

Crecimiento y asimilación de CO₂ de *Agave potatorum* Zucc. abastecidas a diferentes niveles nutrimentales

José Raymundo Enríquez-del Valle¹

Víctor A. González-Hernández²

Gerardo Rodríguez-Ortiz¹

Ariadna Ivon Bautista-Castellanos¹

Vicente Arturo Velasco-Velasco¹

Marcos Emilio Rodríguez-Vásquez^{1,§}

1 1 Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca, Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México.

2 2 Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco km 36.5, Texcoco, Estado de Mexico, Mexico.

Autor para correspondencia: marcos.rv@voaxaca.tecnm.mx.

Resumen

En el estado de Oaxaca, México, el *Agave potatorum* se colecta de poblaciones silvestres o se propaga mediante semillas en pequeñas extensiones y se utiliza para elaborar la bebida destilada mezcal. La especie se ha propagado in vitro y las plantas obtenidas se trasplantan a sustrato para su aclimatización durante 90 días y después se establecen en vivero durante 12 meses para alcanzar tamaño mayor, y al fertilizar las plantas se ha mejorado su crecimiento. El objetivo fue evaluar el área foliar y la tasa de asimilación de CO₂ de plantas micropropagadas-aclimatizadas fertilizadas con soluciones nutritivas California (Cal) o Steiner (St). Las plantas fertilizadas con Cal-5% y con Cal-100% presentaron 20.8 y 27.7 hojas, 1 031.5 cm² y 1 867.4 cm² de área foliar, la roseta de 37 y 52.3 cm de diámetro, 19.5 y 29.5 cm de altura. La apertura estomática y asimilación de CO₂ comenzó a las 16:00 h, al disminuir la radiación fotosintéticamente activa, alcanzando valores máximos de asimilación entre las 19:00 y 22:00 h. Las plantas fertilizadas con Cal-100% y con St-100 % mostraron valores de asimilación de CO₂, 17 y 11 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, respectivamente.

Palabras clave:

área foliar, fotosíntesis, plantas micropropagadas, solución nutritiva.



Introducción

Los agaves poseen características morfológicas y fisiológicas como son: raíces someras y ramificadas, cutícula gruesa, tejidos suculentos, estomas hundidos y fotosíntesis CAM, para fijar el CO_2 durante la noche y se acumula como ácido málico, por lo que usan el agua de manera más eficiente que las plantas C_3 y C_4 (Carrillo *et al.* , 2014) y están adaptadas a ambientes áridos, semiáridos y suelos pobres (Cen-Cen *et al.* , 2015).

En el estado de Oaxaca, México, el *Agave potatorum* Zucc., denominado maguey Tobalá, es utilizada para elaborar la bebida alcohólica destilada mezcal. Debido a la colecta intensa de ejemplares adultos, sus poblaciones han disminuido y desde los años 1990's grupos de campesinos implementan la propagación mediante semillas y establecen plantaciones (Enríquez-del Valle, 2008). La micropropagación asexual del *A. potatorum* se ha realizado a través de la técnica de cultivos vegetales; y las plantas obtenidas se aclimatan en invernadero, en que ocurre engrosamiento del tallo, desarrollo de nuevas hojas (grandes, rígidas y suculentas) en preparación a su establecimiento en vivero (Cruz-García *et al.* , 2017 ; Bautista-Castellanos *et al.* , 2020 ; Correa-Hernández *et al.* , 2022).

Posteriormente se establecen en vivero durante 12 meses, para alcanzar mayor tamaño y rusticidad necesarios en campo (Enríquez-del Valle, 2008). El vigor de la planta es afectada por su condición nutrimental y requiere de energía y fotosintatos producidos en los órganos fotosintéticos (Jarquín-Rosales *et al.* , 2022).

El abastecimiento nutrimental en plantas micropropagadas-aclimatadas del *A. potatorum* tuvo relación con su crecimiento en invernadero y vivero (Enríquez-del Valle *et al.* , 2016 ; Luna-Luna *et al.* , 2017 ; Bautista-Castellanos *et al.* , 2020 ; Ramírez-Mosqueda *et al.* , 2022). Es importante conocer la actividad fotosintética en interacción con el abastecimiento nutrimental, el objetivo fue evaluar el área foliar y la tasa de asimilación de CO_2 de plantas micropropagadas-aclimatizadas que se fertilizaron.

Materiales y métodos

Ubicación y material vegetal

Se tuvieron plantas micropropagadas- aclimatadas de *Agave potatorum* Zucc., siguiendo la metodología de Luna-Luna *et al.* (2017) . La aclimatación se realizó en el vivero del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, México, después se llevaron a un invernadero del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México. Tras un crecimiento ex vitro de 220 días, se seleccionaron 42 plantas que presentaron entre 10 y 13 cm de altura y se establecieron en macetas de 30 x 30 cm, con arena como sustrato.

