



ESTIMULACIÓN DEL DESARROLLO DE HIJUELOS DE RIZOMA DE *Agave salmiana* MEDIANTE LABORES CULTURALES Y ÁCIDO INDOL-3-BUTÍRICO

STIMULATION OF DEVELOPMENT OF RHIZOME OFFSHOOTS OF *Agave salmiana* THROUGH CULTURAL PRACTICES AND INDOLE-3-BUTYRIC ACID

Sonia Teresa Cruz-Vasconcelos¹, Carlos Ramírez-Herrera^{1*}, Nicacio Cruz-Huerta², Armando Gómez-Guerrero¹ y Valentín José Reyes-Hernández¹

¹Colegio de Postgraduados (CP), Campus Montecillo, Posgrado en Ciencias Forestales, Montecillo, Estado de México, México. ²CP, Campus Montecillo, Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Fisiología Vegetal, Montecillo, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (kmcramcolpos@gmail.com)

RESUMEN

Agave salmiana Otto ex Salm-Dyck se reproduce sexualmente por semillas y asexualmente por bulbilos aéreos e hijuelos del rizoma; sin embargo, esta especie es monocárpica, y el número de hijuelos es reducido. Por lo anterior, se propuso como objetivo evaluar el número, altura y diámetro de roseta de hijuelos del rizoma de plantas de *A. salmiana* que se sometieron a diferentes tratamientos. En el año 2021 se seleccionaron al azar 240 plantas de *A. salmiana* de una plantación en Temascalapa, Estado de México, México, y se aplicaron ocho tratamientos: testigo, AIB (ácido indol-3-butírico), cajeteo, aporque, cajeteo-aporque, cajeteo-AIB, aporque-AIB y aporque-cajeteo-AIB, con 30 repeticiones en un diseño completamente al azar. Entre julio y noviembre de 2021 se registró mensualmente el número de hijuelos, y se hizo el último registro en mayo 2022. Se midieron la supervivencia, altura y diámetro de roseta de los hijuelos en noviembre de 2022 (17 meses después de aplicar los tratamientos). Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para el número de hijuelos, altura y diámetro de roseta. El número promedio de hijuelos por planta fue 2.4 con 99 % de supervivencia y los valores promedios de altura y diámetro de roseta fueron 14.5 y 15.9 cm, respectivamente. Las plantas testigo desarrollaron 1.4 hijuelos en promedio, mientras que las plantas en el cajeteo-AIB produjeron 3.7 hijuelos. La altura de hijuelos osciló entre 13.2 cm en el tratamiento de cajeteo y 16.0 cm en el de cajeteo-AIB. El diámetro de roseta varió entre 14.3 cm en el testigo y 18.3 cm en el tratamiento de cajeteo-AIB. Las labores culturales en combinación con AIB incrementaron el número de hijuelos del rizoma e influyeron positivamente en la altura y diámetro de roseta.

Palabras clave: *Agave salmiana*, aporque, auxinas, cajeteo, hijuelos.

SUMMARY

Agave salmiana Otto ex Salm-Dyck is sexually reproduced by seeds and asexually by aerial bulbils and offshoots from the rhizomes; however, this species is monocarpic, and the number of offshoots is small. Therefore, this research aimed to evaluate the number, height and diameter of rosette of offshoots from the rhizome of *A. salmiana* plants exposed to different treatments. In 2021, 240 plants of *A. salmiana* were randomly selected from a plantation in Temascalapa, State of Mexico, Mexico, and eight treatments were applied: control, IBA (indole-3-butyric acid), watering basin, hilling, watering basin-hilling, watering basin-IBA, hilling-IBA and hilling-watering basin-IBA, with 30 replications in a completely randomized design. Between July and November 2021 the number of offshoots was recorded monthly, and the last record was made in May 2022. Survival, height and rosette diameter of the offshoots were measured in November 2022 (17 months after the treatments

were applied). Significant differences were found between treatments for the number of offshoots, height and rosette diameter. The average number of offshoots per plant was 2.4 with 99 % of survival, and the average values of height and rosette diameter were 14.5 and 15.9 cm, respectively. The plants in the control group developed 1.4 offshoots on average, while the plants in the watering basin-IBA produced 3.7 offshoots. The height of offshoots ranged between 13.2 cm in the watering basin treatment and 16.0 cm in the watering basin-IBA. The rosette diameter varied between 14.3 cm in the control group and 18.3 cm in the watering basin-IBA treatment. Cultural practices in combination with IBA increased the number of offshoots from the rhizome and positively influenced the height and diameter of the rosette.

Index words: *Agave salmiana*, auxins, hilling, offshoots, watering basin.

