

Brenda A. López-Ruiz y Ulises Rosas

Los cactus: modelos únicos para la ciencia

Las cactáceas son plantas únicas que dominan los ambientes áridos y semiáridos de México. Pueden presentar desde una forma globosa hasta la de un imponente cactus columnar. Estas plantas han impactado la vida social, cultural y económica de nuestro país, y para la ciencia son modelos excepcionales de investigación, pues presentan características evolutivas inigualables: desde sus mecanismos de conservación de agua y fotosíntesis, hasta su sorprendente longevidad y resiliencia. En este texto explicaremos cómo los cactus pueden ser una oportunidad para ampliar nuestros conocimientos en diversas áreas de las ciencias biológicas.

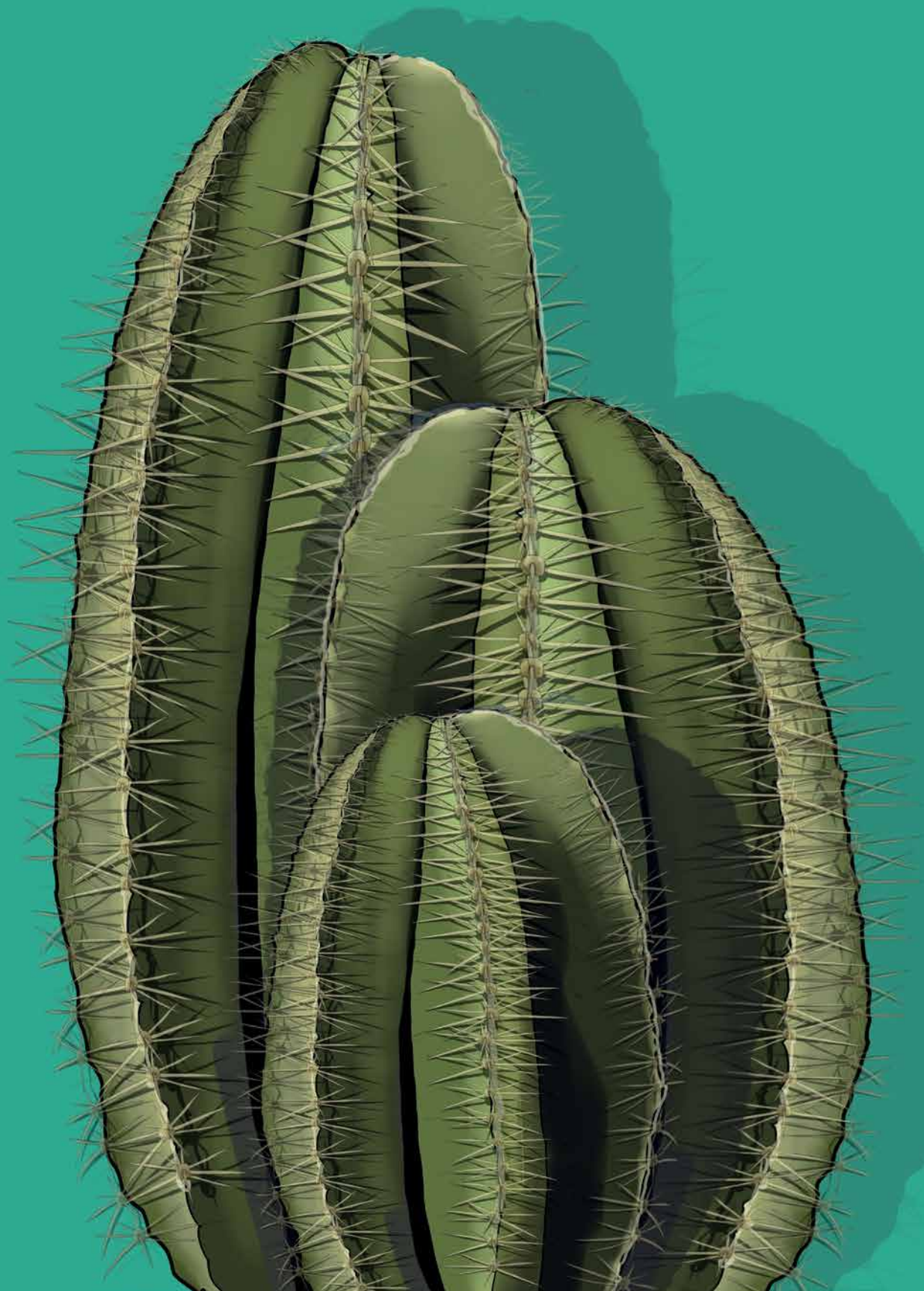
¿Cómo estudiar la evolución y el desarrollo en los cactus?

