

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

**Fertilizantes de liberación lenta en agave arroqueño (*Agave spp.*):
efectos sobre el crecimiento y nutrición**

**Slow-release fertilizers in arroqueño agave (*Agave spp.*): effects
on growth and nutrition**

Authors/Autores: Bautista-Cruz A., Castillejos-Reyes, C., Sánchez-Mendoza, S., Sandoval-García, R.

ID: e1959

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1959>

Received/Fecha de recepción: May 08th 2024

Accepted /Fecha de aceptación: September 02th 2025

Available online/Fecha de publicación: September 19th 2025

Please cite this article as/Como citar este artículo: Bautista-Cruz A., Castillejos-Reyes, C., Sánchez-Mendoza, S., Sandoval-García, R. (2025). Slow-release fertilizers in arroqueño agave (*Agave spp.*): effects on growth and nutrition. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1959. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1959>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original

Fertilizantes de liberación lenta en agave arroqueño (*Agave spp.*): efectos sobre el crecimiento y nutrición

Slow-release fertilizers in arroqueño agave (*Agave spp.*): effects on growth and nutrition

Fertilización en agave arroqueño/Fertilization in arroqueño agave

Bautista-Cruz A. (<https://orcid.org/0000-0002-9751-7350>)^{1*}, Castillejos-Reyes, C. (<https://orcid.org/0000-0002-3557-6937>)², Sánchez-Mendoza, S. (<https://orcid.org/0000-0002-2543-0168>)³, Sandoval-García, R. (<https://orcid.org/0000-0003-4448-6172>)⁴.

¹Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Hornos 1003, Xoxocotlán, 71230, Oaxaca, México;

²Egresado del Programa de Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales, Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Hornos 1003, Xoxocotlán, 71230, Oaxaca, México;

³NovaUniversitas, Carretera a Puerto Ángel Km. 34.5, Ocotlán de Morelos, Oaxaca, México, 71513;

⁴División de Ingeniería Forestal, Tecnológico Nacional de México-San Miguel El Grande, Km. 1.2 Carretera a la comunidad de Morelos S/N, San Miguel el Grande, Tlaxiaco, Oaxaca, México, 71140.

***Corresponding Author:** Angélica Bautista-Cruz. Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Hornos 1003, Xoxocotlan, 71230, Oaxaca, México. Teléfono: (+52) 951 5170610. E-mail: mbautistac@ipn.mx

RESUMEN

Los agaves, incluidas especies silvestres como el arroqueño (*Agave spp.*), son esenciales para la producción de mezcal. Sin embargo, la mayoría de las especies utilizadas en su elaboración, con excepción de *Agave angustifolia* Haw., no se cultivan ampliamente. Para asegurar la sostenibilidad de la producción mezcalera, es crucial promover la reforestación y el cultivo de agaves silvestres. Este estudio evaluó el efecto de fertilizantes de liberación lenta (SRFs) sobre el crecimiento, nutrición foliar y contenido de azúcares en agave arroqueño. Se empleó un diseño de bloques completamente al azar, con tres tratamientos y cuatro bloques. En cada bloque, los tratamientos se asignaron aleatoriamente, incluyendo cinco plantas por tratamiento. Cada tratamiento contó con un total de 20 plantas distribuidas en los cuatro bloques. Los tratamientos se evaluaron durante 10 meses e incluyeron: T1) control, sin fertilización, T2) Osmocote Plus® y T3) Multicote Agri®. En comparación con las plantas control, la aplicación de Osmocote Plus® incrementó 17.7 % el número de hojas desplegadas, 13.7 % la altura de planta, 13.8 % la circunferencia de tallo, 52.4 % el peso fresco de hojas, 48.9 % el peso fresco de tallo y 53.4 % el peso seco de hojas. La fertilización con Multicote Agri® aumentó 36.0 % el peso fresco de raíces y 59.3 % el contenido foliar de NO₃⁻. Los resultados evidencian el efecto positivo de los SRFs sobre el crecimiento y nutrición del agave arroqueño, lo que contribuye a optimizar la eficiencia en el uso de nutrientes, reducir el impacto ambiental asociado a la fertilización convencional y promover la conservación y el cultivo sustentable de especies nativas de agave.

PALABRAS CLAVE: Agaves silvestres, Crecimiento vegetal, Fertilización, Mezcal, Nutrición vegetal.

ABSTRACT

Agaves, including wild species such as arroqueño (*Agave* spp.), are essential for mezcal production. However, most of the species used in its production, except for *Agave angustifolia* Haw., are not widely cultivated. To ensure the sustainability of mezcal production, it is crucial to promote both the reforestation and cultivation of wild agave species. This study evaluated the effect of slow-release fertilizers (SRFs) on the growth, foliar nutrition, and sugar content of arroqueño agave. A randomized complete block design was employed, consisting of three treatments and four blocks. Within each block, treatments were randomly assigned, with five plants per treatment. Each treatment included a total of 20 plants distributed across the four blocks. The treatments were monitored over a 10-month period and included: T1) control, without fertilization; T2) Osmocote Plus®; and T3) Multicote Agri®. Compared to the control plants, the application of Osmocote Plus® resulted in a 17.7% increase in the number of unfolded leaves, a 13.7% increase in plant height, a 13.8% increase in stem circumference, a 52.4% increase in leaf fresh weight, a 48.9% increase in stem fresh weight, and a 53.4% increase in leaf dry weight. Fertilization with Multicote Agri® led to a 36.0% increase in root fresh weight and a 59.3% increase in foliar NO_3^- content. These results demonstrate the positive effects of SRFs on the growth and nutrient status of arroqueño agave, contributing to improved nutrient use efficiency, reduced environmental impacts associated with conventional fertilization, and the promotion of sustainable conservation and cultivation of native agave species.

KEYWORDS: Wild agaves, Plant growth, Fertilization, Mezcal, Plant nutrition.

