

Respuesta de agave coyote (*Agave spp.*) a la aplicación de fertilizantes de liberación lenta en condiciones de campo.

Response of agave coyote (*Agave spp.*) to the application of slow-release fertilizers under field conditions.

Castillejos-Reyes, C.¹ , Bautista-Cruz, A.^{2*} , Sánchez-Mendoza, S.³ ,
Quiñones-Aguilar, E. E.⁴ 

¹ Egresado del Programa de Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Hornos 1003, Xoxocotlan, 71230, Oaxaca, México

² Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Hornos 1003, Xoxocotlan, 71230, Oaxaca, México

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

⁴ Laboratorio de Fitopatología de Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. Camino Arenero 1227, El Bajío del Arenal, C.P. 45019, Zapopan, Jalisco, México



Please cite this article as/Como citar este artículo: 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 Bio Ciencias*, 10 e1431.

<https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1431>

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: October 24th 2022.

Accepted/Aceptado: February 25th 2023.

Available on line/Publicado: March 14th 2023.

RESUMEN

Agave coyote (*Agave spp.*) es una especie silvestre utilizada por su gran potencial para la elaboración de mezcal en Oaxaca, México. En este estudio se evaluó la respuesta en el crecimiento, nutrición y contenido de sólidos solubles totales (TSS, azúcares) de agave coyote a la aplicación de fertilizantes de liberación lenta (SRFs) en condiciones de campo. Bajo un diseño de bloques completamente al azar se evaluaron tres tratamientos: control (sin fertilización), Osmocote plus® (15-09-12) y Multicote Agri® (18-06-12). Cada tratamiento incluyó 20 plantas y cuatro repeticiones, el número de plantas por tratamiento en cada repetición fue igual a 5. Después de 10 meses se midió altura de planta (PH); número de hojas desplegadas (UL); circunferencia de tallo; volumen radicular; densidad radicular; peso fresco de hojas (FLW), tallo (FSW) y raíz (FRW); peso seco de hojas (DLW), tallo (DSW) y raíz (DRW); TSS y contenido foliar de Ca²⁺, Na⁺, NO₃⁻ y K⁺. Con respecto a las plantas control, la PH incrementó 21.2 %, UL 28.4 %, FLW 77.0 %, FSW 62.8 %, DLW 177.0 %, DSW 53.1 % y DRW 39.1 % con la aplicación de Osmocote. Multicote aumentó 15.3 % la PH, así como el contenido foliar de K⁺ en 25.6 %, el de NO₃⁻ en 26.2 % y el de Na⁺ en 29.8 %. En condiciones de campo, la aplicación de SRFs promovió el crecimiento y la nutrición de agave coyote, pero no el contenido de TSS.

PALABRAS CLAVE: Agave silvestre, Crecimiento vegetal, Multicote, Nutrición vegetal, Osmocote.

*Corresponding Author:

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

ABSTRACT

The agave coyote (*Agave* spp.) is a wild species used for its great potential for mezcal production in Oaxaca, Mexico. The present study aimed to evaluate the growth, nutritional and total soluble solids (TSS, sugars) response of agave coyote to slow-release fertilizers (SRFs) application under field conditions. Three treatments: control (no fertilization), Osmocote plus® (15-09-12), and Multicote Agri® (18-06-12) were evaluated in a completely randomized block design. Each treatment included 20 plants and four replicates, with the number of plants per treatment in each replicate equal to 5. After 10 months, plant height (PH), number of unfolded leaves (UL), stem circumference, root volume, root density, fresh leaf weight (FLW), fresh stem weight (FSW), fresh roots weight (FRW), dry leaves weight (DLW), dry stem weight (DSW), dry root weight (DRW), TSS and leaf contents of Ca²⁺, Na⁺, NO₃⁻ and K⁺ were measured. Compared to the control plants, Osmocote increased PH by 21.2 %, UL by 28.4 %, FLW by 77.0 %, FSW by 62.8 %, DLW by 177.0 %, DSW by 53.1 % and DRW by 39.1 %. Multicote increased PH by 15.3 % and leaf content of K⁺ by 25.6 %, NO₃⁻ by 26.2 %, and Na⁺ by 29.8 %. Under field conditions, applying SRFs promoted growth and nutrition but not TSS.

KEY WORDS: *Agave silvestre*, Crecimiento vegetal, Multicote, Nutrición vegetal, Osmocote.

Introducción

En el continente americano existen 211 especies de *Agave* spp., de las cuales 75 % están distribuidas en México, con 57 % de especies endémicas, principalmente en dos subgéneros: *Agave* y *Litsea* (García-Mendoza *et al.*, 2019). Las familias Cactaceae y Agavaceae constituyen uno de los recursos naturales más importantes con fuertes implicaciones socioeconómicas y socioculturales para México (Cortés-Zárraga & Basurto-Peña, 2021; Gutiérrez-Rojas *et al.*, 2022). Se han reportado 22 categorías de uso para los agaves, también conocidos como magueyes (Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2017), entre estos usos está la obtención de alimento, bebidas, biocombustibles, fibras duras extraídas de las hojas (ixtle), abono, construcción de viviendas y elaboración de implementos agrícolas, entre otros (Aguilar *et al.*, 2014). De acuerdo con García-Moya *et al.* (2010) las plantas de agave también pueden ser buenas fijadoras de carbono.