INTRODUCCIÓN

Agave salmiana Otto ex Salm-Dyck es una planta perenne que alcanza su etapa reproductiva sexual entre los 12 y 20 años (Álvarez-Duarte *et al.*, 2018). Esta especie es importante para la producción de pulque, miel, fibra, pencas y mixiote (García, 2007); además, es una especie que se usa como cerco vivo, en el bordo aguas abajo de las plantaciones en terraza, favoreciendo la infiltración de agua y previniendo la erosión por arrastre del suelo por los escurrimientos hídricos (Nobel, 2011), y también es empleada en sistemas agroforestales en asociación con cultivos anuales (Narváez *et al.*, 2020).

Las plantas del género *Agave* emiten una inflorescencia al final de su ciclo de vida, por lo que se clasifican como plantas monocárpicas (Nobel, 2011) y son polinizadas por murciélagos nectarívoros, favoreciendo la diversidad genética (Trejo-Salazar *et al.*, 2015). Este tipo de reproducción es una limitante para la obtención de progenie a corto plazo (García, 2007); sin embargo, el maguey también se propaga asexualmente a través de la generación de bulbilos aéreos e hijuelos en el rizoma (Gentry, 1982). Los rizomas son tallos subterráneos modificados que crecen de forma perpendicular en relación con la fuerza

de la gravedad (Troiani *et al.*, 2017). El número de hijuelos obtenidos en esta forma es reducido, en promedio de tres a ocho durante la vida del maguey (Nieto *et al.*, 2016). Por lo anterior, es necesario buscar alternativas para incrementar el número de hijuelos mediante esta forma de propagación, y conveniente cuando se tienen plantas seleccionadas por características sobresalientes, que resultan de establecer ensayos clonales en programas de mejoramiento genético, con el fin de aumentar la producción y calidad del aguamiel.

En los procesos fisiológicos y bioquímicos de división celular, el crecimiento y la diferenciación de los órganos intervienen hormonas vegetales como las auxinas, giberelinas, citocininas y poliaminas (Alcántara *et al.*, 2019; Porta y Jiménez-Nopala, 2019). Las auxinas en su forma de ácido indol-3-acético (AIA), participan en los procesos de desarrollo y diferenciación celular de las plantas (Sauer *et al.*, 2013; Teale *et al.*, 2006). Este ácido orgánico débil se forma con una estructura de anillo de indol plana acoplada a una cadena lateral de carbono con un grupo carboxilo al final, el cual disminuye la polaridad del AIA, facilitando la difusión a través de las membranas (Ljung, 2013). Las auxinas modulan el gravitropismo en la punta de la raíz y la morfogénesis del cabello radicular en la zona de diferenciación (Tu *et al.*, 2021). En cultivos de agave *in vitro*, se ha demostrado que las auxinas ácido naftalenacético (ANA) y el ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) son importantes para la inducción de callo embriogénico (Ángeles-Espino *et al.*, 2018).

Aunado al uso de hormonas vegetales, las labores culturales como el aporque y el cajeteo pueden favorecer la emergencia de hijuelos al propiciar condiciones microambientales favorables (Porta y Jiménez-Nopala, 2019). El aporque consiste en aflojar y acercar el suelo de la periferia de una planta formando un montículo, el cual proporciona soporte, humedad, temperatura y aireación para el desarrollo de rizomas (Pimentel, 2007). El cajeteo consiste en remover el suelo de la base de la planta a la periferia formando un bordo en una circunferencia (Pimentel, 2007); esta labor se realiza en condiciones de baja pluviosidad para la captación de agua de lluvia (León *et al.*, 2004; Pimentel, 2007). Ambas actividades, además, mejoran las condiciones estructurales del suelo para el desarrollo óptimo del sistema radical (Porta y Jiménez-Nopala, 2019); sin embargo, en el maguey, el cajeteo y aporque no son actividades comunes en el manejo del cultivo. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el número, altura y diámetro de roseta de hijuelos del rizoma de plantas de *A. salmiana* sometidas a diferentes tratamientos. Se plantea la hipótesis que las labores culturales combinadas con aplicación de auxina aumentan el número y crecimiento de hijuelos de rizoma en *A. salmiana* por la exposición de las raíces a la luz y

activación de las hormonas de crecimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La presente investigación se realizó en una plantación de *A. salmiana* en San Bartolomé Actopan, municipio de Temascalapa, Estado de México, en las coordenadas 99° 42' 03" longitud O y 19° 43' 35" latitud N, a una altitud de 2400 msnm. El clima es Bs_k kw (w) seco, con precipitación entre 500 y 700 mm (INEGI, 2009), de los cuales 444 mm ocurren en la temporada de crecimiento entre abril y septiembre. La temperatura media anual es de 15 °C, con temperatura mínima media en el mes más frío de 1.9 °C y temperatura máxima media en el mes más cálido de 26.7 °C (Rehfeldt, 2006).

