ante estreses abióticos (Hernández-Campos et al., 2023).

Tabla 3. Valores promedio (± error estándar) de variables morfológicas en plantas de *Agave desmettiana* bajo ocho tratamientos de fertilización (diseño factorial 2³).

Tratamiento	No. de hojas (± EE)	Longitud de hoja (cm ± EE)	Diámetro de roseta (cm ± EE)
T1 (testigo)	4.32 ± 0.03 ^f	3.64 ± 0.50 ^f	7.27 ± 0.01 ^f
T2 (FQ)	5.18 ± 0.05 ^d	5.88 ± 0.16 ^e	16.32 ± 0.12 ^d
T3 (FOM)	5.08 ± 0.09 ^d	8.15 ± 0.35 ^d	16.94 ± 0.07 ^d
T4 (BF)	4.76 ± 0.04 ^e	8.47 ± 0.21 ^d	14.30 ± 0.05 ^e
T5 (FQ+FOM)	7.06 ± 0.15 ^c	10.18 ± 0.55 ^c	29.16 ± 0.09 ^b
T6 (FQ+BF)	7.20 ± 0.02 ^c	10.63 ± 0.13 ^c	23.26 ± 0.06 ^c
T7 (FOM+BF)	8.52 ± 0.05 ^b	14.58 ± 0.52 ^b	23.43 ± 0.12 ^c
T8 (FQ+FOM+BF)	13.88 ± 0.06 ^a	18.34 ± 0.67 ^a	36.68 ± 0.05 ^a

Tabla 3.1 Valores promedio (± error estándar) de variables morfológicas en plantas de *Agave desmettiana* bajo ocho tratamientos de fertilización (diseño factorial 2³).

Tratamiento	Altura de planta (cm ± EE)	Peso fresco total (g ± EE)
T1 (testigo)	5.21 ± 0.11 ^g	2.42 ± 0.06 ^f
T2 (FQ)	7.50 ± 0.04 ^f	14.23 ± 0.23 ^d
T3 (FOM)	7.56 ± 0.03 ^f	15.62 ± 0.03 ^d
T4 (BF)	9.94 ± 0.08 ^e	10.68 ± 0.07 ^e
T5 (FQ+FOM)	18.20 ± 0.15 ^b	34.72 ± 0.05 ^b
T6 (FQ+BF)	12.43 ± 0.09 ^d	23.61 ± 0.13 ^c
T7 (FOM+BF)	15.14 ± 0.02 ^c	23.72 ± 0.11 ^c
T8 (FQ+FOM+BF)	23.86 ± 0.04 ^a	67.88 ± 0.08 ^a

EE = error estándar. n = 60 plantas por tratamiento (3 bloques de 20 plantas). FQ = Fertilizante foliar químico (Micrafol®); FOM = Fertilizante orgánico-mineral (Maxi-Grow® Excel); BF = Bioinoculante (*Bacillus subtilis*). Medias en una columna con letras distintas difieren significativamente (prueba de Tukey, α = 0.05). El peso fresco total incluye raíces + parte aérea, medido inmediatamente después de la cosecha. Los valores de las Tablas 3 y 3.1 corresponden al cierre del ciclo experimental, es decir, a los 210 días después de la siembra/establecimiento de los hijuelos.

Contribución del tratamiento T5 (FQ + FOM)

El tratamiento T5 constituyó el segundo mejor esquema de fertilización para las variables directamente asociadas con el tamaño y la acumulación de biomasa, particularmente en el diámetro de roseta (29.16 cm), altura de planta (18.20 cm) y peso fresco total (34.72 g), con diferencias estadísticas respecto al testigo y a varios tratamientos individuales (Tabla 3 y Tabla 3.1). Su desempeño sugiere que la combinación del fertilizante químico foliar con el componente orgánico-mineral aportó una complementariedad funcional: disponibilidad nutrimental inmediata, por un lado, y efectos bioestimulantes asociados con fracciones húmicas y fúlvicas, por otro. Por ello, T5 representa una alternativa agronómicamente relevante cuando no se dispone del bioinoculante o cuando se busca priorizar una estrategia química-orgánica-mineral de manejo más simple, aunque los mayores valores absolutos se mantuvieron en el tratamiento T8, donde se integraron los tres componentes.