Se formaron seis grupos de siete plantas, para fertilizarlas con solución universal Steiner (1984) y solución nutritiva California (Sánchez-del Castillo, 1989) a concentraciones del 5%, 50% y 100%, con pH ajustado a 5.8. La solución universal Steiner (1984) y la solución California, tienen en mg L^{-1} : $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 49.768 y 52; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 107.415 y 72; $\text{K}(\text{NO}_3)$, 28.128 y 66; K_2SO_4 , 25.153 y 0; KOH , 2.329 y 0; KH_2PO_4 , 26.95 y 0; MnSO_4 , 0.62 y 0.62; ZnSO_4 , 0.11 y 0.11; H_3BO_3 , 0.44 y 0.44; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.02 y 0.02; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.048 y 0.048, respectivamente.

El fertirriego se realizó a nivel sustrato con 400 ml, dos días a la semana durante 360 días. A los 60 y 360 días se registró: altura de planta (AP), número de hojas desplegadas (NH), diámetro de roseta (DR) y la distancia de los extremos distales de las hojas más grandes opuestas. El experimento se estableció bajo un DCA con una planta como unidad experimental. Se realizó análisis de varianza y comparación de medias (Tukey, 0.05), con el paquete SAS 9.4 (SAS Institute Inc. 2022).



Área foliar

En cada hoja completamente extendida se registraron las medias de longitud (L), excluyendo la espina terminal y ancho (A). Para determinar el área foliar (AF), se seleccionaron 30 hojas de distintos tamaños, cuyo contorno se delineó sobre papel, que se recortó y se cuantificó su área mediante un integrador óptico de área foliar modelo LI-3100. Se realizó análisis de regresión lineal, con el AF en función de su longitud L y A, para obtener un factor de conversión.

Dicho factor se empleó para estimar el área foliar individual de cada hoja y el área foliar total por planta. Se realizó análisis de varianza y comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$), utilizando el paquete estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute Inc. 2022).

Asimilación de CO₂

A los seis meses de edad se establecieron tres plantas por tratamiento (St-100%, St-5%, Cal-100% y Cal-5%) en macetas de 25.5 x 20 cm (9.4 dm³), con sustrato suelo-turba de musgo (1:2). Treinta días después del trasplante, en la parte media de la roseta de cada planta se seleccionó una hoja completamente desarrollada y mediante un IRGA portátil modelo LI 6400 y con aditamentos para cuantificar el CO₂ se registró la tasa de asimilación instantánea de CO₂.

Las plantas se sometieron a dos condiciones de humedad edáfica para determinar la tasa de asimilación instantánea de CO₂: 1) irrigación una vez a la semana (sin restricción); y 2) cuando no se irrigaron durante 17 días y la humedad del suelo fue menor al punto de marchitez permanente, PMP (sequía edáfica). Para determinar la humedad, capacidad de campo (85%) y el PMP (60%) del sustrato, se elaboró una curva de retención de humedad en el Laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

En cada periodo, se determinó la tasa de asimilación de CO₂, conductancia estomática, transpiración, CO₂ del mesófilo (Ci) y radiación fotosintéticamente activa (RFA), con ocho mediciones a cada hoja en intervalos de 3 h durante 24 h iniciando a las 10:00 h. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 x 2 x 2 x 9 (dos niveles en humedad edáfica, dos niveles de SN, dos niveles de concentración de SN y nueve niveles de horarios en que la medición se realizó), con un total de 72 tratamientos.

Se obtuvo una planta como unidad experimental con tres repeticiones por tratamiento, y un total de 216 unidades experimentales. Se realizó análisis de varianza y comparaciones de medias (Tukey 0.05) con el paquete SAS 9.4 (SAS Institute Inc. 2022).

Resultados y discusión

Desarrollo de plantas en vivero

El área foliar, la capacidad fotosintética, acumulación de biomasa y rendimiento de los cultivos son factores que dependen del abastecimiento nutrimental (Makino, 2011). Plantas de maíz que recibieron fertilización, desarrollaron hasta 4.6 veces en índice de área foliar, 1.06 veces la altura, 1.38 veces el peso seco, 1.4 veces el rendimiento de grano, 1.11 veces el peso de 1 000 granos y a los 66 días después de la siembra la tasa fotosintética fue 1 27 veces, en comparación a plantas no fertilizadas. Y hubo correlación alta ($r=0.926$) entre la tasa fotosintética y el rendimiento (Efthimiadou *et al.* , 2010).

Al inicio del experimento las plantas de *A. potatorum* tenían 7.9 a 8.3 hojas, 16.6 a 17 cm de diámetro de roseta, 10.3 a 13 cm de altura. De la fertirrigación durante 12 meses, el número de hojas (Cuadro 1) mostró que los tratamientos de solución nutritiva tuvieron efectos diferentes significativos ($p\leq 0.05$) en diámetro de roseta y altura de planta a los 60 días, y altamente significativos a los 360 días ($p\leq 0.01$), para el número de hojas, altura de planta y diámetro de roseta.

Cuadro 1. Resumen de análisis de varianza de *A. potatorum*, que recibieron diferente abastecimiento nutrimental con solución nutritiva.