Establecimiento del experimento

Las plantas de *A. salmiana* de 1.5 años de edad se obtuvieron del vivero Naucalli, propiedad de la Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE) en Naucalpan, Estado de México. En agosto de 2016 las plantas se establecieron en campo en una superficie de 1.0 ha con una densidad de 832 plantas ha⁻¹ (Cruz-Vasconcelos *et al.*, 2020). En junio de 2021, cuando las plantas tuvieron seis años, se seleccionaron 240 de éstas, y entonces en un experimento bajo un diseño completamente aleatorizado se sometieron a alguno de ocho tratamientos: 1) testigo, 2) aplicación de ácido-3-indolbutírico (AIB), 3) cajeteo, 4) aporque, 5) cajeteo-aporque, 6) cajeteo-AIB, 7) aporque-AIB, y 8) aporque-cajeteo-AIB. Se incluyeron 30 plantas por tratamiento, y se consideró una planta como la unidad mínima experimental.

El aporque consistió en aflojar el suelo a una profundidad de 20 cm y 50 cm de radio en la periferia de la planta, el suelo removido se acercó a la base de la planta formando un montículo (Pimentel, 2007), mientras que el cajeteo se realizó removiendo el suelo de la base de la planta a la periferia formando un bordo en una circunferencia con un radio de 50 cm (Pimentel, 2007). En los tratamientos en que se realizó alguna o ambas labores culturales, en algunas plantas se aplicaron 4 g de Radix 10000® en polvo, que contiene 10,000 ppm de ingrediente activo (auxina AIB), por lo que se aplicaron 40 mg de AIB, que es la auxina de mayor eficacia para la formación de raíces (Woodward y Bartel, 2005). Se espolvoreó la auxina alrededor de las plantas en un radio de 50 cm sin labores culturales y quedó sobre la superficie. También se aplicaron auxinas después del cajeteo y aporque en la zona de remoción del suelo.

Variables registradas

Se contó el número de hijuelos de rizoma que emergían en la zona de aplicación de tratamientos (50 cm de radio alrededor de la planta) cada mes entre julio y noviembre del mismo año; posteriormente, se realizó una evaluación adicional en mayo de 2022 para comprobar si los tratamientos tenían efecto después de la temporada de sequía. En noviembre de 2022; es decir, 17 meses después de la aplicación de tratamientos, se midieron supervivencia (%), altura y diámetro de roseta (cm) de los hijuelos de maguey. El diámetro de la roseta fue el promedio de los diámetros en dirección norte-sur y este-oeste (Figura 1).

Análisis estadístico

Los datos de número de hijuelos y supervivencia no cumplieron con los supuestos de normalidad con base en la prueba de Shapiro-Wilk, por lo que se analizaron con el procedimiento GLMMIX del paquete SAS versión 9.4 para Windows (SAS Institute, 2013) con la distribución tipo binomial negativa para número de hijuelos con el modelo siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde: Y_{ij} es la variable en el i -ésimo tratamiento, T_i es el i -ésimo tratamiento y ε_{ij} es el error experimental. Se utilizó la prueba de Tukey-Kramer ajustada para comparar las medias con el procedimiento LSMEANS del paquete SAS (SAS Institute, 2013).

Los datos de las variables altura y diámetro de roseta no cumplieron con los supuestos de normalidad, por lo que se analizaron con la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con el procedimiento npar1way de SAS versión 9.4 para Windows (SAS Institute, 2013); posteriormente, se aplicó la prueba de comparación múltiple Dwass, Steel, Critchlow-Flinner (DSCF) para comparar por pares los tratamientos.

RESULTADOS

Los análisis de varianza mostraron que los tratamientos tuvieron diferencias ($P \leq 0.0001$) de efecto para el número de hijuelos en *A. salmiana*. Las plantas con el mayor número promedio de hijuelos a los 5 (3.1) y 11 meses (3.7) fueron en las que se realizó cajeteo-AIB, aporque-AIB, aporque-cajeteo- AIB, cajeteo-aporque y aporque (Cuadro 1), mientras que las plantas que desarrollaron el menor número de hijuelos (1.3) fueron las del grupo testigo y aquellas en que se aplicó AIB (1.4); sin embargo, el número de hijuelos se incrementó entre 142 y 164 % con respecto al testigo cuando se aplicó AIB en combinación con alguna labor cultural. La aplicación de ambas labores culturales con AIB tuvo el mismo efecto en el incremento del número de hijuelos (≈ 140 % con referencia al testigo) que el uso de alguna de ellas con la auxina; en cambio, cuando se aplicó alguna labor cultural, el aporque promovió en 100 % más el número de hijuelos y el cajeteo un 38 % más hijuelos, ambos respecto al testigo; empero, el uso simultáneo de ambas labores culturales tuvo el mismo efecto que el aporque.