Contribución del bioinoculante con *Bacillus subtilis*

El tratamiento T4 incrementó notablemente las variables morfológicas respecto al testigo (Tabla 3 y Tabla 3.1). Al respecto, *B. subtilis* actúa como rizobacteria promotora del crecimiento vegetal (PGPR) mediante la colonización radicular, producción de fitohormonas y mejora en la adquisición de nutrientes (Ongena y Jacques, 2008; Dhar et al., 2024; Adjei et al., 2025). En *A. desmettiana*, el aislamiento reciente de cepas de bacterias endófitas del grupo *Bacillus/Prestia* con rasgos PGP respalda la plausibilidad de estas interacciones benéficas (Dhar et al., 2024). De igual manera, en futuros estudios podría explorarse el uso de otras especies, como *Bacillus thuringiensis*, cuyas propiedades de biofertilización y bioestimulación ya han sido comprobadas en esta y otras especies de maguey (Azizoglu, 2019). Los avances recientes han reforzado que estos efectos dependen de la colonización radicular, la formación de biopelículas, la modulación hormonal, la mejora de la disponibilidad de

nutrientes y la bioprotección frente a patógenos (Blake et al., 2021; Adjei et al., 2025).

Sinergias en la combinación triple

La superioridad del tratamiento T8 (Tabla 3 y Tabla 3.1) se interpreta como resultado de funciones complementarias: (1) aporte inmediato de nutrientes por el componente químico; (2) mejora del entorno edáfico y efectos bioestimulantes por parte del componente orgánico-mineral (Canellas et al., 2015; Nardi et al., 2021); y (3) optimización microbiana de la nutrición y tolerancia al estrés por *B. subtilis* (Ongena y Jacques, 2008; Adjei et al., 2025). Estas sinergias coinciden con evidencias de mayor productividad en sistemas manejados con una fertilización integrada química-orgánica-microbiana (Amanullah et al., 2023; Tayade et al., 2024), incluyendo efectos positivos de PGPR en *Agave* bajo condiciones controladas (Coleman-Derr y Tringe, 2014; Guardado-Fierros et al., 2024). Por tanto, la incorporación de microorganismos constituye un componente valioso para mejorar los rendimientos del cultivo. Asimismo, la evidencia reciente sobre la combinación de sustancias húmicas y bacterias promotoras del crecimiento respalda su potencial como alternativa para mejorar la eficiencia del manejo nutrimental y reducir la dependencia exclusiva de fertilizantes minerales (da Silva et al., 2021).

Conclusión

Los esquemas de fertilización combinados mejoraron significativamente el crecimiento vegetativo de *Agave desmettiana* en invernadero respecto a aplicaciones individuales y al testigo. La combinación triple (FQ + FOM + BF) obtuvo el mayor desempeño en todas las variables evaluadas. Estos hallazgos respaldan estrategias de nutrición integrada, alineadas con la literatura sobre respuestas de agaves a la fertilización mineral, efectos bioestimulantes de componentes orgánico-minerales y los beneficios de rizobacterias como *Bacillus*.

