

El Nopal

Ecofisiología del Nopal en México



Ernesto González Gaona
Leandris Argentel Martínez
Lucila Perales Aguilar
Ofelda Peñuelas Rubio
Alberto Margarito García Munguía
Karla Vanessa De Lira Ramos

Compiladores



Pantanal Editora

2024

Ernesto González Gaona
Leandris Argentel Martínez
Lucila Perales Aguilar
Ofelda Peñuelas Rubio
Alberto Margarito García Munguía
Karla Vanessa De Lira Ramos
Compiladores

El Nopal: ecofisiología del nopal en México



Pantanal Editora

2024

Copyright© Pantanal Editora

Editor Chefe: Prof. Dr. Alan Mario Zuffo

Editores Executivos: Prof. Dr. Jorge González Aguilera e Prof. Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

Diagramação: A editora. **Diagramação e Arte:** A editora. **Imagens de capa e contracapa:** Canva.com. **Revisão:** O(s) autor(es), organizador(es) e a editora.

Conselho Editorial

Grau acadêmico e Nome

Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos
Profª. MSc. Adriana Flávia Neu
Profª. Dra. Allys Ferrer Dubois
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior
Profª. MSc. Aris Verdecia Peña
Profª. Arisleidis Chapman Verdecia
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva
Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo
Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu
Prof. Dr. Carlos Nick
Prof. Dr. Claudio Silveira Maia
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos
Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva
Profª. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos
Prof. MSc. David Chacon Alvarez
Prof. Dr. Denis Silva Nogueira
Profª. Dra. Denise Silva Nogueira
Profª. Dra. Dennyura Oliveira Galvão
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves
Prof. Me. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Fábio Steiner
Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza
Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez
Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira
Prof. MSc. Javier Revilla Armesto
Prof. MSc. João Camilo Sevilla
Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales
Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski
Prof. MSc. Lucas R. Oliveira
Profª. Dra. Keyla Christina Almeida Portela
Prof. Dr. Leandro Argente-Martínez
Profª. MSc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann
Prof. MSc. Marcos Pisarski Júnior
Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos
Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla
Profª. MSc. Mary Jose Almeida Pereira
Profª. MSc. Núbia Flávia Oliveira Mendes
Profª. MSc. Nila Luciana Vilhena Madureira
Profª. Dra. Patrícia Maurer
Profª. Dra. Queila Pahim da Silva
Prof. Dr. Rafael Chapman Auty
Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke
Prof. Dr. Raphael Reis da Silva
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes
Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo (*In Memoriam*)
Profª. Dra. Sylvana Karla da Silva de Lemos Santos
MSc. Tayronne de Almeida Rodrigues
Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca
Prof. MSc. Wesclen Vilar Nogueira
Profª. Dra. Yilan Fung Boix
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Instituição

OAB/PB
Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã
UO (Cuba)
IF SUDESTE MG
Facultad de Medicina (Cuba)
ISCM (Cuba)
UFESSPA
UEA
UNEMAT
UFV
AJES
UFGD
UEMS
IFPA
UNICENTRO
IFMT
UFMG
URCA
ISEPAM-FAETEC
IFG
UEMS
UFF
(Colômbia)
UNAM (Peru)
IFRR
UCG (México)
Rede Municipal de Niterói (RJ)
UNMSM (Peru)
UFMT
SED Mato Grosso do Sul
IFPR
Tec-NM (México)
Consultório em Santa Maria
UFJF
UEG
FAQ
UNAM (Peru)
SEDUC/PA
IFB
IFPA
UNIPAMPA
IFB
UO (Cuba)
UFMS
UFPI
UFG
UEMA
IFB
UFPI
FURG
UO (Cuba)
UFT

Conselho Técnico Científico
- Esp. Joacir Mário Zuffo Júnior
- Esp. Maurício Amormino Júnior
- Lda. Rosalina Eufrausino Lustosa Zuffo

Ficha Catalográfica

Catálogo na publicação
Elaborada por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

N821

El Nopal: ecofisiología del nopal en México / Organizadores Ernesto González Gaona, Leandris Argente Martínez, Lucila Perales Aguilar, et al. – Nova Xavantina-MT: Pantanal, 2024.
81p.