Introducción

México es reconocido como centro de diversidad y domesticación del género *Agave*, albergando el 79 % de sus especies, la mayoría de ellas endémicas del país (García-Mendoza, 2011). Esta notable diversidad también se atribuye a la intervención humana, a la selección y el uso tradicional de los agaves, comúnmente conocidos como magueyes (Gentry 1982; Eguiarte *et al.*, 2021). Un total de 53 especies de agave se emplean en la producción de bebidas destiladas, principalmente el “mezcal” (Torres *et al.*, 2015). Desde hace al menos 10,000 años, el ser humano ha aprovechado extensamente el agave, utilizando casi todas las partes de la planta. Se han identificado más de 92 usos distintos (Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2017; Trejo *et al.*, 2022). Estas aplicaciones incluyen alimentación, medicina humana y veterinaria, materiales de construcción, bebidas destiladas y fermentadas, cercas vivas, retención de suelo, decoración, forraje, combustible, extracción de fibras, elaboración de papel y jabón, artesanías y rituales ceremoniales (Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2017). Los principales usos del agave están estrechamente relacionados con sus características biológicas más destacadas: 1) la acumulación de carbohidratos en los tallos, en la base de las hojas y en la savia de las inflorescencias hacia el final de su periodo reproductivo, 2) hojas fibrosas ricas en saponinas, y 3) su estructura en roseta combinada con un sistema radicular extenso y superficial (Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2017).

En Oaxaca (México), aproximadamente nueve especies de agave se utilizan predominantemente para la producción de mezcal. Entre ellas, *Agave angustifolia* Haw., comúnmente conocida como “agave espadín”, es la más demandada y la única que se cultiva ampliamente en zonas semiáridas. Las otras ocho especies, incluido el agave conocido como “arroqueño” (*Agave* spp.), se recolectan de poblaciones silvestres o se cultivan en sistemas semi intensivos, generalmente como cercos vivos con poco o ningún manejo agronómico (Bautista-Cruz & Martínez-Gallegos, 2020). En la última década, la producción de mezcal ha pasado de menos de un millón de litros en 2011 a casi ocho millones de litros. Este aumento sustancial ha ejercido una presión considerable sobre los recursos, particularmente de la materia prima, ya que una parte importante del mezcal depende de agaves silvestres para su elaboración (Arellano-Plaza *et al.*, 2022).

Las plantas de agave requieren varios años para crecer y alcanzar la madurez, generalmente entre 5 y 15 años, dependiendo de la especie (García-Mendoza *et al.*, 2017). Las plantaciones de *Agave tequilana* suelen contener entre 2,500 y 5,000 plantas por hectárea (INEGI, 1997). Sin embargo, este no es el caso de los agaves utilizados para la producción de mezcal, donde, excepto para *A. angustifolia*, el cultivo a gran escala es prácticamente inexistente. Para garantizar un suministro sostenible de materia prima para la producción mezcalera año tras año, es crucial promover la reforestación de poblaciones silvestres y el cultivo de las especies más utilizadas, considerando el largo tiempo necesario para que los agaves alcancen su madurez (Arellano-Plaza *et al.*, 2022).

La mayoría de los fertilizantes sintéticos convencionales contienen macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), pero su eficiencia de uso es relativamente baja. Solo entre 50 y 60 % de N y K, y entre 10 y 25 % de P, son absorbidos eficientemente por los cultivos (Rashid *et al.*, 2021), mientras que el resto se pierde por volatilización, escurrimiento o lixiviación, contribuyendo a la contaminación ambiental (Motamedi *et al.*, 2023). Por ello, es fundamental optimizar el manejo de la fertilización para mejorar la fertilidad del suelo, satisfacer los requerimientos nutricionales de los cultivos, aumentar su calidad y rendimiento, fortalecer las economías rurales y fomentar una agricultura sustentable. Además, este enfoque busca promover prácticas agrícolas amigables con el ambiente (Wang *et al.*, 2021). En las últimas décadas, la enorme demanda de fertilizantes y la urgente necesidad de un uso más eficiente de ellos han llevado al desarrollo de varios tipos de fertilizantes, entre ellos, los fertilizantes de liberación lenta (SRFs). Estos fertilizantes están formulados específicamente para liberar los nutrientes gradualmente en el suelo durante un periodo más prolongado, en comparación con los fertilizantes sintéticos convencionales, asegurando así una disponibilidad sostenida de nutrientes para las plantas (Yamamoto *et al.*, 2016). La principal limitante para la adopción masiva de los SRFs es su alto costo, que puede ser entre 2.5 y 8 veces mayor que el de los fertilizantes sintéticos convencionales (Rashid *et al.*, 2021). Sin embargo, los SRFs pueden compensar estos costos al reducir la necesidad de múltiples aplicaciones, disminuyendo así los gastos generales de producción (Guertal, 2009). Además, los SRFs mejoran la eficiencia en el uso de nutrientes por los cultivos, lo que no solo reduce la contaminación ambiental, sino también los efectos negativos en la salud humana y animal. En consecuencia, el uso de SRFs se alinea con los principios de la agricultura sustentable, apoyando el equilibrio ecológico a largo plazo y la seguridad alimentaria (Li *et al.*, 2005). En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta del agave arroqueño a la aplicación de SRFs en condiciones de campo, enfocándose en su crecimiento, concentración foliar de nutrientes y contenido de sólidos solubles totales (azúcares) en el tallo.

Material y métodos

El experimento se llevó a cabo en condiciones de temporal en San Jacinto Chilateca (16°50'27.667"N, 96°41'00.673"O), Ocotlán de Morelos, Oaxaca (México), a una altitud promedio de 1,505 m, (INEGI, 2025). Algunas propiedades físicas y químicas del suelo en el sitio experimental fueron las siguientes: densidad aparente 1.23 g cm⁻³, contenido de materia orgánica 2.4 %, pH (relación suelo:agua, 1:2) 8.3, N-NO₃⁻ 4.85 mg kg⁻¹, fósforo disponible 24.5 mg kg⁻¹, Ca²⁺ intercambiable 6354 cmol(+) kg⁻¹, Mg²⁺ intercambiable 241 cmol(+) kg⁻¹, Na⁺ intercambiable 24.5 cmol(+) kg⁻¹ y K⁺ intercambiable 264 cmol(+) kg⁻¹. Los niveles de micronutrientes incluyeron Cu 0.81 mg kg⁻¹, Mn 1.65 mg kg⁻¹, Fe 2.82 mg kg⁻¹, Zn 0.15 mg kg⁻¹ y B 0.45 mg kg⁻¹.