En el estado de Oaxaca, México se utilizan alrededor de nueve especies de agave principalmente para la elaboración de bebidas alcohólicas basadas en la destilación como el mezcal, de las cuales *Agave angustifolia* Haw., coloquialmente conocido como “agave espadín”, es la de mayor demanda y la única que se cultiva de forma significativa en suelos semiáridos (Bautista-Cruz & Martínez-Gallegos, 2020). Las otras ocho especies de agave, entre ellos el agave convencionalmente conocido como “coyote” (*Agave* spp.) son colectadas de poblaciones

silvestres o semi-cultivadas principalmente en cercos vivos con poco o nulo manejo agronómico (Bautista-Cruz & Martínez-Gallegos, 2020). De acuerdo con Palma *et al.* (2016), en el año 2014 la cantidad de plantas de agave coyote en el estado de Oaxaca fue de solo 153, una cantidad muy baja en comparación con las 26,172,984 plantas de agave espadín cultivadas en ese mismo año. Aun cuando agave coyote no es una especie ampliamente cultivada, presenta un gran potencial para la producción de mezcal, al respecto Martínez-Jiménez *et al.* (2019) señalaron que de 10.6 kg del tallo o “piña” se puede obtener 1 litro de mezcal, rendimiento similar al obtenido con agave espadín (9.16 kg de “piña” rinden 1 litro de mezcal) y superior a lo encontrado en *A. potatorum*, comúnmente conocido como maguey tobalá o maguey papalomé (16.57 kg de “piña” rinden 1 litro de mezcal). Además, agave coyote es más precoz (5.33 años a madurez) comparado con agave espadín (7.0 años a madurez) y maguey tobalá (6.33 años a madurez).

La producción de bebidas como el mezcal, tequila, pulque y miel de agave implica la cosecha de plantas de agave maduras y en estados reproductivos (con inflorescencias formadas), lo que ocasiona la pérdida total del polen y de semillas (Arrazola-Cárdenas *et al.*, 2020). Esta extracción constante de agaves reproductivos lleva a la reducción de sus poblaciones modificando la distribución genética (Sebbenn *et al.*, 2008).

Generalmente los suelos donde se desarrollan especies del género *Agave*, son pobres en materia orgánica, N y P (Bautista-Cruz *et al.*, 2007), en estas condiciones, mejorar los rendimientos actuales en los sistemas de producción agrícola a pesar de los efectos del cambio climático, es un gran desafío (Zúñiga-Estrada *et al.*, 2018). No obstante, estudios previos han revelado efectos positivos de la fertilización en el crecimiento de los agaves (Enríquez del Valle *et al.*, 2018; García-Martínez *et al.*, 2020; Sánchez-Mendoza *et al.*, 2020; Zúñiga-Estrada *et al.*, 2018).

Los fertilizantes de liberación lenta (SRFs) pueden constituir una alternativa viable para la nutrición vegetal, éstos ofrecen una disponibilidad nutrimental para la planta en un periodo más prolongado, lo que promueve una mayor eficiencia de aprovechamiento generando con esto un menor impacto negativo al ambiente y a la salud humana (Kiplangat *et al.*, 2019). La principal desventaja de los SRFs es su elevado costo (Vásquez-Cisneros *et al.*, 2018), sin embargo, estos productos tienen el potencial de incrementar la eficiencia en la fertilización (Soti *et al.*, 2015), además se requiere un menor número de aplicaciones al cultivo (Aguilera-Rodríguez *et al.*, 2016), lo que genera un ahorro de tiempo y mano de obra.

Por todo lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo evaluar la respuesta en el crecimiento, nutrición y contenido de sólidos solubles totales en agave coyote a la aplicación de SRFs en condiciones de campo.

Material y Métodos

El experimento se estableció bajo condiciones de temporal en San Jacinto Chilateca (16°50'28"N, 96°41'03"O), Ocotlán de Morelos, Oaxaca, México a una altitud promedio de 1,533 masl y un clima semicálido, templado subhúmedo (Secretaría de Desarrollo Social, 2021).

Algunas de las propiedades físicas y químicas del suelo donde se estableció el experimento se incluyen en la Tabla 1.