FV	GL	NH60	NH360	DR60	DR360	AP60	AP360
Tratamiento	5	7.23ns	59.75**	54.7*	308.89**	9.47*	105.71**
Error	36	2.92	7.03	10.56	33.18	1.98	14.16
Total	41						

FV= fuentes de variación; GL= grados de libertad; NH= número de hojas; DR= diámetro de la roseta; AP= altura de la planta; 60= 60 días de establecido; 360= 360 días de establecido; *= valor de F significativa ($p > 0.05$); **= valor de F altamente significativa ($p \leq 0.01$).

Todos los grupos de plantas que recibieron solución nutritiva fueron más grandes a los 60 días de edad con respecto a la fecha de inicio, pero el tamaño de las plantas tuvo relación positiva con la dosis de SN. Las plantas más grandes fueron las que recibieron SN a 100%, ya sea Cal o St, mientras que las plantas más pequeñas fueron las fertilizadas con SN a 5% ya sea Cal o St.

Las plantas fertilizadas con Cal-100% y St-5%, tuvieron en promedio 11.7 y 8.7 hojas, diámetros de roseta de 24.1 y 17.9 cm y alturas de 13.3 y 10.4 cm, que fueron significativamente diferentes (Tukey, 0.05) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características morfológicas de plantas micropropagadas-aclimatizadas de agave potatorumz Zucc.

SN	NH60	NH360	DR60 (cm)	DR360 (cm)	AP60 (cm)	AP360 (cm)
S100	9.2 $\pm$ 2.1ab	25.6 $\pm$ 3a	22.6 $\pm$ 3.7abc	45.4 $\pm$ 6.6ab	12.1 $\pm$ 1.6ab	25.9 $\pm$ 4.9ab
S50	10.1 $\pm$ 2ab	24.1 $\pm$ 1.8ab	25 $\pm$ 3.1a	45.1 $\pm$ 4.9ab	13 $\pm$ 1a	24.9 $\pm$ 2.3abc
S5	8.7 $\pm$ 0.8b	20.1 $\pm$ 2.3b	17.9 $\pm$ 1.7c	34 $\pm$ 5.8c	10.4 $\pm$ 0.8b	19.9 $\pm$ 3.2bc
C100	11.7 $\pm$ 1.4a	27.7 $\pm$ 2.6a	24.1 $\pm$ 0.9ab	52.3 $\pm$ 4.8a	13.3 $\pm$ 0.8a	29.5 $\pm$ 4.4a
C50	9.9 $\pm$ 2.3ab	25.2 $\pm$ 2.6a	23.7 $\pm$ 5.1ab	45.4 $\pm$ 6.6ab	12 $\pm$ 2.1ab	26 $\pm$ 3.4a
C5	9.3 $\pm$ 1.3ab	20.8 $\pm$ 2.4b	19.7 $\pm$ 3.1bc	37 $\pm$ 5.6bc	10.7 $\pm$ 1.7b	19.6 $\pm$ 3.9c

S= Steiner; C= california; SN= solución nutritiva; NH= número de hojas; DR= diámetro de la roseta; AP= altura de la planta; 60= 60 días de establecido; 360= 360 días de establecido. Letras distintas en columna representan diferencias significativas ($p \leq 0.05$); la media se incluye $\pm$ el error estándar.

Transcurridos 360 días, las plantas fertilizadas con SN Cal-100% y SN St-5%, tuvieron 27.7 y 20.1 hojas, diámetro de roseta de 52.3 y 34 cm, altura de 29.5 y 19.9 cm; magnitudes significativamente diferentes (Tukey, 0.05); por otro lado, tuvieron 3.4 y 2.4 veces la cantidad de hojas; 3.11 y 2.02 veces el diámetro de roseta; 2.54 y 1.71 veces la altura, respecto a su tamaño al inicio del experimento (Cuadro 2). Morales *et al.* (2017) reportaron que plantas de *A. potatorum* fertilizadas con St-50% mostraron incremento del 13% en altura, pero no en el número de hojas, respecto a plantas no fertilizadas.

Área foliar y tasa de asimilación de CO₂

El área foliar junto a los periodos en que las plantas de *A. potatorum* fueron expuestas a condiciones contrastantes de humedad edáfica: 1) sin restricción de humedad; y 2) condición de sequía edáfica, los análisis de varianza (Cuadro 3) mostraron que las plantas tuvieron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en área foliar según el periodo de medición, ya que durante el primer periodo tuvieron 1 053.5 cm² con un aumento a 1 221.4 cm² significativamente (Tukey 0.05) diferentes.



Cuadro 3. Resumen de análisis de varianza para AF y tasa de asimilación de CO₂ de plantas de *A. potatorum* .