La evolución es un tema apasionante. Estudiarla nos ha permitido entender cómo pasamos desde organismos formados por una sola célula hasta la gran diversidad de organismos que existen actualmente. Si unimos *evo*, de “evolution”, y *devo*, de “development”, tenemos el término *evo-devo*, un campo de la biología que se encarga de entender los mecanismos que dirigen el desarrollo de los organismos y cómo estos mecanismos traen consigo cambios evolutivos en los rasgos observables de un ser vivo. En español se le conoce como biología evolutiva del desarrollo y trata de entender cómo surgen las estructuras y patrones novedosos; es decir, aquellas características que emergen en una especie como resultado de la evolución. Estas novedades pueden proporcionar ventajas adaptativas que les permiten sobrevivir y reproducirse en su entorno.

Los primeros estudios de *evo-devo* se enfocaron en indagar cómo crecen y se desarrollan los animales con cuerpos simétricos, como las moscas. Los científicos querían entender cómo se organizaban las partes delantera y trasera de estos animales y descubrieron que hay genes que se encargan de esta polaridad a través de los llamados *genes homeóticos* –como los **genes Hox**–, los cuales son genes maestros que participan en el desarrollo de las partes del cuerpo. Cuando comparamos diferentes especies de animales, estos genes Hox son muy parecidos, y son requeridos para construir cualquier animal: los encontramos en una mosca, en un ratón o en

Genes Hox

Secuencias de ADN que dan las instrucciones para que se formen las partes o segmentos de los animales, como la parte delantera, la trasera, la cabeza o la cola. Estos genes se han conservado en todos los animales y su duplicación ha originado la gran diversidad que existe.



el ser humano. En la evolución del desarrollo, sin embargo, estos genes se duplicaron, dando lugar a la creación de los diferentes patrones en los animales.

Para los estudios de *evo-devo*, en el caso de las plantas se ha utilizado a la especie modelo *Arabidopsis thaliana* (una planta que pertenece a la misma familia del brócoli y la col), con el fin de entender cómo se desarrolla la hoja, la raíz o la flor. Con el *evo-devo* se busca entender cómo las vías de desarrollo de un órgano se han usado y reusado para formar diferentes patrones corporales en las demás plantas. Un aspecto importante es que *Arabidopsis thaliana* no presenta adaptaciones a climas como los áridos y semiáridos, que sí poseen los miembros de la familia Cactaceae (Figura 1). Aquí vamos a abordar cuatro adaptaciones evolutivas de los cactus: la capacidad de almacenar agua, su singular tipo de fotosíntesis, la presencia de espinas y sus excepcionales células troncales o meristemáticas, que originan plantas enormes y raíces adaptadas a ambientes extremos.

Células troncales o meristemáticas
Células pequeñas y totipotentes que se dividen activamente para generar el crecimiento de tallos, flores y raíces.

■ **Sobreviviendo en el desierto: adaptaciones para la conservación de agua**

■ Los cactus han evolucionado para resistir climas extremadamente calurosos y áridos. Esto se debe al desa-

rollo de tallos suculentos que les permiten maximizar la absorción y retención de agua en tiempos de sequía prolongada. El término *suculencia* se refiere aquí a la capacidad de los tejidos como hojas, tallo o raíces de almacenar agua incrementando su volumen. Además de la resistencia a la aridez, la suculencia se asocia con la tolerancia a la salinidad, ya que está ligada con la dilución de sales tóxicas en los tejidos.

