



Variables ambientales en la síntesis de ácidos orgánicos en plantas MAC

David **Martínez-Moreno**
Jenaro **Reyes-Matamoros**

México alberga unas 30,000 especies de plantas, de las cuales 21,600 son plantas con semillas y entre el 50 y el 60 % son únicas del país; figuran más de 150 especies de árboles y arbustos y 49 especies de pinos que representan el 50 % del total mundial; existen además de 900 a 1,000 especies de helechos, más de 2,300 especies de musgos y líquenes y alrededor de 23,791 especies de plantas con flores. También se cuenta con un alto grado de especies únicas como matorrales con espinas y pastizales (Rzedowski, 1991). Entre las plantas de las especies de matorral con espinas se distinguen las cactáceas nativas del Continente Americano; en México se reportan 63 géneros con 669 especies, de las cuales 518 son exclusivas del país (Guzmán y cols., 2003).

Las cactáceas presentan resistencia a la sequía (definida como “el grado al cual una planta puede tolerar la falta de lluvia”), esta resistencia se debe a las adaptaciones morfológicas y fisiológicas adquiridas a lo largo de su evolución para poder enfrentar eficientemente la aridez. González (2012) menciona que entre las características morfológicas se encuentran las siguientes: gran desarrollo de la raíz; cutícula gruesa, con frecuencia impregnada de ceras; estomas situados en depresiones, hendiduras, surcos, etc.; tejido esponjoso para el almacenamiento de agua; reducción en el tamaño de células,

y ausencia de hojas asociada a la presencia de espinas. Mientras que las características fisiológicas son: capacidad para absorber agua rápidamente, propiedad ligada a un sistema de conducción muy eficiente; propiedad de las células para subsistir en estado de falta de agua, con capacidad de recuperarse cuando la humedad vuelve; reducción del periodo de crecimiento de ramas a lapsos muy cortos; capacidad de regulación de la transpiración a través de un mecanismo eficiente de cierre de estomas; y una combinación de las distintas vías fotosintéticas llamada C_3 durante el día, y un mecanismo fisiológico llamado Metabolismo Ácido Crasuláceo (MAC), que se caracteriza por la fijación de dióxido de carbono (CO_2) durante la noche. Este artículo tiene como propósito puntualizar la importancia de las cactáceas con fotosíntesis MAC, características de zonas semi-secas y secas, ya que estas representan un potencial como recurso natural para los seres humanos y, principalmente, para los mexicanos.

LUZ

La luz que captan las plantas se conoce como Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR, por sus siglas en inglés). La luz considera la naturaleza de la clorofila, ya que esta absorbe intensamente la luz azul y roja, reflejando la longitud que corresponde al color verde (Nobel, 1998). Algunos estudios muestran que el promedio de la radiación diaria es alrededor de 20 moles por metro cuadrado (m^{-2}) por día (d^{-1}) al año para superficies de las ramas verticales que no estén sombreadas en días claros, una reducción de la radiación, debido al sombreado hace que el tejido vegetal tenga una baja compensación de luz, lo que afecta la captura de CO_2 durante la noche en plantas MAC. Por otro lado, la morfología de las plantas puede afectar la interceptación y distribución de la radiación y la captación de CO_2 en superficies horizontales, como el abultamiento longitudinal de los cactus, llamado costilla, presentando una captación máxima

de radiación diaria a $34^\circ N$ de 66 moles m^{-2} , mientras que en superficies verticales de 7 a 33 moles m^{-2} (Geller y Nobel, 1987).