Se obtuvieron hijuelos rizomatosos de agave coyote de 7 a 8 meses de edad a partir de plantas madre de 3 años de edad; estos hijuelos tenían una altura promedio de 33.5 cm, visualmente se examinó que no presentaran evidencia de lesiones, pudrición o ataque por insectos. A los hijuelos se les cortó la raíz para generar un nuevo sistema radicular que favoreciera su desarrollo al momento del trasplante en campo. Posteriormente, se desinfectaron mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 0.624 % durante 5 min (Sánchez-Mendoza *et al.*, 2020).

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del suelo donde se estableció el experimento.

| Propiedades del suelo | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| Densidad aparente | 1.23 g cm ⁻³ |
| Materia orgánica | 2.4 % |
| pH 1:2 | 8.39 |
| Conductividad eléctrica (CE 1:2) | 0.31 dS m ⁻¹ |
| N-NO ₃ ⁻ | 4.85 mg kg ⁻¹ |
| Fósforo disponible | 24.5 mg kg ⁻¹ |
| Bases intercambiables | |
| Ca ²⁺ | 6354 cmol (+) kg ⁻¹ |
| Mg ²⁺ | 241 cmol (+) kg ⁻¹ |
| Na ⁺ | 24.5 cmol (+) kg ⁻¹ |
| K ⁺ | 264 cmol (+) kg ⁻¹ |
| Micronutrientes | |
| Cu | 0.81 mg kg ⁻¹ |
| Mn | 1.65 mg kg ⁻¹ |
| Fe | 2.82 mg kg ⁻¹ |
| Zn | 0.15 mg kg ⁻¹ |
| B | 0.45 mg kg ⁻¹ |

El trasplante se realizó el 22 de octubre de 2020, la distancia entre plantas fue de 1.5 m y entre hileras de 3 m, obteniendo una densidad de siembra de 2 178 plantas ha⁻¹ (Figura 1). La fertilización se realizó dos meses después del trasplante. Los SRFs empleados fueron 1) Osmocote plus® (15-09-12) marca eVeRRIS ILC Fertilizer Company, Dublin, OH, Estados Unidos (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) marca Haifa Chemicals Ltd.-Haifa, Israel (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 SRFs alrededor de cada planta a una profundidad de 5 cm y a 5 cm del tallo. El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completamente al

azar. Se evaluaron tres tratamientos con cuatro repeticiones, en cada tratamiento se incluyeron 20 plantas (el número de plantas por tratamiento en cada repetición fue igual a 5). Los tratamientos evaluados fueron T1) control (sin fertilización), T2) Osmocote plus® y T3) Multicote Agri®. El periodo de evaluación fue de 10 meses.

Al término del experimento a todas las plantas por tratamiento se les determinó altura de planta (PH) con ayuda de una cinta métrica y número de hojas desplegadas (UL) a través de conteo visual. Se cosecharon al azar la mitad de las plantas en cada uno de los tratamientos, esto es, 10 plantas. A estas plantas se les determinó circunferencia de tallo (SC) con una cinta métrica, volumen radicular (RV) en una probeta de 1000 ml con un volumen conocido de agua se introdujeron las raíces y se midió el volumen de agua desplazado; densidad radicular (RD) por medio de la relación masa-volumen; peso fresco de hojas (FLW), tallo (FSW) y raíz (FRW); peso seco de hojas (DLW), tallo (DSW) y raíz (DRW), para ello el material vegetal se deshidrató en un secador solar hasta peso constante. El contenido de azúcares (sólidos solubles totales en tallo, TSS) se determinó con un refractómetro portátil RHB-32 ATC. Para la cuantificación del contenido foliar de Ca^{2+} , Na^+ , NO_3^- y K^+ se utilizó una muestra compuesta por la savia de la porción media de todas las hojas de la planta. Finalmente, en esta muestra compuesta los elementos se determinaron con un medidor de iones LAQUAtwin. Durante el tiempo que duró el experimento se determinó in situ el porcentaje de humedad y temperatura del suelo en la rizósfera de las plantas de agave. Para ello se empleó un medidor digital marca Nennimber Gmb. La temperatura promedio del suelo fue de 31 °C y la humedad promedio del suelo fue de 61.1 %



Figura 1. Plantas de agave en la parcela experimental al inicio (izquierda) y al final del estudio (derecha).

Análisis estadístico

Los datos para PH y UL se sometieron a un análisis de normalidad mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, el análisis de normalidad para el resto de las variables se hizo con la prueba de Shapiro-Wilk. Las variables que no cumplieron con los supuestos de normalidad se transformaron a $\log_{10}(x)$ o raíz cuadrada. La homogeneidad de varianza se verificó a través de la prueba de Bartlett. Posteriormente se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias por el método de Duncan ($p \leq 0.05$). En todos los procedimientos estadísticos se utilizó el software SAS v. 9.1 (SAS Institute, 2004).