Referencias

- Adjei, M. O., Yu, R., Cao, X., & Fan, B. (2025). The mechanisms of *Bacillus subtilis* as a plant-beneficial Rhizobacterium in plant-microbe interactions. *Microorganisms*, 13(12), 2823. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13122823>
- 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, 1-8. <http://doi.org/10.15174/au.2024.4041>
- Alducin-Martínez, C., Ruiz, M. K. Y., Jiménez-Barrón, O., Aguirre-Planter, E., Gasca-Pineda, J., Eguiarte, L. E., & Medellín, R. A. (2023). Uses, knowledge and extinction risk faced by *Agave* species in Mexico. *Plants*, 12(1), 124. <https://doi.org/10.3390/plants12010124>
- Amanullah, Ondrasek, G., & Al-Tawaha, A. R. (2023). Editorial: Integrated nutrients management: an approach for sustainable crop production and food security in changing climates. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1288030. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1288030>
- Azizoglu, U. (2019). *Bacillus thuringiensis* as a biofertilizer and biostimulator: A mini-review of the Little-known plant growth-promoting properties of Bt. *Current Microbiology*, 76, 1379–1385. <https://doi.org/10.1007/s00284-019-01705-9>
- Bautista-Cruz, A., Castillejos-Reyes, C., Sánchez-Mendoza, S., & Sandoval-García, R. (2025). Fertilizantes de liberación lenta en agave arroqueño (*Agave* spp.): efectos sobre el crecimiento y nutrición. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1959. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1959>
- Blake, C., Christensen, M. N., & Kovács, Á. T. (2021). Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 34(1), 15–25. <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-20-0225-CR>
- Carmona, J. E., Morales-Martínez, T. K., Mussatto, S. I., Castillo-Quiroz, D., & Ríos-González, L. J. (2017). Propiedades químicas, estructurales y funcionales de la lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8, 100–122.
- Castillo-Quiroz, D. C., Cano-Pineda, A., & Berlanga-Reyes, C. A. (2012). Establecimiento y aprovechamiento de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.). Comisión Nacional Forestal-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Establecimiento_y_aprovechamiento_de_la_lechuguilla_Agave%20lechuguilla_Torr.pdf
- Canseco-Santiago, D. E., Enríquez-del-Valle, J. R., Rodríguez-Ortiz, G., Rodríguez-Vásquez, M. E., García-Aguilar, J. A., & Pérez-Félix, G. P. (2024). Desarrollo de *Agave americana* var. *oaxacensis* por efecto de nutrición orgánica, fertirriego y bencilaminopurina. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 11, 126-135. <https://doi.org/10.60158/rma.v11i2.431>
- Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., & Piccolo, A. (2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>
- Ceja-Ramírez, R., González-Eguiarte, D. R., Ruiz-Corral, J. A., Rendón-Salcido, L. A., & Flores-Gamica, J. G. (2017). Detección de restricciones en la producción de agave azul (*Agave tequilana* Weber var. azul) mediante percepción remota. *Terra Latinoamericana*, 35, 259–268.
- Coleman-Derr, D., & Tringe, S. G. (2014). Building the crops of tomorrow: Advantages of symbiont-based approaches to improving abiotic stress tolerance. *Frontiers in Microbiology*, 5, 283. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00283>
- CONABIO (2023). Maguey de pita, *Agave desmettiana*. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México. Recuperado de <https://enciclovida.mx/especies/191175>
- da Silva, M. S. R. A., dos Santos, B. D. M. S., da Silva, C. S. R. A., da Silva, C. S. R. A., Antunes, L. F. S., dos Santos, R. M., Barbosa Santos, C. H., & Rigobelo, E. C. (2021). Humic substances in combination with plant growth-promoting bacteria as an alternative for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 12, 719653. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.719653>