FV	GL	ACO ₂ (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Trans	Cond	CO ₂ (Ci)	AF (cm ²)
Per	1	0.96ns	0.0000005ns	0.036ns	71465771.9ns	1532586.2**
SN	1	4.52ns	0.0000002ns	0.003ns	61521904ns	2459140.23**
Conc	1	4.98ns	0.000022*	0.045**	90175268ns	15750132.9**
HMed	8	1123.3**	0.00009**	0.051**	34789727.8ns	0ns
Int2	1	0.14ns	0.0000004ns	0.019**	15241053ns	209183.39ns
Int3	8	38.36**	0.000027**	0.025**	28593932.8ns	0
Int6	8	14.6ns	0.0000001	0.013**	27630158.1ns	0ns
Int9	8	4.98ns	0.00000002ns	0.002*	15078401.8ns	0ns
Int10	16	10.05ns	0.00000002ns	0.007**	29104032.3ns	0ns
Error	144	9.71	0.0000002	0.146	35821589	83123.06
Total	215	11187.4	0.0001	1.145	7133430170	32034330.94

FV= fuentes de variación; GL= grados de libertad; Per= periodos que contrastaron en humedad edáfica; SN= solución nutritiva; Conc= concentración de nutrimentos; HMed= horario de medición; Int= interacción; Int1= Per x SN; Int2= Per x Conc; Int3= Per x HMed; Int4= SN x Conc; Int5= SN x HMed; Int6= Con x HMed; Int7= Per x SN x Conc; Int8= Per x SN x HMed; Int9= SN x Conc x HMed; Int10= Per x SN x Conc x HMed; ACO₂= asimilación de CO₂; Trans= transpiración; Cond= conductancia estomática; CO₂ (Ci)= dióxido de carbono del mesófilo; AF= área foliar; *= valor de F significativa (p> 0.05); **= valor de F altamente significativa (p≤ 0.01). Por motivos de espacio, en el cuadro no se incluyeron las interacciones no significativas

Por lo anterior, periodos cortos en suministro de agua en el suelo no afectaron el crecimiento de las plantas de agave (Cuadros 3 y 4). El hábitat natural de esta especie es en terrenos con pendiente y pedregosos, por lo que ésta puede ser útil en aprovechar productivamente áreas en que el agua es limitante. En plantas de maíz (Badr y Brüggemann, 2020) y en trigo (Osipova *et al.* , 2019) la disponibilidad limitada de agua en el suelo afecta negativamente el crecimiento, la tasa de transpiración, conductancia estomatal, capacidad fotosintética de las hojas y el rendimiento.

Cuadro 4. Tasa de asimilación de CO₂, transpiración y conductancia estomática de plantas de agave potatorum de 12 meses de fertirrigarlas.

Factores	ACO ₂ (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Trans	Cond (mmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	CO ₂ (Ci)	AF (cm ²)
Per					
conR	5.6a	0.0009a	0.036b	257.4a	1 053 b
sinR	5.47a	0.0008a	0.062a	1407.8a	1 221.4a
SN					
St	5.39a	0.0008a	0.04a	1366.3a	1 030.5b
Cal	5.68a	0.0009a	0.05a	298.9a	1 234.9a
Conc					
100	5.69a	0.0007b	0.03b	1860.5a	1 407.2a
5	5.39a	0.0009a	0.06a	1478.7a	867.2b
Hora (h)					
10:00	-0.63e	0.0004de	0.01b	521a	1 137.2a
13:00	-1.22e	0.0001de	0.005b	516a	1 137.2a
14:00	-0.56e	0.0006bc	0.01b	187.2a	1 137.2a
19:00	12.72ab	0.002a	0.08a	157a	1 137.2a
22:00	15.29a	0.001bc	0.09a	130a	1 137.2a
01:00	12.72	0.001bc	0.1	116a	1 137.2a

Factores	ACO ₂ (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Trans	Cond (mmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	CO ₂ (Ci)	AF (cm ²)
04:00	9.09c	0.001b	0.11a	294a	1 137.2a
07:00	4.58d	0.0009bc	0.011b	350a	1 137.2a
10:00	-1.5e	0.0002e	0.01b	368.1a	1 137.2a

Per= periodos contrastantes en humedad edáfica; conR= con riego; sinR= sin riego; SN= solución nutritiva; St= Steiner; Cal= California; Conc= concentración; ACO₂= asimilación de CO₂; Trans= transpiración; Cond= conductancia estomática; CO₂ (Ci)= dióxido de carbono del mesófilo; AF= área foliar. Letras distintas en columna representan diferencias significativas (p≤ 0.05).

Las plantas fertirrigadas con Cal-100% o St-100%, tuvieron 1 407.2 cm² AF, 1.62 veces, significativamente (Tukey, 0.05) mayor a los 867.2 cm² de AF de las plantas fertilizadas con Cal-5% o St-5%. Las diluciones de SN tuvieron efectos diferentes significativos (p≤ 0.05) y altamente significativas (p≤ 0.01) en el área foliar y conductancia estomática.

En los horarios en un ciclo de 24 h, en que ocurre variación de radiación fotosintéticamente activa, se presentaron valores diferentes altamente significativos (p≤ 0.01) de asimilación de CO₂, transpiración y conductancia estomática. El periodo de riego y el horario de registro mostraron efectos altamente significativos (p≤ 0.01) en la intensidad de transpiración, fotosíntesis y conductancia estomática.