Los cactus presentan una amplia variedad de formas anatómicas para almacenar agua, como los tallos ramificados y aplanados en los nopales, formas globosas o de barril como en los *Echinocactus grusonii*, también llamado “asiento de suegra”, y los impresionantes cactus columnares, como el *Pachycereus weberi* o el *P. pringlei*, llamado comúnmente cardón gigante (Figura 2).

■ **La fotosíntesis tipo CAM, una fascinante adaptación**

■ La mayoría de las plantas son autótrofas, es decir, transforman mediante la fotosíntesis el dióxido de carbono (CO₂) del ambiente y la luz solar en su alimento en forma de azúcares. Durante el día, el CO₂ entra a través de los estomas, los cuales son pequeños poros que regulan el intercambio de gases en la planta. Sin embargo, cuando el agua es limitada, como

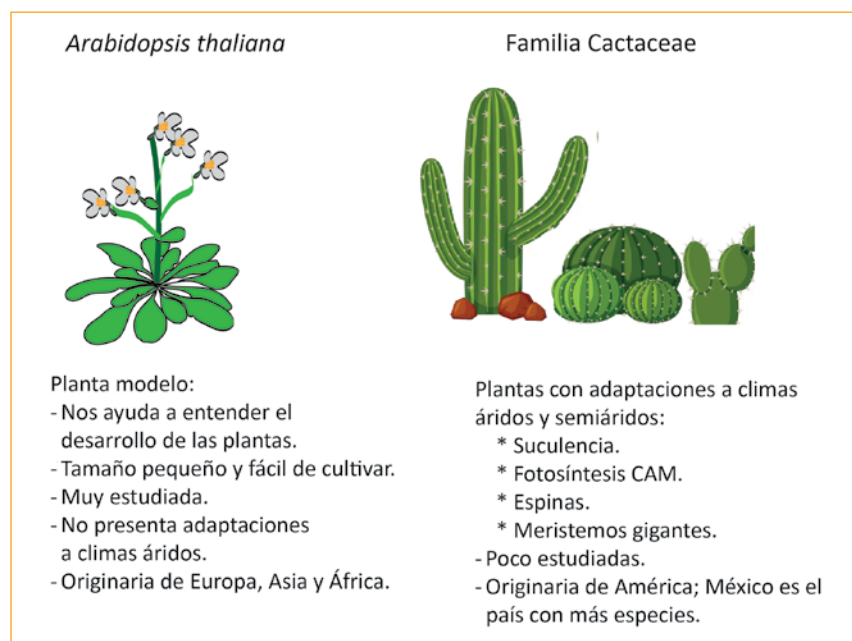


Figura 1. Características de *Arabidopsis thaliana*, la planta modelo más estudiada en la ciencia, y de los miembros de la familia Cactaceae, que se caracterizan por presentar adaptaciones a climas áridos.



Figura 2. Formas anatómicas de algunos miembros de la familia Cactaceae: tallos ramificados y aplanados en opuntias o nopales (A); formas globosas en mammillarias (B); de barril en *Echinocactus grussoni* (C), y columnares en *Pachycereus weberi* (D).

en la temporada de sequía, los estomas se cierran para evitar su pérdida. Esto podría ser un problema, ya que el cierre de los estomas, además de prevenir la evaporación del agua, también hace que el CO_2 no entre, provocando que la planta no pueda llevar a cabo la fotosíntesis. Para solucionar esto, las cactá-

ceas y otras plantas desarrollaron una solución muy interesante: sus estomas se abren durante la noche cuando la temperatura es menor y la humedad es mayor (Figura 3). Es así como durante la noche las cactáceas captan el CO_2 y lo almacenan temporalmente en una sustancia llamada ácido málico en sus