- Dhar, S. K., Kaur, J., Singh, G. B., Chauhan, A., Tamang, J., Lakhara, N., Asyakina, L., Atuchin, V., Mudgal, G., & Abdi, G. (2024). Novel *Bacillus* and *Prestia* isolates from Dwarf century plant enhance crop yield and salinity tolerance. *Scientific Reports*, 14, 14645. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65632-x>
- García-Suárez, M. D., & Serrano, H. (2021). *Agaves de ornato Asparagaceae*. <https://tecnogro.com.mx/no.149/agaves-de-ornato-asparagaceae>
- Guardado-Fierros, B. G., Tuesta-Popolizio, D. A., Lorenzo-Santiago, M. A., Rubio-Cortés, R., Camacho-Ruiz, R. M., Castañeda-Nava, J. J., Gutiérrez-Mora, A., & Contreras-Ramos, S. M. (2024). PGPB consortium formulation to increase fermentable sugar in *Agave tequilana* Weber var. Blue: A study in the field. *Plants*, 13, 1371. <https://doi.org/10.3390/plants13101371>
- Hernández-Campos, R., Robles, C., Muñoz-Becera, S., Pérez-Álvarez, S., & Loera-Corral, O. (2023). Humic extract as a biostimulant in crops subjected to abiotic stress. *Agrociencia*, 57(5), 1008–1045. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i5.2942>
- Martínez-Ramírez, S., Trinidad-Santos, A., Bautista-Sánchez, G., & Pedro-Santos, E. C. (2013). Crecimiento de plántulas de dos especies de mezcal en función del tipo de suelo y nivel de fertilización. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36, 387-393.
- Moran-Salazar, R. G., Marino-Marmolejo, E. N., Rodríguez-Campos, J., Davila-Vazquez, G., & Contreras-Ramos, S. M. (2016). Use of agave bagasse for production of an organic fertilizer by pretreatment with *Bjerkandera adusta* and vermicomposting with *Eisenia fetida*. *Environmental Technology*, 37, 1220–1231. doi: 10.1080/09593330.2015.1108368
- Nardi, S., Schiavon, M., & Francioso, O. (2021). Chemical structure and biological activity of humic substances define their role as plant growth promoters. *Molecules*, 26, 2256. <https://doi.org/10.3390/molecules26082256>
- Nobel, P. S., Quero, E., & Linares, H. (1988). Differential growth responses of agaves to nitrogen, phosphorus, potassium, and boron applications. *Journal of Plant Nutrition*, 11, 1683–1700. <https://doi.org/10.1080/01904168809363925>
- Ongena, M., & Jacques, P. (2008). *Bacillus lipopeptides*: Versatile weapons for plant disease biocontrol. *Trends in Microbiology*, 16, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2007.12.009>
- Onofre-Sánchez, J., Testón-Franco, N., & Pinón-Vargas, M. (2022). La entomofagia y florifagia en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México, valor cultural y uso alimentario. *Sosquua*, 4, 9–21. <https://doi.org/10.52948/sosquua.v4i1.688>
- Padilla-Camberos, E., Arrizon, J., & Sandoval, G. (2023). Effect of *Agave* fructan bioconjugates on metabolic syndrome parameters in a murine model. *Pharmaceuticals*, 16, 412. <https://doi.org/10.3390/ph16030412>
- Paramesh, V., Kumar, R. M., Rajanna, G. A., Gowda, S., Nath, A. J., Madival, Y., Jinger, D., Bhat, S., & Toraskar, S. (2023). Integrated nutrient management for improving crop yields, soil properties, and reducing greenhouse gas emissions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1173258. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1173258>
- Reveal, J. L., & Hodgson, W. C. (2002). *Agave desmettiana* Jacobi. In *Flora of North America Editorial Committee (Ed.), Flora of North America North of Mexico* (Vol. 26). Oxford University Press.
- Sánchez, G. J. E. (2025). Efecto de diferentes esquemas de fertilización sobre el crecimiento de plantas de maguey pulquero (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) cultivadas bajo condiciones de campo (Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo [Escuela Superior de Apan], Apan, México). Recuperada de <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/6835>
- Statistical Analysis System (SAS). (2023). SAS Institute Inc. SAS/STAT® User's Guide; Versión 15.3; SAS Institute: Cary, NC, USA, pp. 17–34.
- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). (2017). *Agave (Agave spp.)*, Generalidades de la Red Agaváceas. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/agave-agave-spp>
- Tayade, A., Nagpal, S., Neemisha, & Sharma, P. (2024). Untapping the synergy of biofertilizers–organic amendments: an opportunity beyond chemical fertilizers for agricultural sustainability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 55, 3582-3608. <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2391990>