TEMPERATURA

Debido a que la temperatura de los tallos todavía es baja por la mañana, la fijación de CO_2 está acompañada por bajas tasas de transpiración, por lo tanto, la captación diaria de CO_2 ocurre a temperaturas ambientales diaria/nocturna de 25/15 $^\circ C$, respectivamente (Nobel, 1998). Mientras que Acevedo y cols. (1983) concluyen que en plantas de nopal (*Opuntia ficus-indica*), cuando la temperatura se incrementa en la noche de 5 $^\circ C$ a 18 $^\circ C$, se afecta la absorción de luz al pasar de 27 a 20 moles $m^{-2}d^{-1}$, Tinoco y Molina (2000) mencionan que las temperaturas del tallo en plantas de cardón gigante (*Pachycereus pringlei*) son similares a los promedios diarios de temperatura; mientras que las costillas orientadas al lado Norte experimentan una baja temperatura, lo cual hace que permanezcan cerrados los estomas como punto de compensación, las costillas del lado Este y Oeste experimentan una alta temperatura durante la mañana y la tarde, en tanto que las que se ubican en la orientación Sur experimentan una alta temperatura durante la mayor parte del día, lo que hace que el tejido reciba una mayor cantidad de luz, posiblemente saturándose. Esta hipótesis indica que la inducción de la aréola (protuberancia que aparece en el tejido de la superficie de la costilla en la parte superior de las ramas y que presenta cinco espinas circulares y una más grande en la parte central) depende de la acumulación de carbohidratos y de la temperatura óptima alrededor del tejido y que no hay suministro entre las costillas.

RELACIONES DE AGUA

La epidermis controla la pérdida de agua por medio de los estomas (de 15-60 para cactus), a través de los cuales el vapor de agua y el CO_2 se pueden difundir con facilidad entre las plantas con



© Malú Méndez Lavielle. Vidriado, 2015.

metabolismo MAC (Ting, 1985). Hay suficientes evidencias que muestran la importancia que tiene el agua en el comportamiento del metabolismo MAC (Martínez y cols., 2014). La conservación del agua es una de las ventajas ecológicas potenciales más importante de los magueyes y cactus. Los tallos acumulan grandes volúmenes de agua en relación a su superficie; además, hay una relación directa entre las raíces a poca profundidad, esto es importante en época de lluvia debido a que no se humedece el suelo a gran profundidad, de esta manera las raíces superficiales son eficientes para la captación de agua de lluvia, pero cuando se presenta la escasez de agua en las zonas secas y semisecas existe un desprendimiento de las raíces laterales, disminuyendo el área radical y evitando de esta manera la pérdida de agua, lo cual indica que la relación raíz-tallo (peso seco de raíces entre peso seco del tallo) es la más baja; por tanto, la planta asigna menos azúcares desde donde se producen hacia las raíces (Nobel, 1998).

ORIENTACIÓN

La orientación de tallos, flores y frutos de las plantas es de interés para los investigadores. Geller y Nobel (1987) observaron que la orientación de las pencas terminales de nopales de *Platyopuntia* maximiza la intercepción de la luz durante la estación de crecimiento. Tinoco y Molina (2000) señalan que en plantas de cardón gigante (*Pachyocereus pringlei*) las costillas con orientación Este interceptan más luz en la mañana, las del Oeste en la tarde, las del Norte reciben menos luz y las del Sur reciben la más alta intensidad de luz durante el día. Dado que la luz diaria varía constantemente en las distintas zonas debido a la trayectoria del sol, la luz puede ser una limitante en ciertas pendientes del lado Norte. No obstante, Figueroa y Valverde (2011) encontraron que la intercepción de la luz en la cara Sur de los tallos de candelabro



© Malú Méndez Lavielle. *Carmín*, 2015.