Outros organizadores: Ofelda Peñuelas Rubio, Alberto Margarito García Munguía, Karla Vanessa de Lira Ramos

Livro em PDF

ISBN 978-65-85756-21-1

DOI <https://doi.org/10.46420/9786585756211>

1. Ecología fisiológica. I. Gaona, Ernesto González (Organizador). II. Martínez, Leandris Argente (Organizador). III. Rubio, Ofelda Peñuelas (Organizador). IV. Título.

CDD 574.5

Índice para catálogo sistemático

I. Ecología fisiológica



Nossos e-books são de acesso público e gratuito e seu download e compartilhamento são permitidos, mas solicitamos que sejam dados os devidos créditos à Pantanal Editora e também aos organizadores e autores. Entretanto, não é permitida a utilização dos e-books para fins comerciais, exceto com autorização expressa dos autores com a concordância da Pantanal Editora.

Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000.
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil.
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp).
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br

Prólogo

El presente libro constituye un tributo a una de las especies vegetales que identifican a los Estados Unidos Mexicanos. Es el resultado del esfuerzo de un gran grupo de investigadores que forman parte de la Red Nacional del Nopal en México. Aquí hemos recopilado información clásica y científica sobre la capacidad que tiene el nopal para desarrollarse en la mayoría de los climas y ecosistemas de México, así como formas de propagación y principales usos.

Ente las organizaciones que han colaborado con la redacción del documento se encuentran la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), cuyo secretario es el Dr. Víctor Manuel Villalobos Arámbula, el Ing. Víctor Suárez Carrera, Subsecretario de Autosuficiencia Alimentaria, el Dr. Salvador Fernández Rivera, Coordinador General de Desarrollo Rural y el Lic. Ignacio Ovalle Fernández, Director General de Seguridad Alimentaria Mexicana.

Participaron además de manera activa un colectivo de directivos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), entre ellos Dr. Luis Ángel Rodríguez Del Bosque, Encargado del Despacho de los Asuntos de la dirección General del INIFAP, el Dr. Alfredo Zamarripa Colmenero Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación, el Dr. Luis Ortega Reyes, Coordinador de Planeación y Desarrollo y el Lic. José Humberto Corona Mercado, Coordinador de Administración y Sistemas.

Se destaca también la participación del Dr. José Antonio Cueto Wong, Director Regional del Centro de Investigación Regional Norte Centro, el Dr. Juan Bautista Rentería Ánima, director de Investigación, el Ing. Ricardo Carrillo Monsiváis, Director de Administración y Dr. Luis Reyes Muro, Director de Coordinación y Vinculación en Aguascalientes

Finalmente se hace mención especial al Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes y al Instituto Tecnológico Valle del Yaqui, del Tecnológico Nacional de México (TECNM), donde prestigiosos investigadores ofrecen acceso universal al conocimiento científico generado tras muchos años de investigación.

Los editores

Resumen

Prólogo.....	4
Capítulo I.....	7
Introducción al cultivo del Nopal.....	7
Capítulo II.....	15
Características de Los Nopales.....	15
Capítulo III.....	27
Selección del sitio y Plantación del Nopal.....	27
Capítulo IV.....	37
Manejo anual del Cultivo.....	37
Capítulo V.....	45
Usos y aprovechamiento de los Nopales.....	45
Capítulo VI.....	64
Generación de biogás y energía eléctrica.....	64
Índice.....	79
Sobre los compiladores.....	80

Introducción al cultivo del Nopal




Huerta de Nopal tunero. Foto: Dr. Jaime Mena Covarrubias, INIFAP-CEZAC.