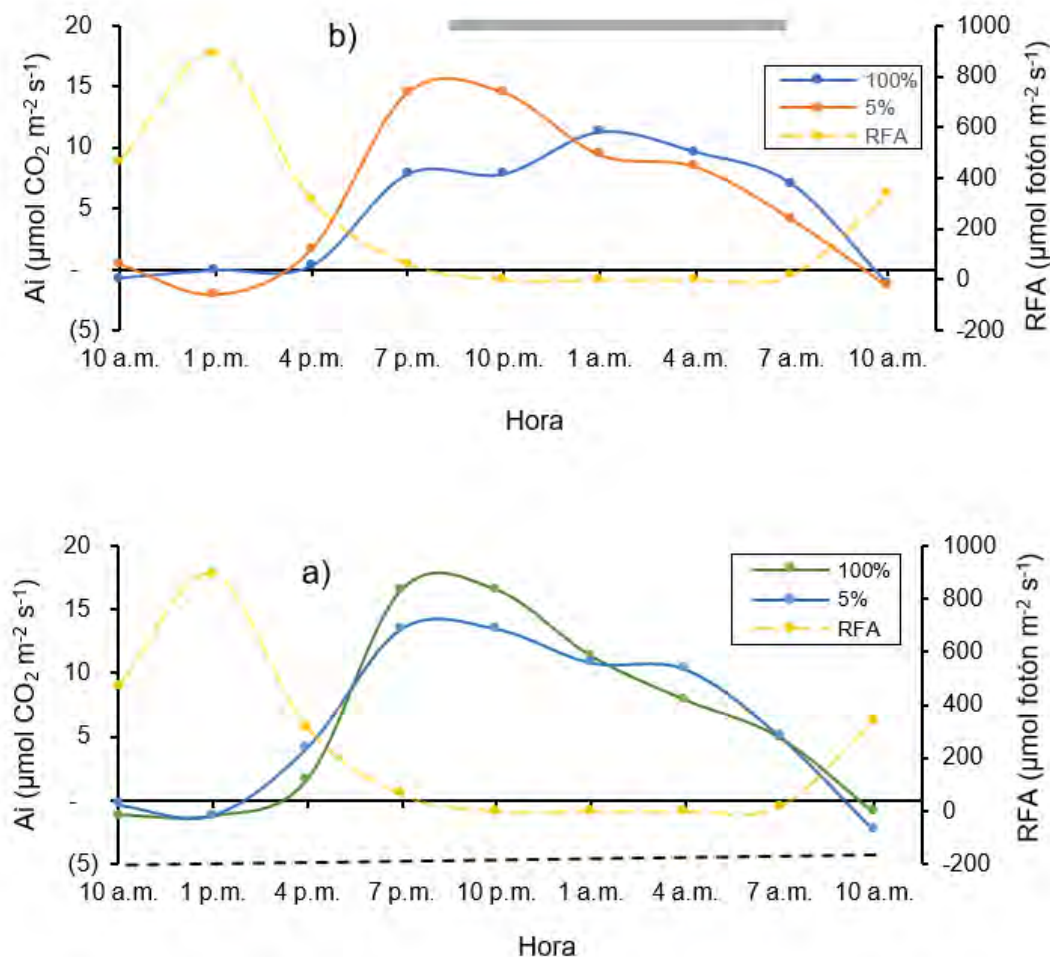
Tasa de asimilación de CO₂

Durante un ciclo de 24 h en el primer y segundo periodos que se evaluó la tasa de asimilación de CO₂, la radiación fotosintéticamente activa (RFA) presentó un patrón diurno característico alcanzando su valor máximo a las 13:00 h con aproximadamente 900 μmol fotón m⁻² s⁻¹ y se redujo hasta cero a las 19:00 h y volver a aumentar a partir de las 07:00 h del día siguiente.

La asimilación de CO₂ ocurrió durante el periodo nocturno, y comenzó a partir de las 16:00 h, con el inicio de la apertura estomática, cuando la RFA fue de alrededor de 300 μmol fotón m⁻² s⁻¹, lo que favoreció el incremento progresivo de la fijación de CO₂ (Figura 1), con los valores más altos entre las 19:00 y la 01:00 h y la máxima fijación ocurrió a las 22:00 h, con una tasa de 15.29 μmol m⁻² s⁻¹.



Figura 1. Tasa fotosintética de asimilación neta instantánea de CO_2 (A_i) de plantas micropropagadas-aclimatizadas de *Agave potatorum* a diferentes soluciones nutritivas (a) California; y (b) Steiner. La barra horizontal color gris representa el periodo nocturno desde la puesta del sol (20:13 h) hasta el amanecer (7:11 h) en horario de verano.