Se utilizaron hijuelos rizomatosos de agave arroqueño de entre 7 y 8 meses de edad, obtenidos de plantas madre de tres años. Estos hijuelos presentaron una altura promedio de 33.5 cm y fueron examinados visualmente para asegurar que no presentaran lesiones, pudrición o ataque de insectos. Las raíces de los hijuelos se cortaron para generar un nuevo sistema radicular que favoreciera su desarrollo tras el trasplante en campo. Posteriormente, se desinfectaron por inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 0.624 % durante 5 min (Sánchez-Mendoza *et al.*, 2020). El

trasplante se realizó el 22 de octubre de 2020, con una distancia de 1.5 m entre plantas y 3 m entre surcos, lo que dio como resultado una densidad de plantación de 2,178 plantas por hectárea. La fertilización se efectuó dos meses después del trasplante. Los SRFs utilizados fueron: 1) Osmocote Plus® (15-09-12) (15 % N, 9% P₂O₅, 12 % K₂O, 6.0% SO₄, 0.02 % B, 0.05% Cu, 0.46 % Fe, 0.06 % Mn, 0.02 % Mo, 0.05 % Zn) con un periodo de liberación de 5-6 meses, y 2) Multicote Agri® (18-06-12) (18 % N, 6 % P₂O₅, 12 % K₂O, 2 % CaO, 3.5 % MgO, 2.1 % Si) con un periodo de liberación de 8 meses. De acuerdo con Sánchez-Mendoza *et al.* (2020) se aplicaron manualmente 100 g de SRF alrededor de cada planta a una profundidad de 5 cm y a una distancia de 5 cm del tallo. El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completamente al azar, con tres tratamientos y cuatro bloques. En cada bloque, los tratamientos se asignaron aleatoriamente, incluyendo cinco plantas por tratamiento. Así, cada tratamiento contó con un total de 20 plantas distribuidas en los cuatro bloques. Cada planta se consideró como una unidad experimental. Los tratamientos evaluados fueron: T1) control, sin fertilización (NSRF), T2) Osmocote Plus® y T3) Multicote Agri®. El periodo de evaluación fue de 10 meses. Al concluir el experimento, se midió la altura de planta (PH) de todas las plantas en cada tratamiento utilizando una cinta métrica, y el número de hojas desplegadas (ULN) se determinó mediante conteo visual. Se seleccionó aleatoriamente la mitad de las plantas de cada tratamiento para su cosecha, obteniendo un total de 10 plantas por tratamiento, 40 plantas en total. En estas plantas cosechadas, se midió la circunferencia del tallo (SC) con una cinta métrica; el volumen radicular (RV) se determinó colocando las raíces en una probeta graduada de 1,000 mL con un volumen de agua conocido y midiendo el volumen de agua desplazado; la densidad radicular (RD) se calculó como la relación masa-volumen. Se determinó el peso fresco de hojas (FWL), tallo (FWS) y raíces (FWR), así como el peso seco de hojas (DWL), tallo (DWS) y raíces (DWR), para lo cual material vegetal se deshidrató en un secador solar hasta alcanzar un peso constante. El contenido de azúcares, expresado como sólidos solubles totales (TSS) en el tallo, se determinó con un refractómetro portátil. Para cuantificar las concentraciones foliares de Ca²⁺, Na⁺, NO₃⁻ y K⁺, se recolectó una muestra compuesta de savia de la porción media de todas las hojas de cada planta. Las concentraciones de estos elementos se midieron en esta muestra compuesta utilizando un medidor de iones LAQUAtwin.

Durante todo el experimento, la humedad y la temperatura del suelo en la rizosfera de las plantas de agave se monitoreó in situ utilizando un medidor digital (Nennimber GmbH). La temperatura promedio del suelo fue de 31°C, mientras que la humedad promedio fue de 61.1 %.

Análisis estadístico

Los datos de altura de planta (PH) y número de hojas desplegadas (ULN) se sometieron a pruebas de normalidad mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, mientras que para las demás variables se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk. Las variables que no cumplieron con los supuestos de normalidad (PH, FWS, FWL, FWR, TSS y contenido foliar de Ca²⁺) se transformaron mediante logaritmo base 10 (log₁₀(x)) o raíz cuadrada. La homogeneidad de varianza se verificó mediante la prueba de Bartlett. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), seguido de una prueba de comparación de medias mediante la prueba de rangos múltiples de Duncan ($p \leq 0.05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software SAS versión 9.1 (SAS Institute, 2004).

Resultados y Discusión

De las 16 variables evaluadas, 8 respondieron significativamente a la aplicación de SRFs. En comparación con las plantas control, la aplicación de Osmocote incrementó el ULN en 17.7 %, la PH en 13.7 %, la SC en 13.8 %, el FWL en 52.4 %, el FWS en 48.9 % y el DWL en 53.4 % (Tablas 1 y 2). La fertilización con Multicote aumentó el FWR en 36.0 % (Tabla 2) y el contenido foliar de NO₃⁻ en 59.3 % (Figura 1). Variables como RV, RD, TSS, DWS, DWR y contenido foliar de Ca²⁺, K⁺ y Na⁺ no presentaron respuestas significativas a los tratamientos evaluados (Tablas 1 y 2; Figuras 1 y 2).

Tabla 1. Valor medio $\pm$ error estándar de las variables de crecimiento en plantas de agave arroqueño (*Agave spp.*) como respuesta a la aplicación de fertilizantes de liberación lenta en condiciones de campo.