Resultados y Discusión

De las 16 variables evaluadas, 10 respondieron significativamente a la aplicación de SRFs. Con respecto a las plantas control, la aplicación de Osmocote incrementó 21.2 % la PH, 28.4 % el UL, 77.0 % el FLW, 62.8 % el FSW, 177.0 % el DLW, 53.1 % el DSW, 39.1 % el DRW y 29.8 % el contenido foliar de Na^+ (Tablas 2, 3 y 4). La fertilización con Multicote también aumentó 15.3 % la PH (Tabla 2), así como el contenido foliar de K^+ en 25.6 %, el de NO_3^- en 26.2 % y el de Na^+ en 29.8 % (Tabla 4). Variables como SC, RV, FRW (Tablas 2 y 3) y contenido de TSS en el tallo de las plantas de agave (Tabla 2) no respondieron significativamente a la aplicación de Osmocote ni de Multicote. En cambio, la RD y el contenido foliar de Ca^{2+} fueron afectados negativamente por los SRFs (Tablas 2 y 4), ya que su valor fue más alto en las plantas control.

Tabla 2. Valor medio \pm error estándar de las variables de crecimiento y contenido de sólidos solubles totales (TSS) en el tallo de plantas de agave coyote (*Agave spp.*) como respuesta a la aplicación de fertilizantes de liberación lenta en condiciones de campo.

| Tratamientos | UL | PH | SC | RV | RD | TSS |
|-----------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|
| | | ----- cm ----- | ----- cm ----- | cm ³ | g cm ⁻³ | °Brix |
| Control | 21.50 \pm 1.0b | 50.44 \pm 2.0b | 40.47 \pm 2.9a | 40.00 \pm 5.7a | 2.15 \pm 0.2a | 8.40 \pm 0.8a |
| Osmocote plus® | 27.60 \pm 1.1a | 61.15 \pm 2.4a | 47.98 \pm 1.1a | 54.00 \pm 3.0a | 1.47 \pm 0.1b | 10.30 \pm 0.7a |
| Multicote agri® | 24.20 \pm 1.5ab | 58.16 \pm 2.3a | 45.77 \pm 6.5a | 50.00 \pm 8.9a | 1.61 \pm 0.1b | 9.90 \pm 0.7a |

UL: 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 ($p \leq 0.05$).

La promoción en el crecimiento de las plantas de agave coyote con Osmocote se puede deber a que este fertilizante tiene un periodo de liberación más corto (5-6 meses) comparado con el Multicote (8 meses). Es probable que al incrementar el contenido de estos nutrientes en el suelo en un periodo menos prolongado mediante la adición de Osmocote, las plantas pudieron eficientizar sus procesos metabólicos, lo que se tradujo en un mayor crecimiento.

Tabla 3. Valor medio \pm error estándar de variables de acumulación de biomasa en plantas de agave coyote (*Agave spp.*) como respuesta a la aplicación de fertilizantes de liberación lenta en condiciones de campo.

| Tratamientos | FLW | FSW | FRW | DLW | DSW | DRW |
|-----------------|----------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| | ----- g ----- | | | | | |
| Control | 2606.6 \pm 637.7b | 1110.10 \pm 213.9b | 76.69 \pm 7.8a | 476.70 \pm 110.6b | 271.99 \pm 68.1b | 28.14 \pm 4.5b |
| Osmocote plus® | 4613.7 \pm 445.1a | 1807.70 \pm 122.4a | 80.05 \pm 8.0a | 1320.50 \pm 143.6a | 416.36 \pm 37.9a | 39.14 \pm 3.4a |
| Multicote agri® | 3654.9 \pm 788.6ab | 1358.50 \pm 321.9ab | 74.01 \pm 10.8a | 1040.90 \pm 208.1a | 286.96 \pm 51.3ab | 36.92 \pm 4.3ab |

FLW: peso fresco de hojas; FSW: peso fresco de tallos; FRW: peso fresco de raíces; DLW: peso seco de hojas; DSW: peso seco de tallos; DRW: peso seco de raíces. Valores medios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$).

Tabla 4. Valor medio \pm error estándar del contenido foliar nutrimental en plantas de agave coyote (*Agave spp.*) como respuesta a la aplicación de fertilizantes de liberación lenta en condiciones de campo.

| Tratamientos | Ca ²⁺ | K ⁺ | NO ₃ ⁻ | Na ⁺ |
|-----------------|---------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------|
| | ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | |
| Control | 476.00 \pm 35.4a | 2730.00 \pm 109.5b | 309.00 \pm 12.2b | 26.20 \pm 1.1b |
| Osmocote plus® | 391.00 \pm 18.5b | 2730.00 \pm 86.9b | 268.00 \pm 9.7b | 34.00 \pm 1.2a |
| Multicote agri® | 293.00 \pm 21.6c | 3430.00 \pm 26.5a | 388.00 \pm 17.5a | 33.70 \pm 0.8a |

Valores medios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$).