Capítulo II

Características de Los Nopales

Recebido em: 01/12/2023


Aceito em: 08/12/2023

 10.46420/9786585756211cap2

Ernesto González Gaona 

Alberto Margarito García Munguía 

José Saúl Padilla Ramírez 

Argelia García Munguía 

Lucila Perales Aguilar 

Las cactáceas son nativas de América con 98 géneros y más de 1,500 especies. Conocidas como órganos, nopales, pitayos, garambullos, biznagas, peyotes, candelabros y cardenchas, son plantas con tallos carnosos, ramas con espinas o escamas en lugar de hojas y con vistosas flores, su nombre genérico deriva de la palabra “kaktos” que significa espinoso (Bravo-Hollis, 1997; Bartholt & Hunt, 1993; González et al., 2001; Aguilar-García, 2003).

Estas plantas se distribuyen preponderantemente en las regiones áridas, semiáridas y subtropicales, ya que el 70% de las especies se desarrollan en estos hábitats, aunque disminuyen considerablemente en desiertos con climas extremos como la cuenca “Great Basin” en Norteamérica, que presenta temperaturas frecuentes por debajo de 0 °C, donde sólo crecen algunas especies de *Escobaria* y *Opuntia* que logran soportar las nevadas (Arias, 1997). Para México se considera una diversidad de 54 géneros y 850 especies, de la cual, el 60% se encuentra en los desiertos Chihuahuense y Sonorense, así como en los valles intermontanos de Hidalgo y Querétaro; además, se estima que más de 400 especies son endémicas (Arias, 1997), aunque Roberts (1989) señala que 1,000 son reconocidas como especies mexicanas.

La característica que distingue a la familia de las cactáceas es la presencia de aréolas que pueden dar origen a espinas, hojas y frutos entre otros, así como tallos fotosintéticos esto debido a la ausencia de la lámina foliar, que se sustituyó por espinas, epidermis gruesa y cristales de oxalato de calcio en las células (González *et al.*, 2001), así como una estructura crasa y un metabolismo de tipo ácido crasuláceo, esta familia evolucionó en los últimos 80 millones de años a partir de plantas no suculentas con hojas bien desarrolladas incluidas en el orden *Caryophyllales* con fotosíntesis del tipo C3 como el género *Pereskia* que es considerado el más primitivo dentro de las cactáceas (Figura 1) (Arias, 1997; Bravo-Hollis, 1997).



Figura 1. *Pereskia lychnidiflora* DC., conocida como árbol del matrimonio o guititache crece en forma silvestre en las selvas subhúmedas de Chiapas y Oaxaca. Es una Cactácea primitiva parecida a un árbol con hojas laminares y espinas. Fuente: <http://cactiguide.com/>

El género *Opuntia*, denominado así por Tournefort en 1700 por la semejanza con una planta espinosa que crecía en la población de Opus, Grecia (Bravo-Hollis & Scheinvar, 1995), es uno de los géneros de las cactáceas más ampliamente distribuidos (Nieto-Garibay, 2003), se le encuentra desde Canadá hasta la Patagonia, con más de 200 especies, de las cuales 114 se encuentran en México (Bravo-Hollis, 1978). En forma silvestre el nicho ecológico preferido es el matorral xerófilo, aunque también se le encuentra en el matorral espinoso, localizados en las zonas áridas y semiáridas de la República Mexicana donde forma densas poblaciones llamadas “nopaleras” que se extienden desde Aguascalientes y Jalisco hasta Durango; desde Coahuila y Chihuahua hasta el norte de Nuevo León y Tamaulipas, con un área cercana a los tres millones de hectáreas (Domínguez-Cadena, 2003).

Los nopales pertenecen al género *Opuntia* que presenta tres subgéneros 1) los que tiene artículos cilíndricos y espinas con vaina también llamados “cardenches” o “clavellinas” son *Cylindropuntia* (Figura 2A) los de artículos subcilíndricos discoides o aplanados conocidos como pencas y espinas sin vainas con estambres exertos son *Nopalea* (Figura 2B y 3) los que tienen las mismas características que los *Nopalea* excepto que los estambres no son exertos, son del subgénero *Opuntia* que es el más numeroso y son conocidos como nopales (Figura 2C) (González et al., 2001).