Tratamientos	ULN	PH	SC	RV	RD
		----- cm -----		cm ³	g cm ⁻³
Control	2653.1 $\pm$ 247.3 ^b	1187.1 $\pm$ 115.9 ^b	36.7 $\pm$ 3.1 ^b	595.4 $\pm$ 72.3 ^b	393.4 $\pm$ 41.1 ^a
Osmocote plus®	4042.1 $\pm$ 248.6 ^a	1767.9 $\pm$ 105.4 ^a	41.0 $\pm$ 3.5 ^{ab}	913.1 $\pm$ 110.6 ^a	518.5 $\pm$ 27.5 ^a
Multicote agri®	2966.9 $\pm$ 307.0 ^b	1419.3 $\pm$ 152.6 ^{ab}	49.9 $\pm$ 4.0 ^a	707.0 $\pm$ 82.9 ^{ab}	466.5 $\pm$ 50.8 ^a

ULN: Número de hojas desplegadas; PH: altura de planta; SC: circunferencia del tallo; RV: volumen radicular; RD: densidad radicular. Valores medios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$).

Tabla 2. Valor medio $\pm$ error estándar de variables de acumulación de biomasa en plantas de agave arroqueño (*Agave spp.*) como respuesta a la aplicación de fertilizantes de liberación lenta en condiciones de campo.

Tratamientos	FWL	FWS	FWR	DWL	DWS	DWR
			----- g -----			
Control	2653.1 $\pm$ 247.3 ^b	1187.1 $\pm$ 115.9 ^b	36.7 $\pm$ 3.1 ^b	595.4 $\pm$ 72.3 ^b	393.4 $\pm$ 41.1 ^a	16.2 $\pm$ 2.4 ^a
Osmocote plus®	4042.1 $\pm$ 248.6 ^a	1767.9 $\pm$ 105.4 ^a	41.0 $\pm$ 3.5 ^{ab}	913.1 $\pm$ 110.6 ^a	518.5 $\pm$ 27.5 ^a	18.9 $\pm$ 2.7 ^a
Multicote agri®	2966.9 $\pm$ 307.0 ^b	1419.3 $\pm$ 152.6 ^{ab}	49.9 $\pm$ 4.0 ^a	707.0 $\pm$ 82.9 ^{ab}	466.5 $\pm$ 50.8 ^a	24.0 $\pm$ 2.3 ^a

FWL: peso fresco de hojas; FWS: peso fresco de tallos; FWR: peso fresco de raíces; DWL: peso seco de hojas; DWS: peso seco de tallos; DWR: peso seco de raíces. Valores medios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$).

Aunque la aplicación de SRFs promovió incrementos en variables de crecimiento como ULN, PH, SC, así como en variables relacionadas con la acumulación de biomasa incluyendo FWL, FWS, DWL, FWR y contenido foliar de NO₃⁻ en plantas de agave arroqueño, la magnitud de la respuesta varió en función del tipo de fertilizante utilizado. En particular, las variables relacionadas con el crecimiento vegetal (ULN, PH y SC) y la acumulación de biomasa (FWL, FWS y DWL) mostraron una mejor respuesta a la aplicación de Osmocote Plus®, lo cual se puede atribuir a su composición nutricional más completa en comparación con Multicote Agri®. Osmocote Plus® no solo aporta macronutrientes esenciales, sino también micronutrientes como Fe, Zn, Mn y B, los cuales se encontraban en niveles limitantes en el suelo del sitio experimental. Este aporte adicional de micronutrientes puede haber corregido deficiencias específicas y favorecido procesos fisiológicos clave en el desarrollo del agave. Además, el menor periodo de liberación de nutrientes de Osmocote

(5-6 meses) en comparación con Multicote (8 meses) podría haber contribuido a una disponibilidad más temprana y eficiente de los nutrientes, permitiendo que las plantas optimizaran su metabolismo en etapas críticas de crecimiento. En conjunto, estos factores pueden explicar el mayor desarrollo observado en las plantas tratadas con Osmocote.

Excepto por los estudios realizados por Castillejos-Reyes *et al.* (2023), Sánchez-Mendoza & Bautista-Cruz (2022) y Sánchez-Mendoza *et al.* (2020), las investigaciones que evalúan el efecto de los SRFs en plantas del género *Agave* son aún limitadas. En este contexto, Castillejos-Reyes *et al.* (2023) evaluaron el efecto de la fertilización con Osmocote y Multicote en plantas de agave coyote (*Agave spp.*) bajo condiciones de campo. Su estudio reportó incrementos significativos en varios parámetros de crecimiento con la aplicación de Osmocote, incluyendo AP en 21.2 %, ULN en 20.8 %, FWL en 77.0 %, FWS en 62.8 %, DWL en 177.0 %, DWS en 53.1 % y DWR en 39.1 %. De manera similar, la fertilización con Multicote resultó en un incremento de 15.3% en la PH y aumentó el contenido foliar de K^+ , NO_3^- y Na^+ en 25.6 %, 26.2 % y 29.8 %, respectivamente. Estos hallazgos son consistentes con los resultados obtenidos en el presente estudio, particularmente en lo referente a las mejoras en PH, ULN, FWL, FWS y DWL con la adición de Osmocote, así como el incremento observado en el contenido foliar de NO_3^- tras la aplicación de Multicote.