Dado que el estudio se realizó en condiciones de temporal, es importante considerar la humedad y la temperatura del suelo que pudiera condicionar la eficiencia de los SRFs y la respuesta biológica de la planta. Durante el tiempo que duró el experimento, la temperatura promedio del suelo fue de 31 °C y la humedad promedio del suelo fue de 61.1 %. En este sentido, lo ideal sería que un SRF liberara una cantidad de nutrientes acorde con la demanda de las plantas, incluso cuando las condiciones ambientales fluctuaran. Desafortunadamente, ningún SRF cumple con esto ya que la liberación de nutrientes se ve afectada por la temperatura más que por cualquier otro factor extrínseco. Sin embargo, no hay un consenso en la literatura del efecto de la temperatura en la tasa de liberación de nutrientes de los SRFs (Adams *et al.*, 2013). De acuerdo con Adams *et al.* (2013) los nutrientes de los SRFs más afectados por la temperatura fueron N, K, B, Cu y Zn, mientras que los menos afectados fueron P, Mg y Fe. Estos autores también reportaron que los nutrientes de Osmocote se liberan más rápido de lo especificado tanto a altas como a bajas temperaturas. Lo anterior sugiere que las plantas de agave hubieran podido tener una mayor disponibilidad nutrimental cuando se fertilizaron con Osmocote que con Multicote, lo que promovió su crecimiento.

Ransom *et al.* (2020) indicaron que la humedad del suelo no parece ser un factor limitante para la liberación de nutrientes cuando los gránulos de SRF están en contacto directo con el suelo, como ocurrió en este estudio, donde el SRF se colocó a 5 cm de profundidad. En cambio, Du *et al.* (2006) concluyeron que la liberación de nutrientes por Multicote en agua pura era más rápida que la liberación en arena saturada y significativamente más rápida que en arena a capacidad de campo. Sin embargo, no existe una base teórica para estas diferencias, puesto que los autores no abordaron los posibles efectos químicos de la arena en sus mediciones.

De acuerdo con Ransom *et al.* (2020) los periodos de liberación de los nutrientes de los SRFs estimados por el fabricante rara vez coinciden con los periodos de liberación en condiciones de campo. Puesto que, en laboratorio, los gránulos de SRF se colocan en un matraz que se agita periódicamente durante el ensayo a una temperatura constante. Sin embargo, estas condiciones distan mucho de las que se experimentan en el campo.

Los estudios que evalúan el efecto de SRFs en plantas del género *Agave* son escasos. Sánchez-Mendoza *et al.* (2020) no encontraron diferencias significativas para PH y UL con respecto al control en plantas de agave espadín en condiciones de campo 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). Aunque estos mismos autores reportaron incrementos en la longitud radicular, FLW, FSW y diámetro de tallo en plantas de agave espadín fertilizadas con el SRF Multigro 6[®], con excepción de lo obtenido para las variables longitud radicular y diámetro de tallo, estos resultados son coincidentes con lo reportado en este trabajo. Sánchez-Mendoza & Bautista-Cruz (2022) evaluaron el efecto de los SRFs Osmocote plus[®] y Basacote plus[®] en el crecimiento y contenido de azúcares en el tallo de plantas de agave espadín en condiciones de vivero y encontraron que ambos SRFs promovieron el crecimiento de este agave. No obstante, el incremento más alto en la mayoría de las variables de crecimiento se obtuvo con Osmocote plus[®]. Con respecto a las plantas control, el Osmocote plus[®] incrementó 10.1 % el UL, 10.4 % la PH, 10.2 % el diámetro de tallo, 28.4 % el FLW y 33.1 % el FSW. Basacote plus[®] incrementó 6.4 % la PH, 5.8 % el diámetro de tallo, 16.1 % el FSW y 42.1 % el FRW. Estos autores tampoco encontraron un aumento en el

TSS con la adición de SRFs. Resultados que son coincidentes con lo reportado en este estudio donde las variables de crecimiento evaluadas también respondieron positivamente a la aplicación de Osmocote.

Aguilera-Rodríguez *et al.* (2016) evaluaron el efecto de la aplicación individual y combinada de 8 g L⁻¹ de los SRFs Multicote® (18-6-12, uno con un periodo de liberación de 8 meses y otro con un periodo de liberación de 4 meses) y Osmocote plus® (15-9-12, con un periodo de liberación de 8 a 9 meses y 5 a 6 meses) mezclados con dos sustratos: 1) aserrín de pino (60%), corteza compostada de pino (15 %), turba (15 %) y vermiculita (10 %) y; 2) aserrín de pino (70 %), corteza compostada de pino (15 %), turba (15 %) y vermiculita (10 %). Los autores observaron que los sustratos con aserrín de pino combinados con Multicote® u Osmocote plus® con un periodo de liberación de 8 a 9 meses fueron adecuados para incrementar PH, diámetro de tallo, peso seco aéreo y DRW en plantas de *Pinus pseudostrabus*. Este estudio también concuerda con la respuesta positiva de las variables de crecimiento a la aplicación de Osmocote.