(*Pachycereus weberi*) puede estar asociada con una mayor disponibilidad de recursos para la reproducción en esta especie. Nobel (1981) menciona que la orientación incrementa la absorción de luz en la época favorable del año para el crecimiento de las pencas de nopal. Pero la sombra causada por las nubes, entre pencas y por pencas orientadas en dirección desfavorable, puede disminuir la acumulación de ácidos nocturnos, así como su producción (Acevedo y cols., 1983). La orientación de las hojas afecta la absorción de luz y por lo tanto a la fotosíntesis. De esta manera, la orientación de las pencas de ciertos nopales de *Platyopuntia* puede ser importante para una mayor absorción de la luz por la cara de la penca con la orientación Norte-Sur cerca del solsticio de verano, y menor comparada con la orientación Este-Oeste (Nobel, 1981). Por otra lado, la orientación de las ramas al Sur en plantas de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) permite una mayor intercepción de la luz y, como consecuencia, aumenta la captura de CO₂, mientras que las flores y frutos que se producen en la orientación Norte experimentan limitación de azúcares, por lo que las flores y frutos se desarrollan preferentemente en

las costillas y ramas con orientación Sur en plantas de esta especie (Rosas, 2010).

RELACIÓN FUENTE-DEMANDA

Los términos “fuente” y “demanda” (*source* y *sink*, en inglés) se han utilizado frecuentemente para enfocar los problemas de crecimiento y desarrollo. Después de que se fija el CO₂ de la atmósfera y se elaboran los productos de la fotosíntesis (fotosintatos) en las células superficiales de las hojas, hay movimiento de sustancias hacia el tejido conductor, llamado floema, por lo general de sacarosa, entre otros azúcares, según la especie de que se trate; estas forman una gran masa de materia orgánica que se mueve por el floema desde el lugar de abastecimiento (la fuente) hasta el órgano o tejido que las consume (la demanda). Para que esto sea posible se requiere una alta eficiencia en la intercepción de la radiación solar de la planta; una velocidad de fotosíntesis alta; un transporte eficiente de fotosintatos a través del sistema de conducción; y una óptima utilización de azúcares en los órganos que constituyen la demanda de interés. En plantas con fisiología MAC hasta la fecha no se han efectuado estudios que involucren a la fuente-demanda de fotosintatos de acuerdo a la orientación del tejido fotosintético.

En México los estudios realizados sobre el metabolismo ácido de las crasuláceas son escasos y no son más aquellos donde se involucre el efecto de la orientación de las plantas en la acidez acumulable en plantas con MAC; la mayoría de trabajos se han llevado a cabo en especies de importancia económica como el nopal (*Agave ficus-indica*), sisal (*Agave sisalana*), pitaya (*Hylocereus undatus*), sábila (*Aloe vera*) y *Agave tequilana*. Mandujano (2002), al analizar en ecosistemas naturales el metabolismo ácido crasuláceo en ramas jóvenes y maduras de la jiotilla (*Escontria chiotilla*) con orientación Norte-Sur, en Coxcatlán, Puebla, encontró que la orientación Sur y las ramas jóvenes presentaron fluctuaciones de acidez más pronunciadas, registrándose con ello un comportamiento no sincrónico en las estructuras reproductivas

en los meses de diciembre a agosto, presentando un amarre de frutos de 8.2 %. Martínez y cols. (2016) estudiaron la fluctuación fotosintética de jiotilla (*Escontria chiotilla*) en San Juan de los Ríos, Chiautla de Tapia, Puebla, realizando una evaluación de los ácidos orgánicos producidos durante un año; ellos concluyen que la acidez diurna mostró la mayor cantidad en el mes de septiembre y la menor en los meses de enero a abril. Con respecto a la producción de frutos, las orientaciones Norte y Este presentaron la mayor cantidad y peso seco de frutos. Las plantas que registraron los menores valores se ubicaron en terrenos con pendiente pronunciada. Asimismo, Rosas (2010) estudió el efecto de la orientación preferencial sobre las estructuras reproductivas (yemas, flores y frutos) y vegetativas (crecimiento y número de ramas) de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) en dos laderas con orientación contrastante (Norte y Sur) en la Reserva de la Biosfera Barranca de Mezquitlán, en el estado de Hidalgo. Ella concluye que las flores y frutos se desarrollan y producen preferentemente en las costillas y ramas con orientación Sur, y que las estructuras que se producen en sectores distintos al Sur, particularmente hacia el Norte, experimentan limitación de azúcares. Figueroa y Valverde (2011), al estudiar la orientación de flores en plantas de candelabro (*Pachycereus weberi*) y su efecto en la producción de óvulos, semillas y peso de las semillas, concluyeron que las flores orientadas al lado Sur producen un mayor número de óvulos, semillas y mayor peso de las semillas, y que esto está en asociación con la luz recibida en la cara Sur del tallo de las plantas. Por último, Martínez y cols. (2014) cuantificaron los ácidos orgánicos y su efecto en la producción de frutos de plantas de candelabro (*Pachycereus weberi*) en Santo Domingo Huehuetlán el Grande, Puebla; allí encontraron que las plantas no producen ramas nuevas y que la mayor cantidad de ácidos orgánicos se genera en el mes de junio, mientras que en el mes de marzo se presenta la menor cantidad, siendo la orientación Sur la que presentó la mayor cantidad de frutos.