Las *Opuntias* son plantas que pueden ser de tipo arbóreas, arbustivas o rastreras, con tallos fotosintéticos llamados artículos que al fusionarse forman ramas de consistencia carnosa o leñosa adoptando formas cilíndricas o subcilíndricas o aplanadas de color verde amarillento a violáceo, los

artículos que son aplanados son llamados cladodios o pencas y presentan diversas formas desde ovada, abovada, circular, oval, oblonga hasta orbicluar.

La determinación de especies en *Opuntia* es algo difícil debido a la gran diversidad de ecotipos que muestran una plasticidad morfológica proveniente de su constitución genética y de la presión de selección del ambiente tan hostil en que se desarrollan y a los procesos de hibridación natural (Flores-Hernández y Reyes-Agüero, 2003). De manera tradicional, la clasificación se ha realizado con base en diferencias fenotípicas contrastantes, de acuerdo al sistema utilizado por Bravo-Hollis (1978), Sánchez-Mejorada (1982), Barthlott y Hunt (1993) y González et al. (2001).



Figura 2. Plantas de los diferentes subgéneros de *Opuntia* A) *Cylindropuntia*, B) *Nopalea* y C) *Opuntia* (Fotos: MC. Esperanza Quezada Guzmán, INIFAP- CEPAB).

Aunque se han realizado avances en la elaboración de descriptores y caracteres de interés específicos (Mondragón et al., 1995; Pimienta-Barrios & Muñoz-Urías, 1995), se considera que el uso de las técnicas moleculares es la mejor herramienta para la determinación varietal, en especial el uso de

isoenzimas, para la detección de polimorfismo en los sistemas enzimáticos de *Opuntia* (Flores-Hernández & Reyes-Agüero, 2003).

Epidermis

Presenta una cutícula gruesa y recubierta de una sustancia grasosa denominada “cutina”, que es suave al tacto y protege a la planta de la evaporación, al regular el proceso de transpiración, también la protege del ataque de hongos, insectos, luminosidad intensa y es auxiliar en la regulación de la entrada de dióxido de carbono y salida de oxígeno (Nieto-Garibay, 2003). En los nopales solo se pierde agua por los estomas, que son poros microscópicos que actúan como válvulas que se abren y cierran conforme se dan las necesidades de intercambio gaseosos y mantienen su balance hídrico, en caso de que sus reservas hídricas estén agotadas, las estomas, pueden permanecer cerrados indefinidamente (Vázquez-Yanes, 1997). También en esta zona se encuentra una capa de oxalatos de calcio que son refractantes y disminuyen la absorción de la energía luminosa.

Los estomas en las cactáceas son menores en número que en las especies no xerofitas del orden de 10 a 30 comparado contra 100 o 300 estomas por mm^2 , respectivamente (Conde, 1975) y se encuentran más o menos hundidos, lo cual ocasiona la formación de espacios aéreos que se saturan de vapor de agua, disminuyendo la transpiración (Bravo-Hollis, 1978).

En forma general, los cladodios maduros pueden tener de 1.0 a 5.0 cm de grosor del cual la mayoría es tejido blanco dedicado a almacenamiento de agua y solo existe una capa de 2.0 a 5.0 mm de color verde en cada cara de la penca, llamada clorénquima que es donde se lleva a cabo la fotosíntesis. En caso de sequía el agua se pierde preferentemente del parénquima blanco mientras que el clorénquima puede permanecer completamente hidratado (Nobel, 1995).

Las aréolas en los nopales son homologas a las yemas axilares de las otras dicotiledóneas y dan origen a hojas, espinas, glóquidas, flores, tallos y hasta raíces y pueden ser circulares o elípticas. Esta característica se usa para el establecimiento de nuevas plantaciones, al enterrar pencas maduras una vez que se ha cicatrizado el corte.