Reyes-Castro *et al.* (2020) evaluaron el efecto de la aplicación del fertilizante triple 17 (17N-17P-17K) en dosis de 3.3 (baja), 6.6 (media) y 10 kg m⁻³ (alta), y del fertilizante Osmocote® (15N-9P-12K), en dosis de 10 (baja), 20 (media) y 30 kg m³ (alta) en el crecimiento de plantas de jagua (*Genipa americana* L.) durante la etapa de vivero. Similarmente con los resultados de este trabajo, estos autores obtuvieron la mayor PH, diámetro de cuello, longitud radicular y biomasa aérea y radicular con la aplicación de Osmocote® en las tres dosis evaluadas.

Investigaciones previas han reportado que algunos agaves también han respondido positivamente a la fertilización convencional. Por ejemplo, similarmente a lo obtenido en este estudio, Cruz-Vasconcelos *et al.* (2020) encontraron que con relación a las plantas control, la PH incrementó 51.1 % en plantas de *A. salmiana* que recibieron fertilización convencional mediante la aplicación de triple 17 (17-17-17), urea (46-00-00) y Yara Star (21-17-3). En cambio, Martínez-Ramírez *et al.* (2013) también reportaron que el UL incrementó 15.5 % en maguey tobalá y 18.9 % en agave espadín con dosis altas (90-60-45 kg ha⁻¹) y medias (60-40-30 kg ha⁻¹) de fertilización convencional (superfosfato triple, sulfato de potasio y sulfato de amonio).

García-Martínez *et al.* (2020) encontraron que la adición de 43.5 mg kg⁻¹ de P incrementó 13.2 % la PH, 34.9 % el FLW, 36.1 % el FSW y 21.5 % el diámetro de tallo en plantas de maguey tobalá. Estos mismos autores indicaron que en agave coyote la dosis de 29.0 mg kg⁻¹ de P aumentó 16.4 % la PH y 44.4 % el FSW. Estos resultados coinciden con los obtenidos en este estudio.

Por su parte, Sánchez-Mendoza *et al.* (2020) al igual que en este trabajo, tampoco encontraron un efecto significativo de los SRFs en el contenido de TSS del tallo o “piña” de agave espadín. Zúñiga-Estrada *et al.* (2018) reportaron que plantas de *A. tequilana* que recibieron una fertilización de base (162-150-250 kg ha⁻¹ de N, P y K) + fertirrigación (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 mostraron un aumento en el contenido de TSS. Posiblemente no se registró un aumento en el contenido de TSS en las plantas de agave coyote con la aplicación de SRFs debido a que cada especie de agave responde de manera diferente a la fertilización, dependiendo de sus características fenotípicas y genotípicas, así como de sus requerimientos nutricionales acorde con sus etapas fenológicas.

El N es un macronutriente esencial y uno de los constituyentes más importantes de moléculas como aminoácidos, proteínas, clorofila y ácidos nucleicos necesarios en la nutrición de las plantas de agave. Las formas asimilables de nitrógeno para la planta son el NO_3^- y el NH_4^+ ; la deficiencia de este elemento nutritivo se manifiesta con clorosis inicial en las hojas más viejas y, progresivamente hacia las más jóvenes (Miguel-Zarate *et al.*, 2021). En la planta de agave se ha observado que cuando el suministro de N es limitado, el crecimiento disminuye y su follaje empieza a tomar un color verde, en lugar del azul característico (Zúñiga-Estrada, 2013). Además de macronutrientes como N y K, los SRFs evaluados contienen P, S, Mg y diferentes micronutrientes, los cuales, en conjunto, posiblemente favorecieron el crecimiento de las plantas de agave. Adicionalmente, los SRFs pueden ralentizar la conversión del N en amonio, reducir la tasa de liberación de N de los fertilizantes, sincronizar el suministro de N con la demanda de N de la planta y mantener un suministro sostenido y estable de nutrientes durante la temporada de crecimiento de los cultivos, mejorando así la capacidad de síntesis de materia seca de la planta (Tian *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020). La materia seca es la acumulación de sustancias fotosintéticas y nutrientes absorbidos en las plantas, lo cual afecta directamente el rendimiento del cultivo (Wang *et al.*, 2021).

El mayor contenido de N foliar en forma de N-NO_3^- se presentó en las plantas de agave fertilizadas con Multicote, lo cual está acorde con el contenido porcentual de este nutriente en el SRF, ya que Multicote tienen una mayor cantidad de N (18 %) que Osmocote (15 %). Estos hallazgos son coincidentes con lo reportado por Aguilera-Rodríguez *et al.* (2016), quienes evaluaron la aplicación de Basacote, Multicote y Osmocote en plantas de *Pinus montezumae* Lamb. bajo condiciones de vivero y encontraron que la mayor concentración de N en el follaje se presentó en los tratamientos con Multicote.