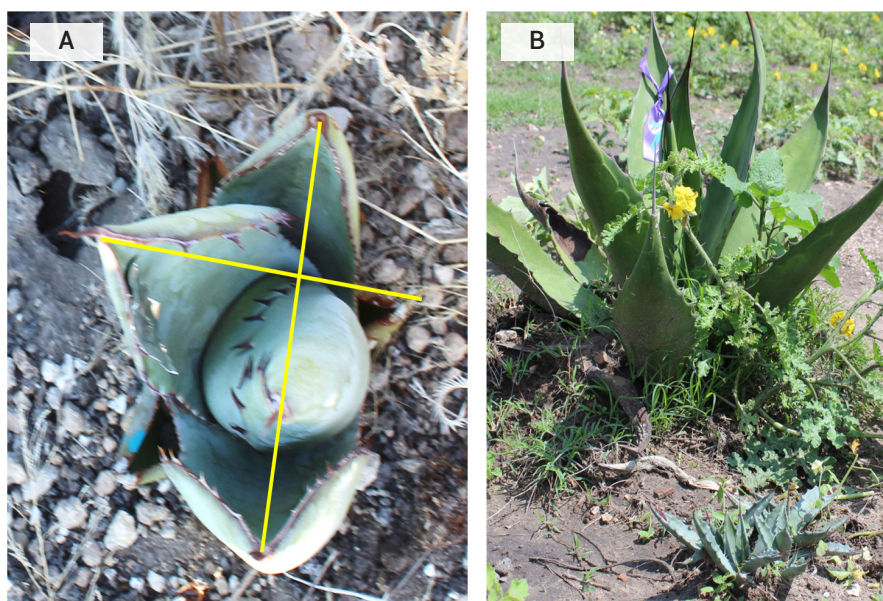


Figura 1. A) el diámetro de roseta en un hijuelo de rizoma se obtuvo promediando dos mediciones, de norte-sur y este-oeste, B) planta de siete años con hijuelos.

Las plantas de maguey emitieron el mayor número de hijuelos entre los meses de julio y octubre (Figura 1). En el mes de agosto produjeron el mayor número promedio, 0.7 hijuelos por planta. En los meses de julio, septiembre y octubre, el número promedio fue de 0.5 hijuelos por planta, mientras que en el mes de noviembre éste fue de 0.1 hijuelos por planta. La producción de hijuelos en el periodo de estiaje (diciembre del 2021 a mayo de 2022) fue muy baja, representó el 8 % del total de hijuelos emergidos en el periodo de evaluación (Cuadro 1, Figura 2).

No se encontraron diferencias significativas ($P < 0.99$) entre tratamientos para supervivencia de los hijuelos con base en el ANOVA. El 99 % de los hijuelos sobrevivió 17 meses después de establecer el experimento.

Se hallaron diferencias ($P \leq 0.0002$ y $P \leq 0.0001$) entre tratamientos para crecimiento en altura y diámetro de roseta, respectivamente, de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis. La altura y diámetro de roseta de los hijuelos que crecieron en los tratamientos de cajeteo-aporque, cajeteo-AIB y aporque-cajeteo-AIB tuvieron medias superiores, aunque sin diferencias estadísticas entre esos tratamientos. Los hijuelos que desarrollaron a partir de las plantas en los tratamientos con AIB y aporque también destacaron en altura (Cuadro 2). Los promedios de altura para los hijuelos que sobresalieron oscilan de 14.2 a 16.0 cm, y de 16.5 a 18.3 cm en diámetro de roseta. Los hijuelos que crecieron en las plantas sometidas a los tratamientos testigo, cajeteo y aporque-AIB fueron los menos favorecidos en las variables de crecimiento evaluadas.

DISCUSIÓN

El cajeteo y aporque en combinación con el IAB promovieron una mayor emisión de hijuelos. Este incremento en el número de hijuelos pudo ser debido a que el ácido indol-3-butírico promueve la división, elongación y diferenciación celular para la formación de raíces y rizomas (Garay-Arroyo *et al.*, 2014; Taiz y Zeiger, 2010), señalando que la raíz se forma a partir de células en tejidos de floema y cambium, y un rizoma es una rama que desarrolla a partir de la activación de una yema vegetativa ya presente en la axila de la hoja.

Las auxinas también modulan los procesos de desarrollo, gravitropismo y morfogénesis del pelo radicular (Taiz y Zeiger, 2010; Tu *et al.*, 2021). La aplicación de auxinas en forma de ácido naftalenacético (ANA) o 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) activa las células para la inducción de callo embriogénico y desarrollo de raíces en *A. tequilana* Weber en cultivo *in vitro* (Ángeles-Espino *et al.* 2018). También, se observó una respuesta positiva en la formación de callo con la aplicación de ANA y AIA (ácido indol-3-acético) en *A. angustifolia* Haw. en cultivo *in vitro* (Arzate-Fernández y Mejía-Franco, 2011), por lo que el AIB junto con el aporque y cajeteo tuvieron un papel importante en la producción de hijuelos de *A. salmiana* en la presente investigación. Aunque los resultados fueron satisfactorios, es recomendable continuar con más investigaciones en las que se experimente con diferentes reguladores de crecimiento (auxinas, giberelinas, citocininas y poliaminas) para promover la inducción de hijuelos en maguey, tal y como se ha observado en otras especies de plantas donde las hormonas aplicadas externamente interactúan con los niveles hormonales endógenos de la planta (Alcántara *et al.*, 2019).