Para el establecimiento de nuevas huertas de nopal mediante la propagación vegetativa, se debe tener mucho cuidado en lo que respecta a la sanidad de la planta madre, puesto que se pueden llevar problemas a las nuevas plantaciones como ocurre con la enfermedad del engrosamiento de cladodios.

En el centro de cada aréola existe un meristemo de crecimiento formado por dos porciones: la abaxial o externa, que dará origen a las espinas y la adaxial o interna, que origina las flores, entrando primero en actividad la externa y en forma posterior la interna (Bravo-Hollis, 1978).

Las hojas verdaderas son pequeñas, cilíndricas o cónicas y carnosas y después de un tiempo se desprenden y quedan en las aréolas las espinas, que son hojas modificadas con reducción del parénquima y lignificación de los tegumentos, pueden estar solitarias o en grupos, redondas, aplanadas, desnudas o con vainas.

También en las aréolas se presentan las glóquidas o “ahuates” que son semejantes a las espinas, pero pequeñas rígidas y muy numerosas con una superficie retrobarbada, estas espinas son características de las *Opuntias* y especies afines (Arreola, 1997) y junto con las espinas ayudan a disminuir la tasa de transpiración y absorber energía solar de onda corta, lo cual modera los extremos de temperatura diurna (Pimienta, 1990; González et al., 2001).

Flores

Pueden ser hermafroditas o unisexuales, esto último cuando existe atrofia de los estambres o del estigma lo cual ocurre raras veces (Arreola, 1997). Se desarrollan en la porción superior de la penca, son sésiles, una por aréola, el color varía, después de la anthesis y los segmentos del perianto, varían de forma tanto en el contorno (espatulado, romboide, obovado), como en el ápice (acuminado, emarginado, obtuso).

La polinización en *Opuntia* es zoófila, generalmente por insectos de los órdenes Lepidóptera, Diptera, Hymenoptera, Hemíptera y Coleoptera (Bravo-Hollis, 1978).

En forma general la floración se presenta durante los meses de abril y mayo, en la región de Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato y Jalisco, mientras que en los estados de México, Hidalgo y Puebla se inicia desde febrero. Un aspecto distintivo de la flor del nopal es que es efímera, es decir, se abre y se cierra el mismo día y de acuerdo a la hora del día en que abren se denominan como tipo “A” cuando el inicio ocurre a las nueve, el pico a las once de la mañana y el cierre a las seis de la tarde y las del tipo “B” se abren a las tres de la tarde, el pico es una hora después, el cierre a las siete de la tarde, y al otro día se abren como tipo “A”, los nopales maduros solo tienen un porcentaje muy bajo de este tipo de flores (Pimienta, 1990).

Ovario

Es ínfero, unilocular con el pericarpelo semejante al tallo y más o menos tuberculado, el cáliz y la corola se unen para formar el perianto que está conformado por segmentos verdes o coloridos en comparación con los segmentos interiores que son de color blanco, amarillo, anaranjado o rojo y los estambres son más cortos que los pétalos, a excepción del subgénero *Nopalea* en donde junto con el estilo son más largos que los pétalos.

Fruto

Es una baya comestible de forma globosa, ovoide y turbinada que llevan en el ápice la concavidad receptacular también llamada ombligo, desnuda después de la caída de los segmentos florales (Pimienta, 1990) y puede ser un indicador del grado de madurez del fruto (Robles, 1987) con pulpa variable desde blanca, verde hasta purpura, de forma globosa, ovoide a elipsoidal. Las especies que producen frutos comestibles son: *Opuntia ficus indica*, *O. streptachantha* y *O. lindheimeri*; sin embargo, la más común en

plantaciones y nopaleras de solar es *O. ficus indica* mientras que en las silvestres la más explotada es *O. streptachantha* (Pimienta, 1990).