El K^+ fue el nutriente que presentó el contenido más alto en las hojas de las plantas de agave coyote. Al respecto, Zúñiga-Estrada (2013) reportó que la tasa de extracción de K^+ fue de 11.9 g mes^{-1} en plantas de *A. tequilana* después de 41 meses de desarrollo. En cambio, la máxima extracción mensual de N fue de 5.9 g luego de 53 meses de desarrollo de la planta de agave. Estos datos parecen indicar que las plantas de agave extraen del suelo más K^+ que N. Los nutrientes acumulados en las hojas de las plantas de agave son importantes porque se pueden reciclar en el suelo y estar disponibles para las nuevas plantaciones, ya que generalmente durante la jima (cosecha de las piñas de agave), las hojas del agave se depositan y se dejan en el terreno para iniciar el proceso de degradación microbiana del material vegetal y reintegrar paulatinamente los nutrientes al suelo.

Conclusiones

En condiciones de campo, la aplicación de SRFs promovió el crecimiento y la nutrición de agave coyote, pero no el contenido de TSS. El SRF Osmocote plus® incrementó el FLW, DLW, FSW, DSW y DRW. La fertilización con Multicote Agri® incrementó la PH, el contenido foliar de K^+ , NO_3^- y Na^+ . No obstante, al ser los agaves plantas con un ciclo de cultivo largo, aproximadamente entre 5 o 7 años, dependiendo de las condiciones del sistema de producción, es necesario realizar

un mayor número de evaluaciones para verificar la respuesta de agave coyote a la aplicación de SRFs en condiciones de campo.

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, escritura y preparación del manuscrito, S.S.M. Revisión y edición del manuscrito, E.E.Q.A. 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.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Lic. Violeta Monserrat Silva el apoyo brindado para poder establecer el experimento en sus terrenos. A la M. en C. Jessie Hernández Canseco por su ayuda en algunas determinaciones de laboratorio. A la Dra. Lilia Méndez Lagunas por permitirnos usar su secador solar para la deshidratación de las plantas de agave.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Adams, C., Frantz, J., & Bugbee, B. (2013). Macro-and micronutrient-release characteristics of three polymer-coated fertilizers: Theory and measurements. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176 (1), 76-88. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200156>
- Aguilar, J.B., Enríquez del Valle, J.R., Rodríguez-Ortiz, G., Granados, D.S., & Martínez, C.B. (2014). El estado actual de *Agave salmiana* y *A. mapisaga* del Valle de México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 1(2), 106-120. <https://rmae.voaxaca.tecnm.mx/wp-content/uploads/2020/11/RMAE-2014-11-Agave.pdf>
- 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>
- 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>
- 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-Cruz, A., Carrillo-González, R., Arnaud-Viñas, M. R., Robles, C., & de León-González, F. (2007). Soil fertility properties on *Agave angustifolia* Haw. plantations. *Soil and Tillage Research*, 96 (1-2), 342-349. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.08.001>
- Colunga-GarcíaMarín, P., Torres-García, I., Casas, A., Figueredo-Urbina, C.J., Rangel-Landa, S., Delgado-Lemus, A., Vargas, O., Cabrera-Toledo, D., Zizumbo-Villarreal, D., Aguirre-Dugua, X., Eguiarte, L.E., & Carrillo-Galván, G. (2017). Los agaves y las prácticas mesoamericanas de aprovechamiento, manejo y domesticación. In Casas, A., Torres-Guevara, J., & Parra-Rondinel, F. Domesticación en el continente americano: investigación para el manejo sustentable de recursos genéticos en el Nuevo Mundo. Vol. 2. (pp. 273-308). Ed. Universidad Nacional Autónoma de México. https://iies.unam.mx/wp-content/uploads/2017/08/DOMESTICACION_VOL.-2-COMPLETO_digital-2.pdf
- Cortés-Zárraga, L., & Basurto-Peña, F. (2021). *Agave salmiana* Otto ex Salm. Grupo Etnobotánico Latinoamericano (GELA). Jardín Botánico, Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.ibiologia.unam.mx/gela/pp-1.html>
- 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>
- Du, C., Zhou, J., & Shaviv, A. (2006). Release characteristics of nutrients from polymer-coated compound-controlled release fertilizers. *Journal of Polymers and the Environment*, 14, 223-230 <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0025-4>
- 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. https://rmae.voaxaca.tecnm.mx/wp-content/uploads/2020/11/4-2018_RMAE-28-Agave-RESUMEN.pdf
- 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 (4), 771-780. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.702>
- García-Mendoza, A. J., Franco-Martínez, I. S., & Sandoval-Gutiérrez, D. (2019). Cuatro especies nuevas de Agave (Asparagaceae, Agavoideae) del sur de México. *Acta Botánica Mexicana*, 126, e1461. <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1461>
- García-Moya, E., Romero-Manzanares, A., & Nobel, P.S. (2010). Highlights for Agave productivity. *Global Change Biology Bioenergy*, 3, 4-14. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01078.x>
- Gutiérrez-Rojas, M., Ruiz-Juárez, D., Vela-Correa, G., Olivares-Orozco, J. L., & Rueda-Puente, E. O. (2022). Physical-chemical quality of xoconostle fruits (*Opuntia matudae* and *O. joconostle*) in the Valle del Mezquital, Hidalgo, Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 24, 96-110. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v24i.505>
- Kiplangat, R., Karuku, G. N., Mbui, D., Njomo, N., & Michira, I. (2019). Evaluating the effects of formulated nano-NPK slow release fertilizer composite on the performance and yield of maize, kale and capsicum. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(1), 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2019.05.010>