Cuadro 1. Número promedio de hijuelos de rizoma en plantas de *A. salmiana* expuestas a diferentes tratamientos.

Tratamientos	Meses después de la aplicación de tratamientos	
	5	11
Testigo	1.3 d	1.4 c
AIB†	1.4 dc	1.6 bc
Cajeteo	1.8 bcd	1.9 bc
Aporque	2.6 abc	2.7 ab
Cajeteo-aporque	2.6 ab	2.8 ab
Cajeteo-AIB	3.3 a	3.7 a
Aporque-AIB	3.3 a	3.4 a
Aporque-cajeteo-AIB	3.2 ab	3.4 a

†AIB: ácido indol-3-butírico. En cada columna, medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$).

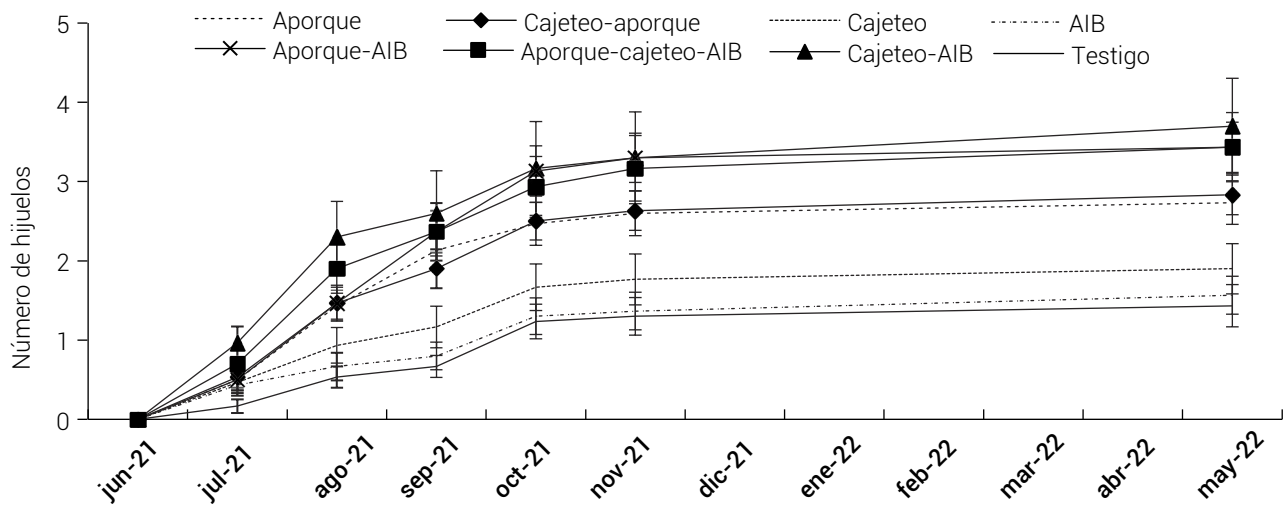


Figura 2. Número promedio de hijuelos por planta en *A. salmiana* durante el período de evaluación de diferentes tratamientos.

Cuadro 2. Altura y diámetro de roseta promedio de hijuelos de plantas de *Agave salmiana* después de 17 meses de aplicación de tratamientos.

Tratamientos	Altura (cm)	Diámetro de roseta (cm)
Testigo	13.4 b	14.3 c
AIB	14.2 ab	14.8 c
Cajeteo	13.2 b	14.7 c
Aporque	14.6 ab	15.9 bc
Cajeteo-aporque	15.3 ab	16.5 abc
Cajeteo-AIB	16.0 a	18.3 a
Aporque-AIB	13.4 b	15.1 bc
Aporque-cajeteo-AIB	16.0 a	17.6 abc

En cada columna, medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Prueba DSCF, $P \leq 0.05$).

En el maguey, así como en otras plantas, los balances hormonales activan la expresión de genes específicos que promueven la emergencia de hijuelos como una forma de propagación de las especies (Abraham-Juárez *et al.*, 2010; Jang *et al.*, 2011). En la presente investigación, las plantas de *A. salmiana* produjeron hijuelos aun cuando no se aplicó tratamiento alguno, lo cual confirma la capacidad genética que tiene la especie para emitir hijuelos. Abraham-Juárez *et al.* (2010) encontraron que un cambio en el balance hormonal facilitó la expresión de cinco genes (*AtqKNOX1*, *AtqKNOX2*, *AtqUNK1*, *AtqUNK2* y *AtqGIsA*) que participaron en la formación de meristemos que desarrollaron bulbilos en *A. tequilana*. Genes implicados en el metabolismo secundario y hormonal promueven el desarrollo de rizomas en *Oryza sativa* L. y *Sorghum bicolor* (L.) Moench

por efecto de estímulos abióticos ambientales (Jang *et al.*, 2006). También, los genes *PpRSL1* y *PpRSL2*, regulados por auxinas, controlan el desarrollo de pelos radicales y rizoides en *Physcomitrella patens* (Hedw.) Bruch & Schimp. (Jang *et al.*, 2011; Rensing *et al.*, 2020). Las auxinas promueven el desarrollo del pelo radicular en *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh; sin embargo, se desconocen las interacciones reguladoras entre la auxina y los genes *PpRSL1* y *PpRSL2* (Jang *et al.*, 2011), aunque los mismos genes controlan el desarrollo de pelos radicales y rizoides, la regulación de esta red transcripcional por auxinas es diferente en estas dos especies (Jang *et al.*, 2011). Un número mayor de 50 genes activadores y represores transcripcionales están involucrados en la expresión génica en respuesta a la auxina (ARF) y Aux/IAA

en el género *Arabidopsis* (Vernoux *et al.*, 2011).