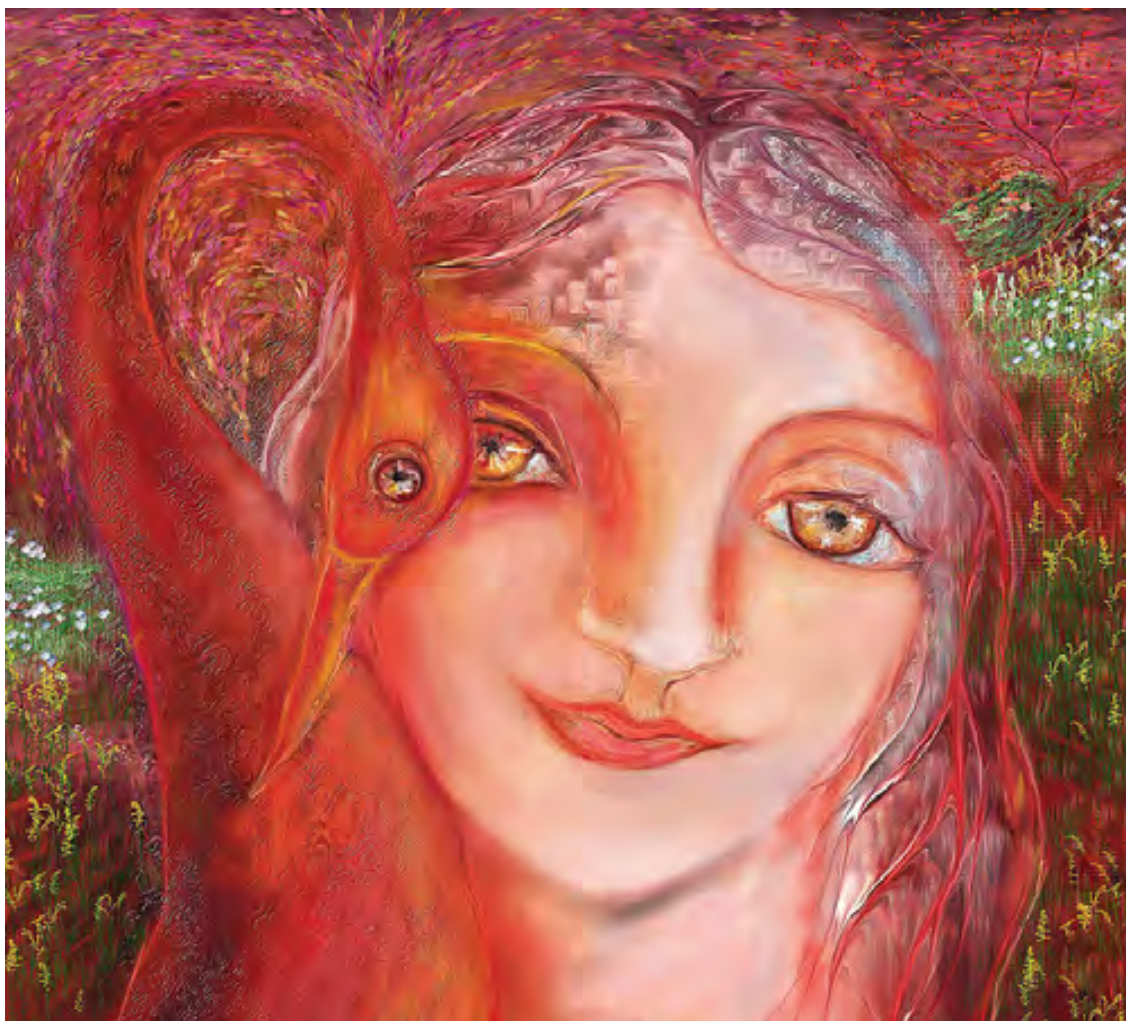


© Malú Méndez Lavielle. *Dualidad*, 2014.

Como puede verse, con base en los estudios realizados sobre la vegetación de las zonas secas y semisecas, se puede constatar que esta tiene un alto potencial que no ha sido utilizado para el beneficio de los seres humanos, y solo algunas especies de estas áreas se aprovechan de manera local, pues en su mayoría el recurso se explota de forma irracional. La información vertida en este trabajo podría ayudar para que los recursos de interés para los seres humanos se amplíen y se aprovechen de manera racional sin alterar los ecosistemas naturales.

B I B L I O G R A F Í A

- Acevedo E, Badilla I and Nobel PS (1983). Water relations, diurnal acidity changes, and productivity of a cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiology* 72: 775-780.
- Figueroa DM and Valverde PL (2011). Flower orientation in *Pachycereus weberi* (Cactaceae): effects on ovule production, seed production and seed weight. *Journal of Arid Environmental* 75: 1214-1217.
- Geller GN and Nobel PS (1987). Comparative cactus architecture and PAR interception. *American Journal of Botany* 74(7): 998-1005.
- González MF (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología, México.



Guzmán U, Arias S y Dávila P (2003). *Catálogo de Cactáceas Mexicanas*. UNAM, Comisión Nacional para el Conocimiento de la Biodiversidad, México.