En los países de habla hispana a los frutos de las *Opuntia* se les llama tunas, mientras que en los EUA se les llama peras de cactus “*cactus pear*” o peras manzana, “sabras” en Arabia y en Europa como higos de la india que es la forma hispana del nombre latín de la variedad más diseminada de nopal *Opuntia ficus indica* (Nobel, 1998).

La tuna presenta una curva de crecimiento tipo sigmoide, con frutos de ciclo corto, intermedio y tardío cuyo periodo entre la floración y madurez es de 120 a 140, 140 a 160 y 170 a 180 días, respectivamente. El crecimiento del lóculo en las primeras ocho semanas después de la floración es lento y en forma posterior se incrementan lo que ocasiona que el grosor de la cáscara se reduzca y la síntesis de azúcares se inicia cinco semanas antes de la maduración comercial (Robles, 1987). Se considera que es un fruto no climatérico, por lo que se puede almacenar por periodos largos de tiempo (Alvarado, 1978; Laksminarayana y Estrella, 1978).

El tamaño final de la tuna depende del número de semillas fecundadas y abortivas en su interior y aunque no se han determinado con precisión las causas que las ocasionan, por lo general se encuentran dos tipos de semillas estériles o vanas siempre predominando un tipo (Barbera *et al.*, 1994)

La pulpa comestible de las tunas es alrededor del 60 al 75% del peso fresco, con una concentración del 12 al 15% de azúcares, de los cuales, un tercio de este porcentaje es de fructuosa que es más tolerable para los diabéticos que la glucosa o sacarosa rica en vitamina C y baja en grasas. El único inconveniente de esta sabrosa fruta es que para comercializarlas es necesario remover los aguates o gloquídeas ya sea al rodar los frutos en el suelo, barrerlos con ramas secas o limpiarlos con cepillos mecánicos (Nobel, 1998).

Raíz

Es extensa y superficial, la mayoría se encuentra en los primeros 30 cm, debido a que las raíces se originan a partir de las aréolas ubicadas en la porción enterrada del cladodio y como son varias, no existe dominancia de una raíz (Pimienta, 1990). Durante la época de lluvia se ha observado la presencia de numerosas raicillas blancas “raíces de lluvia”, provistas de pelos absorbentes en el extremo de las raíces, lo que aumenta la absorción en esos periodos y después desaparecen (Bravo-Hollis, 1978; Sudzuki, 1995). Se determinó que en nopaleras cultivadas, donde se realizan aplicaciones de estiércol y pasos de rastra, la extensión de las raíces solo llega a los 15 a 65 cm de separación del tronco, en comparación con los cuatro a ocho metros de extensión que alcanzan las raíces en las plantas no cultivadas, lo cual da una idea de la capacidad de adaptación a condiciones adversas de escasez de humedad (Hernández, 1978).

En general los nopales presentan las raíces muy cerca de la superficie. El 80 % en los primeros 10 cm (Luna, 2010), ya que de esta manera aprovechan el agua de lluvias muy ligeras, cuya humedad penetra muy poco en el suelo, en épocas secas las raíces se contraen reduciendo su diámetro y separándose del suelo que las rodea, en estos periodos solo se mantienen las raíces maduras que presentan una cubierta

impermeable formada por una sustancia denominada como “suber” que las capacita para no perder agua al estar en contacto con el suelo seco. Una vez que se inician las lluvias las raíces recobran su diámetro y forman raicillas desnudas para absorber eficientemente el agua presente en el suelo, estas pueden desaparecer o cubrirse de “suber” en cuanto se inicia el siguiente periodo seco (Vázquez-Yanes, 1997).

El agua absorbida por las raíces de los nopales, llega a la parte aérea de la planta para que sea utilizada o almacenada en el tejido parenquimatoso formado por grandes células isodiamétricas; durante la temporada de lluvias este tejido se satura capacitando a la planta a resistir condiciones adversas de humedad en la temporada de secas (Vázquez-Yanes, 1997).