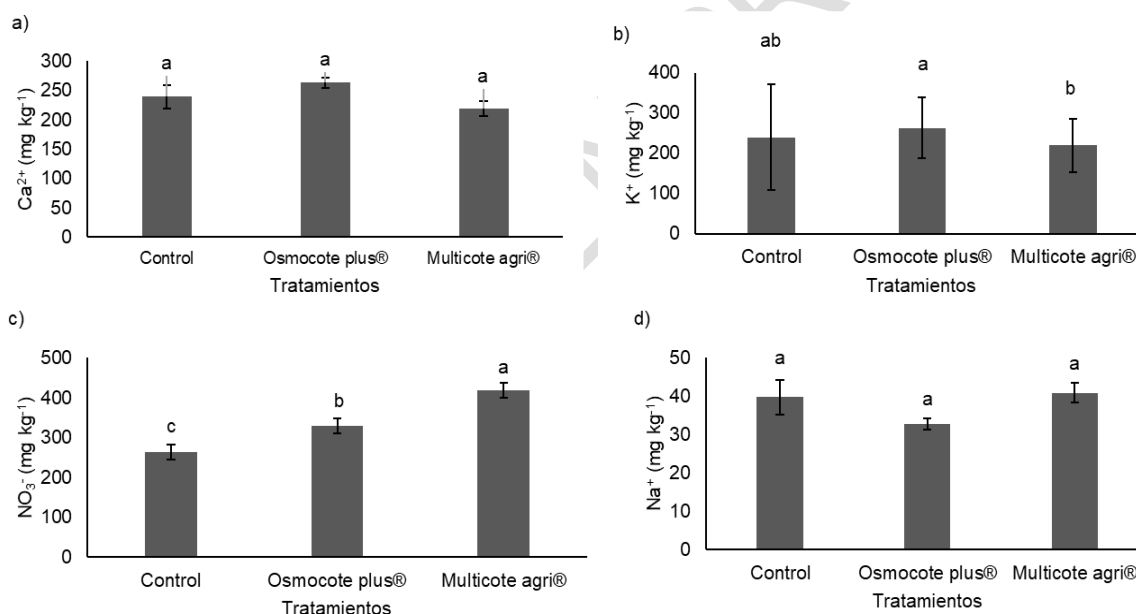


Figura 1. Valor medio $\pm$ error estándar del contenido foliar de Ca^{2+} (a), K^+ (b), NO_3^- (c) y Na^+ (d) en plantas de agave arroqueño (*Agave spp.*) como respuesta a la aplicación de fertilizantes de liberación lenta en condiciones de campo. Valores medios con letras distintas en cada barra son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$).

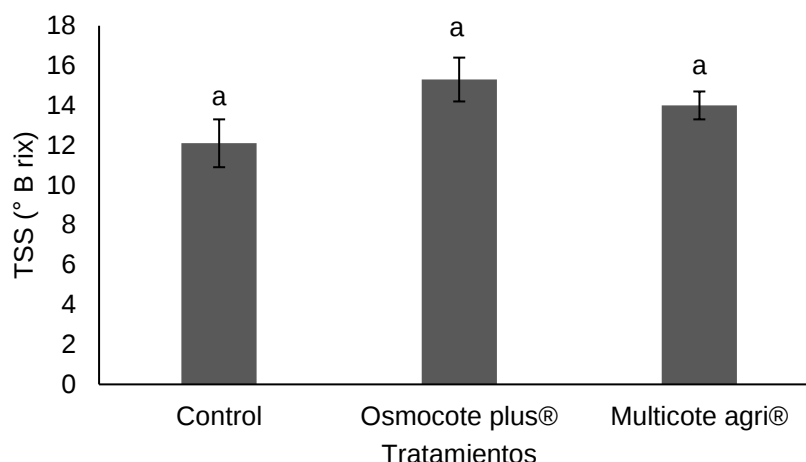


Figura 2. Valor medio $\pm$ error estándar del contenido de sólidos solubles totales (TSS) en plantas de agave arroqueño (*Agave* spp.) como respuesta a la aplicación de fertilizantes de liberación lenta en condiciones de campo. Valores medios con letras distintas en cada barra son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$).

Contrario a los hallazgos reportados en este estudio, Sánchez-Mendoza *et al.* (2020) no observaron diferencias significativas en PH ni en el ULN con respecto al control en plantas de *A. angustifolia* cultivadas en campo y fertilizadas con los SRFs Multigro 6® (21–14–10 NPK + 2 MgO), Multigro 3® (24–05–13 NPK + 2 MgO) y Turf Builder® (27–03–04 NPK). Sin embargo, estos autores reportaron aumentos en la longitud de raíz, FWL, FWS y diámetro del tallo en plantas de *A. angustifolia* fertilizadas con Multigro 6®. En este estudio, la aplicación de Osmocote impactó positivamente en el FWL y FWS en agave arroqueño, hallazgos que coinciden con lo reportado por Sánchez-Mendoza *et al.* (2020).

Estudios previos también han reportado que ciertas especies de agave responden favorablemente a la fertilización sintética convencional. Por ejemplo, al igual que los resultados aquí reportados, Cruz-Vasconcelos *et al.* (2020) observaron que, en comparación con las plantas control, la AP de *A. salmiana* aumentó 51.1 % cuando se fertilizó convencionalmente con triple 17 (17-17-17), urea (46-00-00) y Yara Star (21-17-3). Martínez-Ramírez *et al.* (2013) también reportaron que el ULN aumentó 15.5 % en *A. potatorum* y 18.9 % en plantas de *A. angustifolia* con dosis altas (90-60-45 kg ha⁻¹) y medias (60-40-30 kg ha⁻¹) de fertilización sintética convencional (superfosfato triple, sulfato de potasio y sulfato de amonio).

García-Martínez *et al.* (2020) reportaron que la adición de 43.5 mg kg⁻¹ de P promovió una mejora de 13.2 % en PH, 34.9 % en FWL, 36.1 % en FWS y 21.5 % en el diámetro del tallo en plantas de *A. potatorum*. Estos autores también indicaron que, en agave coyote, una dosis de 29.0 mg kg⁻¹ de P incrementó la PH en 16.4 % y el FWS en 44.4 %. Estos resultados coinciden con los obtenidos en este estudio.

Enríquez del Valle *et al.* (2016) evaluaron diferentes concentraciones (1, 20, 40, 60, 80 y 100 %) de la solución nutritiva de Steiner sobre el crecimiento de plantas de *A. potatorum*. Sus resultados también mostraron incrementos de 132.9 % en el DWL, 210.0 % en el área foliar y 27.9 % en el diámetro del tallo con la concentración de 100 % de la solución de Steiner.