Los genes *CmPIN1*, *CmTIR3*, *CmTIR1*, *CmAXR1*, *CmAXR6*, *CmAXR2*, *CmIAA16* y *CmIAA12* regulan la producción de auxinas que promueven la formación de brotes en el género *Chrysanthemum* L. (Dierck, 2016); además, las auxinas promueven la iniciación de raíces adventicias en estacas o acodos aéreos (Garay-Arroyo *et al.*, 2014; Oliva, 2005). Las auxinas de fuentes exógenas deben penetrar en los elementos cribosos y alcanzar el parénquima vascular (Ljung *et al.*, 2002); las auxinas en forma de AIB sin la remoción de suelo y sin incisión en los rizomas en el presente estudio probablemente no pudieron ingresar al sistema, por lo que no provocaron efecto alguno en las plantas de maguey tratadas y por lo tanto no hubo diferencias en la emergencia de hijuelos entre las plantas testigo con respecto a las que sólo recibieron el AIB.

En la presente investigación las labores culturales de cajeteo y aporque mejoraron las condiciones microambientales, tales como humedad, temperatura y aireación alrededor de las plantas, que las estimularon para desarrollar superior número de hijuelos (Pumisacho y Velásquez, 2009; Troiani *et al.*, 2017). El aporque es una práctica de uso extendido para cubrir los estolones y crear un ambiente propicio para la tuberización en el cultivo de papa (Oyarzún *et al.*, 2002). Las labores culturales evaluadas en el presente trabajo ayudaron a exponer a la luz el rizoma del maguey, y en consecuencia, a promover la emergencia de hijuelos. La luz es necesaria para la formación de micro-rizomas en *Curcuma longa* L. (Nayac y Kumar, 2006). Se recomienda aplicar labores culturales en el manejo de plantaciones de maguey con base en los resultados obtenidos en la presente investigación.

No hubo efecto residual del AIB en la emergencia de hijuelos después de 11 meses de la aplicación de tratamientos en el presente estudio. Esto concuerda con el comportamiento de estacas de *Eucalyptus nitens* Deane & Maiden, donde las auxinas externas tuvieron un efecto positivo en la emisión de raíces en el corto plazo (Luckman y Menary, 2002). Las labores culturales promovieron la emergencia de hijuelos en maguey en la presente investigación debido a una mayor retención de humedad, aireación en el suelo y eliminación de malezas como se reporta en hortalizas (Silva, 2017), papa (Oyarzún *et al.*, 2002; Rodríguez *et al.*, 2020) y maíz (León *et al.*, 2004).

En la zona de estudio durante la década reciente, la precipitación promedio ha sido de 584 mm anuales (CONAGUA, 2017). La alta supervivencia de los hijuelos pudo deberse a que el maguey es una planta adaptada a condiciones limitantes de humedad, y tolera una disminución entre 80 y 90 % del contenido tisular de

agua (Nobel, 2011), y esta supervivencia de los hijuelos pudo ser consecuencia de que éstos aun se encuentran unidos a la planta madre en las etapas tempranas de su ciclo de vida (García, 2007). Diferentes especies del género *Agave* sobrevivieron por 14 meses en condiciones de humedad baja en el suelo (Ramírez-Tobías *et al.*, 2014). Estas características son útiles en la adaptación de *Agave salmiana* a los cambios ambientales provocados por el cambio climático global, donde la precipitación pluvial puede disminuir entre 5.6 y 7.8 % con respecto a la precipitación actual entre los años 2030 y 2090 (Sáenz-Romero *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