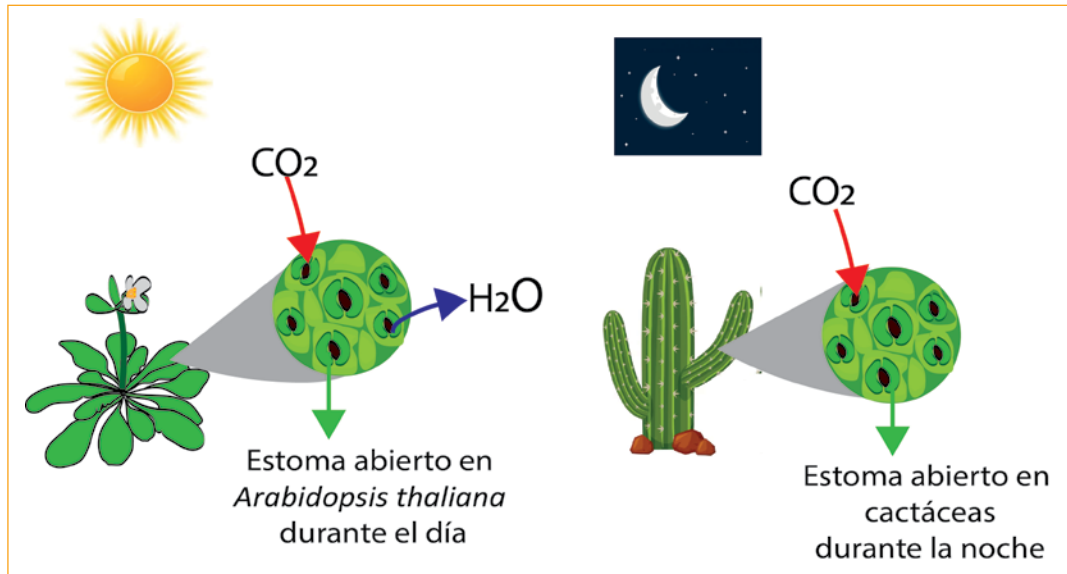


Figura 3. Durante el día, ciertas plantas, como *Arabidopsis thaliana*, mantienen los estomas abiertos para capturar el CO_2 y llevar a cabo la fotosíntesis; sin embargo, esto hace que también pierdan agua debido a la evapotranspiración, que es mínima debido al ambiente favorable donde viven. En el caso de las cactáceas, abren sus estomas en la noche para capturar el CO_2 y posteriormente realizar la fotosíntesis. Esta estrategia les permite no perder agua durante el día.

Células totipotentes
Las células presentes en las zonas meristemáticas de las plantas y que pueden generar cualquier tipo de órgano.

tejidos. Durante el día, cierran sus estomas para evitar la pérdida de agua y liberan el CO_2 almacenado para llevar a cabo la fotosíntesis, lo que les permite ser más eficientes en la utilización del agua. Este tipo de fotosíntesis se conoce como metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, por las siglas en inglés: *crassulacean acid metabolism*).

Los científicos han encontrado una relación entre suculencia y la fotosíntesis tipo CAM que han denominado como síndrome de la suculencia, lo que les ayuda a optimizar el uso del agua en zonas áridas gracias a una combinación de ambos rasgos: almacén del vital líquido en los tejidos suculentos y la apertura de estomas en la noche. La mayoría de las plantas con el tipo de fotosíntesis CAM son suculentas, ya que la suculencia puede incrementar el tejido destinado a realizar la fotosíntesis y, a la vez, favorece que el CO_2 no se escape de la planta.

■ **Construyendo un gigante con raíces extensas**

■ Todos los tejidos u órganos de cualquier ser vivo provienen de células troncales o meristemáticas que se dividen y diferencian en células especializadas. En el caso de las plantas, esas células troncales se conocen como meristemáticas. En los meristemas las

células totipotentes proliferan para producir todos los órganos y tejidos de la planta. De forma general, hay dos meristemas principales en las plantas: el meristemo apical del tallo o SAM (por las siglas en inglés: *shoot apical meristem*) y el meristemo apical de la raíz o RAM (del inglés: *root apical meristem*). El SAM origina todos los tejidos aéreos, como las hojas, las flores y el tallo, mientras que el RAM forma las raíces, que pueden ser una raíz principal o raíces laterales, las cuales derivan de la principal.