Las plantas de agave se caracterizan por su composición rica en fructanos (polisacáridos basados en fructosa). En las especies de agave los fructanos son reservas de carbohidratos que se sintetizan

y almacenan en los tallos. Su función principal es servir como almacenamiento previo a la floración, y actúan además como osmoprotectores durante períodos de sequía (Arrizon *et al.*, 2010). El contenido de carbohidratos cambia cuando las plantas de agave alcanzan las etapas reproductivas (Mellado-Mojica *et al.*, 2009). Los carbohidratos se sintetizan mediante el proceso de fotosíntesis y las variaciones estacionales en los factores climáticos influyen tanto en la ganancia neta de carbono en los órganos fotosintéticos como en el transporte de los fotoasimilados hacia órganos de almacenamiento con relevancia económica, como los tallos de agave, localmente llamados “piña” (Nobel *et al.*, 1998; Pimienta-Barrios *et al.*, 2001). En línea con lo observado en este estudio, Sánchez-Mendoza *et al.* (2020) no observaron un efecto significativo de los SRFs sobre el contenido de TSS en el tallo de *A. angustifolia*. Por el contrario, García-Martínez *et al.* (2020) reportaron un incremento del 40.0 % en el contenido de TSS en plantas de agave coyote cultivadas bajo un sistema de macrotúnel cuando se fertilizaron con 43.5 mg kg⁻¹ de P. Además, Zúñiga-Estrada *et al.* (2018) encontraron que plantas de *A. tequilana* sometidas a fertilización de base (162-150-250 kg ha⁻¹ de N, P y K) combinada con fertirriego (315.3 g de N, 179.9 g de P₂O₅, 353.4 g de K₂O, 111 g de CaO y 89.1 g de MgO) tampoco presentaron un incremento significativo en el contenido de TSS. La ausencia de una respuesta significativa en el contenido de TSS en tallos de agave arroqueño a la adición de SRFs se podría deber a la interacción de múltiples factores fisiológicos y ambientales. Diversos estudios han documentado respuestas contrastantes a la fertilización entre especies de agave, lo cual se puede explicar por diferencias fenotípicas y genotípicas que determinan requerimientos nutricionales particulares en función de la etapa fenológica (Nobel *et al.*, 1998; Pimienta-Barrios *et al.*, 2001). En este sentido, la acumulación de azúcares no depende exclusivamente de la disponibilidad de nutrientes, sino también del momento en que la planta los demanda para procesos clave como el crecimiento vegetativo, la expansión foliar o la formación de reservas. Además, factores como la edad de la planta y las condiciones climáticas desempeñan una función crucial en la acumulación de TSS. Rendón-Salcido *et al.* (2009) reportaron que los niveles máximos de TSS se alcanzan en agaves con mayor edad (hasta 19 años), y que condiciones de sequía favorecen dicha acumulación. En este caso, las plantas cosechadas tenían una edad aproximada de 1.5 años, un estadio juvenil en el que probablemente los mecanismos de reserva de carbohidratos aún no se han desarrollado plenamente. Por tanto, es plausible que el efecto de los SRFs sobre el contenido de TSS no sea evidente en esta etapa temprana del desarrollo, ya que la planta podría priorizar el uso de los nutrientes disponibles en procesos relacionados con el crecimiento estructural, más que en el almacenamiento de fotoasimilados en el tallo.

El N cumple una función fundamental en las plantas al participar en la síntesis de clorofila, proteínas estructurales y enzimáticas, así como en la formación de compuestos clave como las fitohormonas. No obstante, se ha documentado que las plantas presentan una eficiencia limitada en la absorción y utilización del N aplicado (Tiong *et al.*, 2021). En el presente estudio, se observó que las plantas de agave fertilizadas con Multicote presentaron el mayor contenido foliar de N en forma de N-NO₃⁻, lo cual se relaciona directamente con el mayor porcentaje de este nutriente en la formulación del fertilizante. Multicote contiene un 18 % de N, en comparación con el 15 % presente en Osmocote Plus®. Estos resultados coinciden con los reportados por Aguilera-Rodríguez *et al.* (2016), quienes evaluaron el efecto de los fertilizantes Basacote, Multicote y Osmocote en *Pinus montezumae* Lamb. bajo condiciones de vivero, y encontraron que los tratamientos con Multicote generaron las concentraciones más elevadas de N en el follaje. Estos hallazgos respaldan la relación directa entre el contenido de N en el fertilizante y su acumulación en los tejidos foliares de las plantas.

Aunque la propagación vegetativa de los agaves para fines agrícolas en México se realiza comúnmente mediante bulbillos o rizomas (Infante *et al.*, 2003), el principal mecanismo reproductivo en la naturaleza es la producción de semillas. Sin embargo, en sus hábitats nativos, las tasas de establecimiento exitoso de propágulos de agave son muy bajas (Arizaga & Ezcurra 2002; Gonzáles-Iturbe *et al.*, 2002). Este es probablemente un factor clave que contribuye al marcado descenso de las poblaciones naturales de agaves silvestres como el arroqueño, ya que son cosechadas continuamente para la producción de mezcal. En términos de manejo de plantaciones, particularmente con respecto a la nutrición, los productores generalmente no fertilizan sus plantas

de agave, y en raras ocasiones aplican fertilizantes sintéticos convencionales justo antes de la temporada de lluvias, a menudo sin asesoría científica o técnica. Esto sin duda afecta la productividad por unidad de superficie, el contenido de azúcares del tallo o piña, la duración del ciclo de cultivo y, en consecuencia, la competitividad de la cadena productiva.

Aunque el agave posee la capacidad de desarrollarse en suelos someros, pedregosos y de baja fertilidad, para fines de cultivo comercial es recomendable optimizar la fertilidad del suelo y la nutrición vegetal, con el objetivo de obtener piñas de mayor tamaño y con un mayor contenido de azúcares (Bravo *et al.*, 2007). En este contexto, los resultados obtenidos en el presente estudio aportan evidencia sobre una estrategia de fertilización potencialmente viable y ambientalmente sustentable, orientada a mejorar el crecimiento y la calidad nutricional del agave arroqueño.