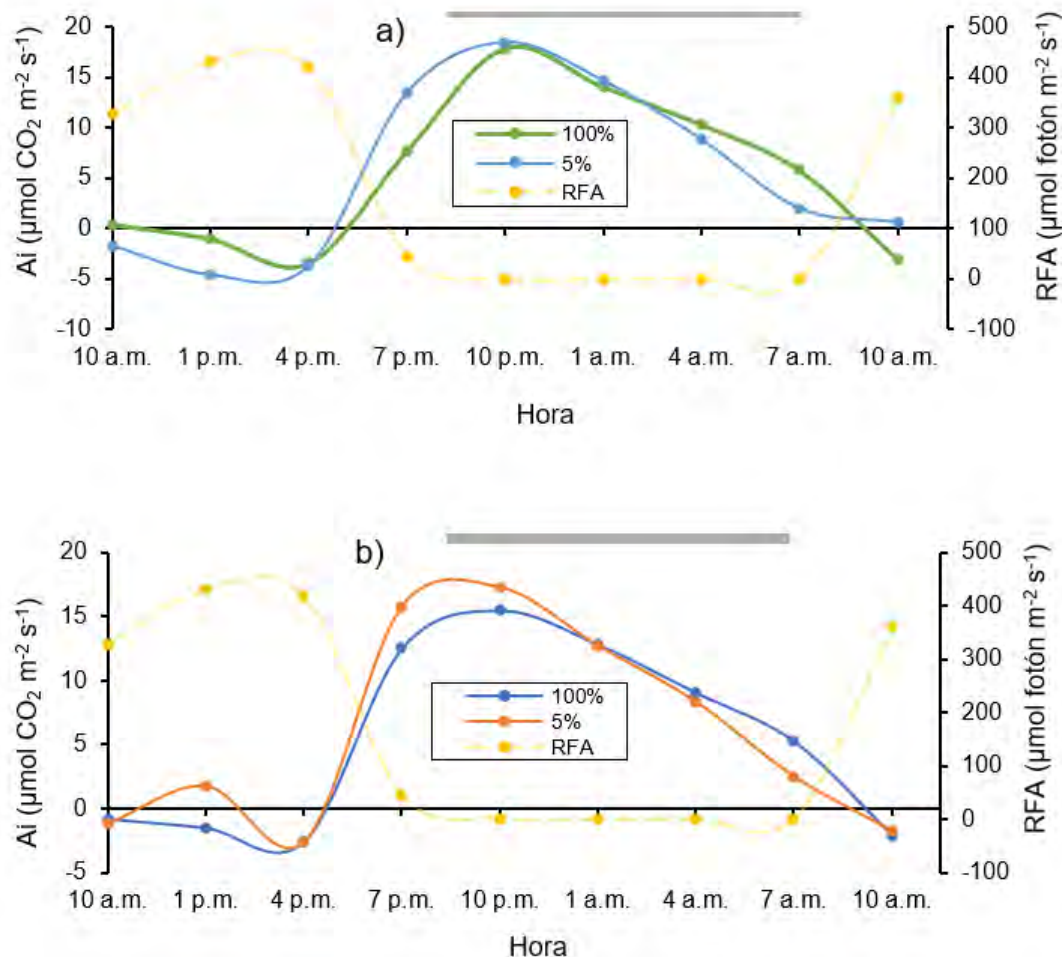


Las plantas mantuvieron asimilación de CO_2 durante las primeras horas de la mañana, la cual cesó aproximadamente a las 09:00 h, cuando la RFA alcanzó valores cercanos a $200 \mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Nobel (1976) documentó que plantas de *A. deserti* Engelm, en campo, presentaron máxima asimilación de CO_2 ($5.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) alrededor de las 22:00 h y este proceso se mantuvo activo incluso después del amanecer.

Las plantas de *A. potatorum* que tuvieron disponibilidad de agua mostraron durante casi 18 h asimilación nocturna de CO_2 (mecanismo CAM). Las plantas fertirrigadas con Cal-100% y con St-100% asimilación de CO_2 , $17 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente (Figura 1).

Tendencias similares se observaron en las plantas sometidas a la condición de sequía edáfica, cuando el sustrato estuvo por debajo del PMP (Figura 2); es decir, las plantas de *A. potatorum* continúan asimilando CO_2 , probablemente a que tuvieron agua almacenada en sus tejidos ya que presenta metabolismo ácido crasuláceo CAM.

Figura 2. Tasa fotosintética de asimilación instantánea neta de CO_2 (Ai) de plantas micropropagadas-aclimatizadas de *Agave potatorum*, fertirrigadas con diferentes soluciones nutritivas a) California; y b) Steiner. La barra horizontal color gris representa el periodo nocturno desde la puesta del sol (20:13 h) hasta el amanecer (7:11 h) en horario de verano.



Las plantas fertirrigadas a 100% y 5% no presentaron diferencias de asimilación de CO_2 por unidad de área. Las plantas abastecidas con SN 100%, ya sea St o Cal, tuvieron 1 407.2 cm^2 de área foliar, que fue 1.62 veces el AF de las plantas abastecidas con SN 5%. Las plantas abastecidas con Cal-100% y con Cal 5% tuvieron 1 867.37 y 1 031.16 cm^2 de AF.