Mandujano PM (2002). *Evaluación del metabolismo ácido de las crasuláceas en ramas jóvenes y maduras de *Escontria chiotilla* (Weber) Rose*, con orientación norte y sur en el municipio de Coxcatlán, Puebla. Tesis de Maestría, FES Iztacala, UNAM, México, 81 p.

Martínez D, Reyes J, Andrés AR y Pérez L (2016). Fluctuación fotosintética en *Escontria chiotilla* (Weber) Rose en San Juan de los Ríos, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 3(1): 11-21.

Martínez D, Reyes J, Figueroa DM y Rodríguez T (2014). Efecto de los ácidos orgánicos en la producción de frutos de *Pachycereus weberi* (J.M.Coult.) Backeb en el municipio de Santo Domingo, Huehuetlán El Grande, Puebla, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 1(3): 113-125.

Nobel PS (1981). Influences of photosynthetically active radiation on cladode orientation, stem tilting, and height of cacti. *Ecology* 62: 982-990.

Nobel PS (1998). *Los incomparables Agaves y Cactus*. Ed. Trillas, 211 p.

Rosas GEM (2010). Efecto de la orientación preferencial sobre las estructuras reproductivas y vegetativas en *Myrtillocactus geometrizans*. Tesis de Maestría, UAM, Unidad Iztapalapa, México, 75 p.

Rzedowski J (1991). Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica Mexicana* 14: 3-21.

Ting IP (1985). Crassulacean acid metabolism. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 36: 595-622.

Tinoco C and Molina F (2000). Flower orientation in *Pachycereus pringlei*. *Canadian Journal of Botany* 78: 1489-1494.

David Martínez-Moreno
Facultad de Ciencias Biológicas
Jenaro Reyes-Matamoros
Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
jenaro.reyes@correo.buap.mx