Conclusiones

La aplicación de Osmocote Plus® promovió un mayor desarrollo en variables morfológicas clave, mientras que Multicote Agri® fue más eficiente en incrementar la concentración foliar de nitrógeno en forma de NO_3^- . Estas diferencias funcionales entre ambos fertilizantes sugieren que su uso puede ser optimizado de manera estratégica, en función de los objetivos específicos de producción. Sin embargo, considerando el prolongado ciclo de vida de los agaves, el cual puede oscilar entre 5 y 20 años, dependiendo del sistema de manejo y las condiciones agroambientales, es fundamental desarrollar estudios de seguimiento a largo plazo. Estos permitirán validar y optimizar la respuesta agronómica de agave arroqueño al uso de fertilizantes de liberación lenta, y así establecer recomendaciones técnicas más precisas para su aplicación en sistemas de cultivo sustentables.

Contribución de los autores

Desarrollo de la metodología, C.C.R. Conceptualización del trabajo, adquisición de fondos, desarrollo de la metodología, escritura y preparación del manuscrito, A.B.C. Desarrollo de la metodología, análisis de resultados y edición del manuscrito, S.S.M. Revisión y edición del manuscrito, R.S.G. Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada por el Instituto Politécnico Nacional a través del proyecto Fertilizantes de liberación lenta en especies silvestres del género *Agave* con registro SIP 20210608 y SIP 20220752.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés

Referencias

- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Martínez-Trinidad, T., & Ordaz-Chaparro, V. M. (2016). Producción de *Pinus pseudostrobus* Lindl. con sustratos de aserrín y fertilizantes de liberación controlada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(34), 7-19. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i34.79>

- Arellano-Plaza, M., Paez-Lerma, J. B., Soto-Cruz, N. O., Kirchmayr, M. R., & Gschaedler-Mathis, A. (2022). Mezcal Production in Mexico: Between Tradition and Commercial Exploitation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 832532. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.832532>
- Arizaga, S., & Ezcurra, E. (2002). Propagation mechanisms in *Agave macroacantha* (Agavaceae), a tropical arid-land succulent rosette. *American Journal of Botany*, 89, 632–641. <https://doi.org/10.3732/ajb.89.4.632>
- Arrizon, J., Morel, S., Gschaedler, A., & Monsan, P. (2010). Comparison of the Water-Soluble Carbohydrate Composition and Fructan structures of *Agave Tequilana* Plants of Different Ages. *Food Chemistry*, 122, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.028>
- Bautista-Cruz, M. A., & Martínez-Gallegos, V. (2020). Promoción del crecimiento de *Agave potatorum* Zucc. por bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre. *Terra Latinoamericana*, 38, 555–567. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.647>
- Bravo, M. E., Espinosa, P. H., & López, L. P. (2007). Tecnología para la producción de maguey mezcalero en Oaxaca. INIFAP. Libro técnico No. 7 160p.
- Castillejos-Reyes, C., Bautista-Cruz, A., Sánchez-Mendoza, S., & Quiñones-Aguilar, E. E. (2023). Response of agave coyote (*Agave* spp.) to the application of slow-release fertilizers under field conditions. *Revista Biociencias*, 10, e1431. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1431>
- Colunga-GarcíaMarín, P., Torres-García, I., Casas, A., Figueredo-Urbina, C., Rangel-Landa, S., Lemus, A., Vargas-Ponce, O., Cabrera-Toledo, D., Zizumbo-Villarreal, D., Aguirre-Dugua, X., Eguarte, L. E., & Carrillo-Galván, G. (2017). Los agaves y las prácticas mesoamericanas de aprovechamiento, manejo y domesticación 1. pp. 273–308. https://www.researchgate.net/publication/316883938_Los_agaves_y_las_practicas_mesoamericanas_de_aprovechamiento_manejo_y_domesticacion_1
- Cruz-Vasconcelos, S. T., Ruíz-Posadas, L. M., García-Moya, E., Sandoval-Villa, M., & Cruz Huerta, N. (2020). Crecimiento y tasa de intercambio de CO₂ de maguey pulquero (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) obtenido por semilla. *Agrociencia*, 54, 911–926. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v54i7.2242>
- Eguarte, L. E., Jiménez-Barrón, O. A., Aguirre-Planter, E., Scheinvar, E., Gámez, N., Gasca-Pineda, J., Castellanos-Morales, G., Moreno-Letelier, A., & Souza, V. (2021). Evolutionary ecology of Agave: distribution patterns, phylogeny, and coevolution (an homage to Howard S. Gentry). *American Journal of Botany*, 108, 216–235. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1609>
- Enríquez del Valle, J. R., Alcara-Vázquez, S. E., Rodríguez-Ortiz, G., Miguel-Luna, M. E., & Manuel-Vázquez, C. (2016). Fertiliriego en vivero a plantas de *Agave potatorum* Zucc micropropagadas-aclimatizadas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 1167–1177. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000501167
- García-Martínez, L. I., Sánchez-Mendoza, S., & Bautista-Cruz, A. (2020). Combinación de hongos micorrízicos y fertilización fosforada en el crecimiento de dos agaves silvestres. *Terra Latinoamericana*, 38, 771–780. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.702>
- García-Mendoza, A. J. (2011). Tres especies nuevas de Manfreda (Agavaceae) del sur de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82, 747–757. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.3.731>
- García-Mendoza, A. J., Cházaro-Basañez, M. I., Nieto-Sotelo, J., Sánchez-Teyer, L. F., Tapia-Campos, E., Gómez-Leyva, J. F., Tamayo-Ordóñez, M., Narváez-Zapata, J. A., Rodríguez-Garay, B., Palomino-Hasbach, G. A. (2017). Agave. In *Panorama Del Aprovechamiento de Los Agaves En México*. (CONACYT-CIATEJ) pp. 15–68. https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5f63c47b9b739.pdf