- Martínez-Jiménez, R., Ruiz-Vega, J., Caballero-Caballero, M., Silva-Rivera, M. E., & Montes-Bernabé, J. L. (2019). Agaves silvestres y cultivados empleados en la elaboración de mezcal en Sola de Vega, Oaxaca, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22, 477-485. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2750/1264>
- 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/pdf/rfm/v36n4/v36n4a4.pdf>
- Miguel-Zarate, N., Ayala-Garay, O. J., Sánchez-del Castillo, F., & Magdaleno-Villar, J. J. (2021). The use of plant growth retardants in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(3), 157-169. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2021.01.003>
- Palma, F., Pérez, P., & Meza, V. (2016). Diagnóstico de la cadena de valor mezcal en las regiones de Oaxaca. <https://1library.co/document/zwvp9nml-diagn%C3%B3stico-cadena-valor-mezcal-regiones-oaxaca.html>
- Ransom, C.J., Jolley, V.D., Blair, T.A., Sutton, L.E., & Hopkins, B.G. (2020). Nitrogen release rates from slow-and controlled-release fertilizers influenced by placement and temperature. *PLOS ONE* 15, (6). e0234544. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234544>
- Reyes-Castro, R., Arreola-Enríquez, J., Carrillo-Ávila, E., & Obrador-Olán, J.J. (2020). Evaluación de la fertilización convencional y de liberación controlada, sobre la calidad de plantas de jagua (*Genipa americana* L.) en vivero. *Agroproductividad*, 13 (5), 43-49. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1611>
- Sánchez-Mendoza, S., & Bautista-Cruz, A. (2022). Efecto de fertilizantes de liberación lenta y fitohormonas en el crecimiento de *Agave angustifolia* Haw. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 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.
- Sebbenn, A. M., Degen, B., Azevedo, V. C. R., Silva, M. B., de Lacerda, A. E. B., Ciampi, A. Y., Kanashiro, M., Carneiro, F. 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 Desarrollo Social. (2021). Unidades de microrregiones, cédulas de información municipal. <http://microrregiones.sedesol.gob.mx/zap/medioFisico.aspx?entra=zap&ent=20&mun=068>
- Soti, P., Fleurissaint, A., Reed, S., & Jayachandran, K. (2015). Effects of control release fertilizers on nutrient leaching, palm growth and production cost. *Agriculture*, 5(4), 1135-1145. <https://doi.org/10.3390/agriculture5041135>
- Tian, X., Li, C., Zhang, M., Li, T., Lu, Y., & Liu, L. (2018). Controlled release urea improved crop yields and mitigated nitrate leaching under cotton-garlic intercropping system in a 4-year field trial. *Soil and Tillage Research*, 175, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.015>
- Vásquez-Cisneros, I., Prieto-Ruíz, J. A., López-López, M. A., Wehenkel, C., Domínguez-Calleros, P. A., & Muñoz-Sáez, F. E. (2018). Crecimiento y supervivencia de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *greggii* bajo diferentes tratamientos de fertilización. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(2), 251-264. <https://doi.org/10.29292/revista.chapingo.v24n2.251-264>

[org/10.5154/r.rchscfa.2017.05.036](https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.05.036)

- 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 tuberm* Rottler ex Spreng.) in greenhouses. *Scientific Reports*, 11, 8070. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87593-1>
- Zhang, K., Wang, Z., Xu, Q., Liu, B., & Wang, L. (2020). Effect of controlled-release urea fertilizers for oilseed rape (*Brassica napus* L.) on soil carbon storage and CO₂ emission. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 31983-31994. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09440-6>
- Zúñiga-Estrada, L. (2013). Nutrición de *Agave tequilana* y manejo de los fertilizantes en un sistema de producción intensiva (riego por goteo). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Tamaulipas, México. <https://es.scribd.com/document/358802151/Zuniga-2013-Nutricion-de-Agave-tequilana-y-manejo-de-los-fertilizantes-en-un-sistema-de-produccion-intensiva-riego-por-goteo-pdf>
- 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>