Los cactus de gran tamaño, como el *Echinocactus platyacanthus*—conocido como “biznaga burra” y que llega a medir más de medio metro de ancho—, tienen un SAM de casi dos milímetros y medio de diámetro; es decir, es posible verlo a simple vista. Esto constituye una novedad dentro de las plantas, ya que la mayoría de los SAM miden de 0.1 a 0.3 mm y para verlos es necesario usar un microscopio. En la planta adulta de *Arabidopsis thaliana*, el SAM es de apenas 0.07 mm; es decir, 35 veces más pequeño que el de *Echinocactus platyacanthus*. ¿Y por qué los SAM de este cactus y de otros requieren ser tan grandes? Pues se piensa que es para crear plantas enormes que puedan ser barriles de agua y resistir condiciones adversas como las sequías prolongadas (**Figura 4**).

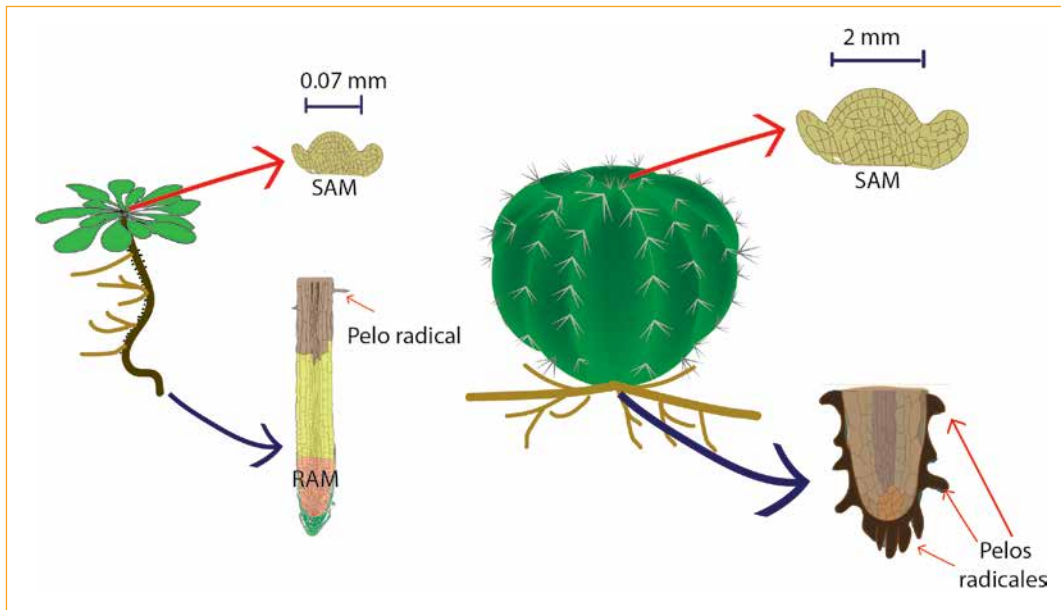


Figura 4. Comparación entre los meristemos de *Arabidopsis thaliana* y *Echinocactus platyacanthus*. *Arabidopsis thaliana* tiene un meristemo apical aéreo (SAM) más pequeño, comparado con el de *Echinocactus platyacanthus*. La raíz de *Arabidopsis thaliana* continúa creciendo de forma indeterminada y está dividida en zonas. En la imagen se observa en la zona de color rosa la zona proliferativa o RAM; la zona amarilla es donde las células se alargan y en la parte café las células maduran y forman los pelos radicales. En la raíz primaria de *Echinocactus platyacanthus* las células se diferencian de forma muy rápida y desarrollan pelos en la punta de la raíz, lo que significa que se perdió la zona proliferativa. Este proceso ayuda a que las raíces crezcan principalmente de forma horizontal mediante raíces laterales (indicadas en café claro).