Las labores culturales en combinación con la aplicación de AIB al suelo estimularon que plantas de *A. salmiana* incrementasen el número de hijuelos de rizoma. Cajeteo-AIB, aporque-AIB, aporque-cajeteo-AIB, cajeteo-aporque y aporque promovieron el mayor número de hijuelos en plantas de *A. salmiana*. Las labores culturales y la aplicación de AIB aumentaron el crecimiento en altura y diámetro de roseta de los hijuelos de *A. salmiana*. Cajeteo-AIB, aporque-cajeteo-AIB, cajeteo-aporque, aporque y AIB promovieron el mayor crecimiento en altura de los hijuelos. Cajeteo-AIB, aporque-cajeteo-AIB y cajeteo-aporque fomentaron el mayor diámetro de roseta en hijuelos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca para realizar estudios de posgrado y al Colegio de Postgraduados por el financiamiento para realizar la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Abraham-Juárez M. J., A. Martínez-Hernández, M. A. Leyva-González, L. Herrera-Estrella and J. Simpson (2010) Class I *KNOX* genes are associated with organogenesis during bulbil formation in *Agave tequilana*. *Journal of Experimental Botany* 61:4055-4067, <https://doi.org/10.1093/jxb/erq215>
- Alcántara C. J. S., J. Acero G., J. D. Alcántara C. y R. M. Sánchez M. (2019) Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *NOVA* 17:109-129, <https://doi.org/10.25058/24629448.3639>
- Álvarez-Duarte M. C., E. García-Moya, J. Suárez-Espinosa, M. Luna-Cavazos y M. Rodríguez-Acosta (2018) Conocimiento tradicional, cultivo y aprovechamiento del maguey pulquero en los municipios de Puebla y Tlaxcala. *Polibotánica* 45:205-222.
- Ángeles-Espino A., L. Sánchez-Mendoza, H. E. Dimas-Estrada, D. Ramírez-Alvarado y J. F. Gómez-Leyva (2018) Evaluación de dos auxinas en la inducción de callo embriogénico en vitroplántulas de *Agave tequilana* Weber variedad Azul. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 21:225-234.
- Arzate-Fernández A. M. y R. Mejía-Franco (2011) Capacidad embriogénica de callos inducidos en ejes embrionarios cigóticos de *Agave angustifolia* Haw. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34:101-106, <https://doi.org/10.35196/rfm.2011.2.101>
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2017) Normales climatológicas