Mientras que las plantas abastecidas con solución St-100% y St-5%, que tuvieron 1 504.55 y 1 005.6 cm^2 de AF respectivamente. Entonces, el AF es un factor que explica la acumulación de biomasa entre plantas con fertilización en dosis alta y aquellas con dosis baja.

La fijación de CO_2 , disminuyó gradualmente de las 4:00 am, hasta 09:00 am (cierre estomático), a partir del cual se presentaron valores negativos (Figuras 1 y 2). En *A. tequilana* ocurrieron mayores valores de asimilación de CO_2 nocturna (7.5 y 16.2 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y en el periodo de 10 am a 4 pm, se registraron tasas negativas de asimilación (Pimienta-Barrios et al ., 2006).

Las plantas en condiciones de agua disponible en el suelo, la asimilación de CO_2 ocurrió entre las 16:00 h y las 09:00 h del día siguiente (Figura 1) y las plantas a las que se suspendió el riego por 17 días, y el suelo estuvo por abajo del PMP, asimilaron CO_2 en el intervalo de las 17:00 h a las 09:00 del día siguiente (Figura 2). Las plantas a las que se limitó el agua mantuvieron abiertos sus estomas por menor tiempo en comparación a las plantas no limitadas de agua.

La apertura estomática inició a las 16:00 h, y la fijación máxima de CO_2 ocurrió a las 22 h, con valores de 17.81 y 18.41 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en las plantas que fueron fertirrigadas con SN Cal-100 y con Cal-5%. En cada periodo, las plantas fertirrigadas con SN Cal-100 y Cal-5% presentaron asimilación de CO_2 mayor que las plantas fertilizadas con SN St-100 y St-5%.

Las evidencias del presente trabajo coinciden con Pimienta-Barrios *et al.* (2005) de que plantas CAM, sometidas a menor disponibilidad de agua en el suelo reducen su actividad fotosintética e incrementan la respiración, pero todavía ocurren valores positivos de asimilación de CO_2 . Patishtán *et al.* (2010) reportaron que plantas de *Aloe vera* sometidas a estrés hídrico redujeron la conductancia estomática. Autores como Pimienta-Barrios *et al.* (2006), describen que el *A. tequilana*, bajo condiciones de sequía extrema disminuyeron, pero no cesaron su asimilación de CO_2 .

Cuando la humedad en el suelo estuvo por debajo del PMP, las plantas, presentaron conductancia estomática de 0.036 y 0.062 g (Cuadro 4), en RFA 223.3 y 176 $\mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 1). La aplicación de solución nutritiva al 100% y 5% en plantas, presentó transpiración de 0.0007 y 0.0009 mm, conductancia estomática de 0.03 y 0.06 $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y área foliar de 1407.2 y 867.2 cm^2 , magnitudes significativamente diferentes (Tukey 0.05).

Conclusiones

Plantas de agave potatorum fertirrigadas durante 360 días con solución nutritiva California al 100%, presentaron 27 hojas en promedio, diámetros de roseta de 52.3 cm y altura de 29.5 cm, que fue mayor tamaño que las plantas fertirrigadas con solución Steiner al 100%.

Las plantas a las que se suministró cantidad mayor de nutrimentos desarrollaron más área foliar. Las plantas muestran asimilación nocturna de CO_2 , al disminuir la RFA, la apertura estomática inició a las 16:00 h y alcanzó valores máximos de asimilación neta de CO_2 15.29 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a las 22:00 h.

Las plantas fertirrigadas con Cal-100% mostraron una asimilación de CO_2 mayor que el resto de las plantas. Las plantas que durante 17 días estuvieron en suelo con humedad por debajo del punto de marchites permanente continuaron la asimilación de CO_2 .

Bibliografía

- 1 Badr, A. and Brüggemann, W. 2020. Comparative analysis of drought stress response of maize genotypes using chlorophyll fluorescence measurements and leaf relative water content. *Photosynthetica*. 58(SI):638-645. <https://doi.org/10.32615/ps.2020.014>.
- 2 Bautista-Castellanos, A. I.; Enríquez-del Valle, J. R.; Velasco-Velasco, V. A. y Rodríguez-Ortiz, G. 2020. Enraizado y aclimatación de Agave potatorum. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 7(3):e2618. <https://doi.org/10.19136/era.a7n3.2618>.
- 3 Carrillo-Hernández, M. A.; Viguera, A. L. y Portillo, L. 2014. Observaciones sobre el comportamiento de estomas en plantas suculentas. *Boletín Nakari*. 25(2):27-30.
- 4 Cen-Cen, E.; Gómez-Merino, F. y Martínez-Hernández, A. 2015. Tolerancia de Agave tequilana a altas concentraciones de cationes metálicos divalentes. *Polibotánica*. 40(20):163-182.
- 5 Correa-Hernández, L.; Baltazar-Bernal, O.; Sánchez-Páez, R. and Bello-Bello, J. J. 2022. In vitro multiplication of agave tobala (*Agave potatorum* Zucc.) using ebb-and-flow bioreactor. *South African Journal of Botany*. 147:670-677. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.03.009>.
- 6 Cruz-García, H.; Campos-Ángeles, G. V.; Enríquez-del Valle, J. R.; Velasco-Velasco, V. A. y Rodríguez-Ortiz, G. 2017. Senescencia foliar en plantas micropropagadas de Agave americana durante su aclimatización. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8(2):381-391.