- Gentry, H. S. (1982). *Agaves of Continental North America*. Tucson. The University of Arizona Press.
<https://doi.org/10.2307/j.ctv1t4m2h4>
- González-Iturbe, J. A., Olmsted, I., & Tun-Dzul, F. (2002). Tropical dry forest recovery after long term Henequen (sisal, *Agave fourcroydes* Lem.) plantation in northern Yucatan, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 167(1-3), 67–82.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00689-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00689-2)
- Guertal, E. A. (2009). Slow-release Nitrogen Fertilizers in Vegetable Production: A Review. *HortTechnology*, 19(1), 16–19.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.19.1.16>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2025). Sistema de Consultas, México en cifras, San Jacinto Chilateca, Ocotlán de Morelos, Oaxaca. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=200680007>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (1997). *El Agave Tequilero en el Estado de Jalisco*.
https://books.google.com.mx/books/about/El_agave_tequilero_en_el_estado_de_Jalis.html?id=4IOWDgAAQBAJ&redir_esc=y
- Infante, D., González, G., Peraza-Echeverría, L., & Keb-Llanes, M. (2003). Asexual genetic variability in *Agave fourcroydes*. *Plant Science*, 164(2), 223–230. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00404-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00404-1)
- Li, J. Y. L., Hua, Q. X., Tan, J. F., Zhou, J. M., & Hou, Y. L. (2005). Mineral coated fertilizer effect on nitrogen-use efficiency and yield of wheat. *Pedosphere*, 15(4), 526–531.
https://www.researchgate.net/publication/299209722_Mineral_coated_fertilizer_effect_on_nitrogen-use_efficiency_and_yield_of_wheat
- 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(4), 387–393.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000400004
- Mellado-Mojica, E., López-Medina, T. L., & López, M. G. (2009). Developmental Variation in *Agave Tequilana* Weber Var. Azul Stem Carbohydrates. *Dynamic Biochemistry, Process. Biotechnology and Molecular Biology*, 3(1), 34.
[http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOonline/images/0906/DBPBMB_3\(SI1\)/DBPBMB_3\(SI1\)34-39o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOonline/images/0906/DBPBMB_3(SI1)/DBPBMB_3(SI1)34-39o.pdf)
- Motamedi, E., Safari, M., & Salimi, M. (2023). Improvement of tomato yield and quality using slow release NPK fertilizers prepared by carnauba wax emulsion, starch-based latex and hydrogel nanocomposite combination. *Scientific Reports*, 13, 11118.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-38445-7>
- Nobel, P. S., Castañeda, M., North, G., Pimienta-Barrios, E., & Ruiz, A. (1998). Temperature influences on leaf CO₂ exchange, cell viability and cultivation range for *Agave tequilana*. *Journal of Arid Environmental*, 39(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1006/jare.1998.0374>
- Pimienta-Barrios, E., Robles-Murguía, C., Nobel, P. S. (2001). Net CO₂ Uptake for *Agave tequilana* in a warm and a temperate environment. *Biotropica* 33(2), 312–318. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2001.tb00181.x>
- Rashid, M., Hussain, Q., Khan, K. S., Alwabel, M. I., Hayat, R., Akmal, M., Ijaz, S. S., Alvi, S., & Obaid-ur-Rehman, S. (2021). Carbon-Based Slow-Release Fertilizers for Efficient Nutrient Management: Synthesis, Applications, and Future Research Needs. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 1144–1169. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00429-9>
- Rendón-Salcido, L. A., Colunga-GarcíaMarín, P., Barahona-Pérez, L. F., Pimienta-Barrios, E., Magdub-Méndez, A., & Larqué-Saavedra, A. (2009). Sugars and alcohol byproducts from henequén (*Agave fourcroydes*) as influenced by plant age and

- climate. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32, 39–44. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802009000100005
- Sánchez-Mendoza, S., & Bautista-Cruz, A. (2022). Efecto de fertilizantes de liberación lenta y fitohormonas en el crecimiento de *Agave angustifolia* Haw. *Entreciencias*, 10(24), 1-11. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.82738>
- Sánchez-Mendoza, S., Bautista-Cruz, A., Robles, C., & Rodríguez-Mendoza, M. N. (2020). Irrigation and slow-release fertilizers promote the nutrition and growth of *Agave angustifolia* Haw. *Journal of Plant Nutrition*, 43(5), 699-708. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1701025>
- SAS Institute. (2004). *SAS 9.1 SQL Procedure User's Guide*. Cary, NC, USA.
- Tiong, J., Sharma, N., Sampath, R., MacKenzie, N., Watanabe, S., Metot, C., Lu, Z., Skinner, W., Lu, Y., Kridl, J., Baumann, U., Heuer, S., Kaiser, B., & Okamoto, M. (2021). Improving nitrogen use efficiency through overexpression of alanine aminotransferase in rice, wheat, and barley. *Frontiers in Plant Science*, 12, 628521. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.628521>
- Torres, I., Casas, A., Vega, E., Martínez-Ramos, M., & Delgado-Lemus, A. (2015). Population Dynamics and Sustainable Management of Mescal Agaves in Central Mexico: *Agave potatorum* in the Tehuacán-Cuicatlán Valley. *Economic Botany*, 69, 26–41. <https://doi.org/10.1007/s12231-014-9295-2>
- Trejo, L., Luz-Velázquez, M. L., Vallejo, M., & Montoya, A. (2022). Differentiating knowledge of Agave landraces, uses and management in Nanacamilpa, Tlaxcala. *Journal of Ethnobiology*, 42(1), 31-50. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-42.1.31>
- Wang, C., Lv, J., Xie, J., Yu, J., Li, J., Zhang, J., Tang, C., Niu, T., & Patience, B. E. (2021). Effect of slow-release fertilizer on soil fertility and growth and quality of wintering Chinese chives (*Allium tuberosum* Rottler ex Spreng.) in greenhouses. *Scientific Reports*, 11, 8070. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87593-1>
- Yamamoto, C. F., Pereira, E. I., Mattoso, L. H. C., Matsunaka, T., & Ribeiro, C. (2016). Slow-release fertilizer based on urea/urea-formaldehyde polymer nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, 287, 390-397. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.023>
- Zúñiga-Estrada, L., Rosales, E. R., Yáñez-Morales, M. J., & Jacques-Hernández, C. (2018). Características de una planta MAC, *Agave tequilana* desarrollada con fertigación en Tamaulipas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9, 553-564. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.1214>