En el caso de las raíces, éstas funcionan para dar anclaje a la superficie y para absorber agua y nutrientes provenientes del suelo. Con la raíz principal de los cactus sucede un fenómeno muy interesante. En la mayoría de las cactáceas se ha encontrado que aproximadamente dos días después de que germinan las semillas, las células proliferativas del RAM se agotan; es decir, dejan de dividirse y comienzan a diferenciarse formando pelos radicales, algo que comúnmente sólo sucede en la parte más alejada del RAM (Figura 4). Además, conforme se agota el RAM de la raíz principal comienzan a aparecer raíces laterales. Se ha sugerido que este proceso es una adaptación que promueve la formación de raíces muy ramificadas con mayor capacidad para absorber nutrientes y agua, permitiendo que las plántulas de cactáceas puedan sobrevivir en ambientes con periodos cortos de humedad (Figura 4).

■ Espinación estratégica

■ La diversidad de formas, tamaños y colores de las espinas es un ejemplo de la increíble adaptación de

las cactáceas al medio ambiente (Figura 5). Las espinas no sólo son funcionales como armadura natural contra depredadores, sino que también les sirven a los investigadores como una forma de identificación de cactáceas. Se dice que la presencia de espinas es una característica primitiva presente en la mayoría de los miembros de la familia Cactaceae; aunque en algunas especies ha desaparecido. Se cree que las espinas son hojas modificadas que han perdido su capacidad de realizar fotosíntesis para convertirse en agujas o cerdas. Las espinas derivan de la areola, la estructura única que caracteriza a las cactáceas y se trata de una estructura afelpada donde se originan las flores, pelos y espinas. Entre las funciones de las espinas está la protección contra los depredadores que intenten comerse a los cactus, también funcionan como una protección contra los rayos ultravioleta, para coleccionar agua y como una forma de dispersión.

■ ¿Qué hacemos en el laboratorio?

■ En nuestro laboratorio nos hemos propuesto usar a *Mammillaria san-angelensis* como especie modelo



Figura 5. Diversidad de espinas en doce especies de cactus; es de notar la disposición, color y número de ellas.

para estudiar las bases genéticas de la arquitectura de la raíz, el microbioma asociado a la raíz y el meristemo apical aéreo de las cactáceas. Esta especie es nativa de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y presenta un ciclo de vida relativamente corto; es de fácil reproducción y recientemente comenzamos a secuenciar su genoma, lo que permite buscar los genes involucrados en las novedades evolutivas descritas en este artículo.

Mammillaria san-angelensis podría convertirse en un modelo equivalente a *Arabidopsis thaliana*, pero en cactáceas, con el que pueda comprenderse cómo la evolución ha generado programas de desarrollo que se traducen en la increíble diversidad de cactáceas que vemos en nuestro país.

Brenda Anabel López Ruiz

Jardín Botánico del Instituto de Biología de la UNAM.
brenda.lopez@st.ib.unam.mx

Ulises Rosas

Jardín Botánico del Instituto de Biología de la UNAM.
urosas@ib.unam.mx

Lecturas recomendadas

López Ruiz, B. A. (2020), “Origen y evolución de los cactus”, *Contactos: Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, 118:57-62. Disponible en: <<https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/86/69>>, consultado el 27 de enero de 2026.

Schwertner-Charão, L., J. Treviño-Carreón y R. Delgado Martínez (2023), “Las fascinantes adaptaciones de las cactáceas y su historia evolutiva”, *Ciencia/ergo-sum: Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva de la Universidad Autónoma del Estado de México*, 30(2):1-6. Disponible en: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10474861006>>, consultado el 27 de enero de 2026.

Zavaro Pérez, C. y F. Maniago (2023), ¿Por qué tienen espinas los cactus?, *Herreriana*, 5(2):25-31. Disponible en: <<https://doi.org/10.29057/h.v5i2.9888>>, consultado el 27 de enero de 2026.