- 7 Efthimiadou, A.; Bilalis, D.; Karkanis, A. and Froud-Williams, B. 2010. Combined organic/inorganic fertilization enhances soil quality and increased yield, photosynthesis and sustainability of sweet maize crops. *Australian Journal of Crop Science*. 4(9):722-729.
- 8 Enríquez-del Valle, J. R. 2008. La propagación y crecimiento de agaves. Fundación Produce Oaxaca AC. e Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. México. 46 p.
- 9 Enríquez-del Valle, J. R.; Alcará-Vázquez, S. E.; Rodríguez-Ortiz, G.; Miguel-Luna, M. E. y Manuel-Vázquez, C. 2016. Fertirriego en vivero a plantas de *Agave potatorum* Zucc. micropropagadas-aclimatizadas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7(5):1167-1177.
- 10 Jarquín-Rosales, D.; Enríquez-del Valle, J. R.; Alpuche-Osorno, J. J.; Rodríguez-Ortiz, G.; Martín, M. P. and Campos-Ángeles, G. V. 2022. The effects of fertirrigation and *Azospirillum brasilense* inoculation on photosynthetic compounds of *Agave angustifolia*. *Australian Journal of Crop Science*. 16(01):162-168. <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.01.p3280>.
- 11 Luna-Luna, S.; Enríquez-del Valle, J. R.; Rodríguez-Ortiz, G.; Carrillo-Rodríguez, J. C. y Velasco-Velasco, V. A. 2017. Anatomía y morfología de plantas micropropagadas-aclimatadas de *Agave potatorum* Zucc. fertirrigadas en vivero. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 40(4):491-494.
- 12 Makino, A. 2011. Photosynthesis, grain yield, and nitrogen utilization in rice and wheat. *Plant Physiology*. 155(1):125-129.
- 13 Morales, I.; Martínez-Gutiérrez, G. A.; Cortés-Martínez, C. I.; Aquino-Bolaños, T.; Escamirosa-Tinoco, C. y Hernández-Tolentino, M. 2017. Crecimiento de *Agave potatorum* cultivado en ambientes contrastantes y fertirrigación. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*. 4(2):18-27.
- 14 Nobel, P. S. 1976. Water relations and photosynthesis of a desert CAM plant, *Agave deserti*. *Plant Physiol*. 58(4):576-582.
- 15 Osipova, S. V.; Permyakov, A. V.; Permyakova, M. D.; Rudikovskaya, E. G.; Verchoturov, V. V. and Rudikovskiy, A. V. 2019. Tolerance of the photosynthetic apparatus in recombinant lines of wheat adapting to water stress of varying intensity. *Photosynthetica*. 57(1):160-169. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.007>.
- 16 Patishtán, P. J.; Rodríguez, G. R.; Zavala, G. F. y Jasso, C. D. 2010. Conductancia estomática y asimilación neta de CO₂ en Sábila (*Aloe vera* Tourn.) bajo sequía. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 33(4):305-314.
- 17 Pimienta-Barrios, E.; Zañudo-Hernández, J.; Nobel, P. y García-Galindo, J. 2005. Respuesta fisiológica a factores ambientales del agave azul (*Agave tequilana* Weber). *Scientia-CUCBA*. 7(2):85-97.
- 18 Pimienta-Barrios, E.; Zañudo-Hernández, J. y García-Galindo, J. 2006. Fotosíntesis estacional en plantas jóvenes de *Agave tequilana*. *Agrociencia*. 40(6):699-709.
- 19 Ramírez-Mosqueda, M. A.; Cárcamo-Corona, R. G.; Aguilar-Jiménez, D. and Bello-Bello J. J. 2022. Micropropagation of agave (*Agave potatorum* Zucc.) through direct organogenesis. *Agrociencia*. 56(6):1-11. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i6.2823>.
- 20 Sánchez-del Castillo, F. 1989. Hidroponia. Universidad Autónoma Chapingo. México. 194 p.
- 21 SAS Institute. 2022. The SAS system for Windows user's guide. Release 9.4 SAS Institute. Cary, NC. USA. <https://support.sas.com/en/documentation/install-center/94/installation-guide-forwindows.html>.
- 22 Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. International society for soilless culture (ISOSC). In: Sixth International Congress on Soilless Culture Lunteren. 633-650 pp.

Crecimiento y asimilación de CO₂ de *Agave potatorum* Zucc. abastecidas a diferentes niveles nutrimentales

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 March 2026
Date accepted: 01 June 2026
Publication date: 01 July 2026
Publication date: 2026
Volume: 17
Issue: 4
Electronic Location Identifier: e4358
DOI: 10.29312/remexca.v17i4.4358

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

área foliar
fotosíntesis
plantas micropropagadas
solución nutritiva

Counts

Figures: 2
Tables: 4
Equations: 0
References: 22