- por estado. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=mex> (Mayo 2023).
- Cruz-Vasconcelos S. T., L. M. Ruiz-Posadas, E. García-Moya, M. Sandoval-Villa y N. Cruz-Huerta (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>
- Dierckx R., E. De Keyser, J. De Riek, E. Dhooghe, J. Van Huylenbroeck, E. Prinsen and D. Van Der Straeten (2016) Change in auxin and cytokinin levels coincides with altered expression of branching genes during axillary bud outgrowth in chrysanthemum. *PLoS ONE* 11:e0161732, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161732>
- Garay-Arroyo A., M. P. Sánchez, B. García-Ponce, E. R. Álvarez-Builla y C. Gutiérrez (2014) La homeostasis de las auxinas y su importancia en el desarrollo de *Arabidopsis thaliana*. *REB. Revista de Educación Bioquímica* 33:13-22.
- García M. A. J. (2007) Los agaves de México. *Ciencias* 87:14-23.
- Gentry H. S. (1982) *Agaves of Continental North America*. The University of Arizona Press. Tucson, Arizona, USA. 670 p.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2009) Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Temascalapa, México. Clave Geoestadística 15084. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
- Jang C. S., T. L. Kamps, D. N. Skinner, S. R. Schulze, W. K. Vencill and A. H. Paterson (2006) Functional classification, genomic organization, putatively cis-acting regulatory elements, and relationship to quantitative trait loci, of sorghum genes with rhizome-enriched expression. *Plant Physiology* 142:1148-1159, <https://doi.org/10.1104/pp.106.082891>
- Jang G., K. Yi, N. D. Pires, B. Menand and L. Dolan (2011) RSL genes are sufficient for rhizoid system development in early diverging land plants. *Development* 138:2273-2281, <https://doi.org/10.1242/dev.060582>
- León N. P., L. Díaz V. y M. E. Cea M. (2004) Efecto del aporque en el rendimiento del cultivo del maíz. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 13:1-10.
- Ljung K. (2013) Auxin metabolism and homeostasis during plant development. *Development* 140:943-950, <https://doi.org/10.1242/dev.086363>
- Ljung K., A. K. Hull, M. Kowalczyk, A. Marchant, J. Celenza, J. D. Cohen and G. Sandberg (2002) Biosynthesis, conjugation, catabolism and homeostasis of indole-3-acetic acid in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Molecular Biology* 50:309-332, <https://doi.org/10.1023/A:1016024017872>
- Luckman G. A. and R. C. Menary (2002) Increased root initiation in cuttings of *Eucalyptus nitens* by delayed auxin application. *Plant Growth Regulation* 38:31-35, <https://doi.org/10.1023/A:1020926114165>
- Narváez S. A. U., A. Cruz L. y D. M. Sangerman-Jarquín (2020) Servicios ambientales: sistema agroforestal tradicional con plantas de maguey pulquero en la Altiplanicie, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11:1957-1969, <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.2750>
- Nayac S. and P. K. Naik (2006) Factors effecting *in vitro* microrhizome formation and growth in *Curcuma longa* L. and improved field performance of micropropagated plants. *Science Asia* 32:31-37, <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2006.32.031>
- Nieto A. R., J. Vargas M., J. C. Nieto A., A. Rodríguez O., V. M. Jiménez P., J. Hernández C. y M. Ortiz B. (2016) El cultivo de maguey pulquero (*Agave salmiana*) en el Valle del Mezquital. Universidad Politécnica de Francisco I. Madero. Francisco I. Madero, Hidalgo, México. 52 p.
- Nobel P. S. (2011) *Sabiduría del Desierto, Agaves y Cactus: CO₂, Agua, Cambio Climático*. 2a edición. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. 172 p.
- Oliva C. C. (2005) Efecto de los ácidos naftalenacético e indolbutírico en el enraizamiento de estacas de *Myrciaria dubia* (HBK) Mc Vaugh, Camu Camu. *Folia Amazónica* 14:27-33, <https://doi.org/10.24841/fa.v14i2.144>
- Oyarzún P., F. Chamorro, J. J. Córdova, F. Merino, F. Valverde y J. Velásquez (2002) Manejo agronómico. In: *El Cultivo de la Papa en Ecuador*. M. Pumisacho y S. Sherwood (eds.). INIAP. Quito, Ecuador. pp:51-83.
- Pimentel B. L. (2007) *Sistemas Manuales de Preparación del Terreno con Fines Forestales*. División de Ciencias forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 43 p.
- Porta H. y G. Jiménez-Nopala (2019) Papel de las hormonas vegetales en la regulación de la autofagia en plantas. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 22:1-11, <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.160>
- Pumisacho M. y J. Velásquez (2009) *Manual del Cultivo de Papa para Pequeños Productores*. Estación Experimental Santa Catalina, INIAP. Santa Catalina, Ecuador. 103 p.
- Ramírez-Tobías H. M., C. B. Peña-Valdivia y J. R. Aguirre (2014) Respuestas bioquímico-fisiológicas de especies de *Agave* a la restricción de humedad. *Botanical Sciences* 92:131-139, <https://doi.org/10.17129/botsci.156>
- Rehfeldt G. E. (2006) A spline model of climate for the Western United States. General Technical Report RMRS-GTR-165. Rocky Mountain Research Station, Forest Service, U. S. Department of Agriculture. Fort Collins, Colorado, USA, <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-165>
- Rensing S. A., B. Goffinet, R. Meyberg, W. Shu-Zon and M. Bezanilla (2020) The moss *Physcomitrium* (*Physcomitrella*) *patens*: a model organism for non-seed plants. *The Plant Cell* 32:1361-1376, <https://doi.org/10.1105/tpc.19.00828>
- Rodríguez S. G., R. E. Pinedo T. y F. Sulca S. (2020) Efecto del aporque en el rendimiento y la rentabilidad en cultivares nativos de papa. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 21:e1798, https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1798
- Sauer M., S. Robert and J. Kleine-Vehn (2013) Auxin: simply complicated. *Journal of Experimental Botany* 64:2565- 2577, <https://doi.org/10.1093/jxb/ert139>
- Sáenz-Romero C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu and B. A. Richardson (2010) Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102:595-623, <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>
- SAS Institute (2013) SAS/ACCESS® 9.4 Interface to ADABAS: Reference. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA.
- Silva V. M. 2017 *El Cultivo de las Hortalizas*. Manual para el Productor. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. La Paz, Bolivia. 28 p.
- Taiz L. and E. Zeiger (2010) *Plant Physiology*. 5th edition. Sinauer Associates Inc. Sunderland, Massachusetts, USA. 782 p.
- Teale W. D., I. A. Paponov and K. Palme (2006) Auxin in action: signalling, transport and the control of plant growth and development. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 7:847-859, <https://doi.org/10.1038/nrm2020>
- Trejo-Salazar R. E., E. Scheinvar y L. E. Eguarte (2015) ¿Quién poliniza realmente los agaves? Diversidad de visitantes florales en 3 especies de *Agave* (Agavoideae: Asparagaceae). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 86:358-369, <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.04.007>
- Troiani H. O., A. O. Prina, W. A. Muñio, M. A. Tamame y L. Beinticincio (2017) *Botánica, Morfología, Taxonomía y Fitogeografía*. Universidad Nacional de La Pampa. Santa Rosa, La Pampa, Argentina. 321 p.
- Tu T., S. Zheng, P. Ren, X. Meng, J. Zhao, Q. Chen and C. Li (2021) Coordinated cytokinin signaling and auxin biosynthesis mediates arsenate-induced root growth inhibition. *Plant Physiology* 185:1166-1181, <https://doi.org/10.1093/plphys/kiaa072>
- Vernoux T., G. Brunoud, E. Farcot, V. Morin, H. Van den Daele, J. Legrand, ... and J. Trass (2011) The auxin signalling network translates dynamic input into robust patterning at the shoot apex. *Molecular Systems Biology* 7:508, <https://doi.org/10.1038/msb.2011.39>
- Woodward A. W. and B. Bartel (2005) Auxin: regulation, action and interaction. *Annals of Botany* 95:707-735, <https://doi.org/10.1093/aob/mci083>