Las plantas del género *Opuntia* presentan una especie de carbohidrato indigestible mucilaginoso llamado baba, cuya función se cree es absorber y almacenar agua ya que es altamente higroscópico, aunque existe controversia en esta función (Mauseth, 1991; Sutton et al., 1981; Sudzuki, 1995).

Las adaptaciones morfológicas, estructurales y bioquímicas han hecho que este tipo de plantas puedan sobrevivir y desarrollarse bajo condiciones extremas de las zonas áridas y semiáridas de México sobre todo ante la escasez de agua y los cambios bruscos de temperatura (González et al., 2001; Pimienta, 1990).

El proceso fotosintético llamado Metabolismo Ácido Crasuláceo (CAM), distingue a las cactáceas de la mayoría de las plantas. En los nopales, los estomas, se encuentran cerrados durante el día y abiertos en la noche cuando la temperatura y el déficit de presión de vapor son bajos. Durante la noche el CO² es fijado a ácido málico y almacenado en las vacuolas de las células de la corteza y liberado en el siguiente periodo de luz y descarboxilado en el citoplasma para liberar CO₂ que es de nuevo fijado y reducido en los cloroplastos por medio del ciclo de Calvin este proceso abate las pérdidas de agua por transpiración (Whitting et al, 1979 citado por Pimienta, 1990).

Otra ventaja de los nopales es que requieren un menor gasto de energía para adquirir y conservar el agua del suelo, debido a su potencial hídrico (-0.3 a -0.6 Mega pascales (MPa) en comparación con especies tolerantes a la sequía (-1.0 a -3.0 MPa), este potencial siempre es negativo debido a que el agua que se mueve dentro de las plantas no está libre de solutos y su movimiento obedece a un gradiente negativo (Turner y Jones, 1980).

Para guardar los ácidos producidos en el periodo de oscuridad, las plantas CAM, presentan grandes cantidades de tejido parenquimatoso no fotosintético, que también les sirve para almacenar agua, por lo que son obligadamente suculentas. Este tejido proporciona ventajas y costos adaptativos, ya que sobrevive a partir de carbohidratos que producen las células que fotosintetizan y el balance entre los dos tipos de células, en los nopales es desfavorable para las que fijan la luz y por ello las plantas con metabolismo CAM son de menor crecimiento neto respecto a las plantas comunes (Ezcurra, 1997).

Los nopales se desarrollan mejor bajo las siguientes condiciones: temperatura de 11.2 a 27.1 °C, precipitación anual de 116 a 1,800 mm y altitudes de 1.0 a 2,675 msnm, aunque se les puede encontrar hasta altitudes de 5,100 msnm como en el Perú. No crecen sólo en las zonas áridas, sino también en las

selvas, tropicales, planicies, a lo largo de las costas y en las montañas (Badii y Flores, 2001; Aguilar-García, 2003).

Es importante recalcar que los tejidos cargados de agua de los nopales les impide soportar temperaturas por debajo del punto de congelación por periodos prolongados ya que se forma hielo en los tejidos internos y al descongelarse la temperatura del tejido aumenta (exotermia); sin embargo, la temperatura del clorénquima disminuye en forma continua ocasionado la muerte de las células y se ocasionan los daños por frío, esto ocurre cuando la baja de temperatura es repentina porque cuando la temperatura disminuye gradualmente en un periodo de varios días o semanas como durante el otoño e invierno se crea un fenómeno de aclimatación o acondicionamiento por ejemplo una disminución de la temperatura del aire de 10 °C durante dos semanas conduce a un acondicionamiento de la planta a tolerar temperaturas de 1.5 °C (Vázquez-Yanes, 1997; Nobel, 1998).

Se considera que las huertas de nopal para tuna y forraje pueden sufrir daños por temperaturas frías de -5 a -10 °C, como el caso de *O. ficus indica* y *O. streptacantha* (Nobel, 1998). Aunque la sensibilidad a bajas temperaturas varía entre especies de tal manera que *O. humifusa* que se encuentra desde EE.UU. hasta Ontario, Canadá, puede tolerar hasta -24 °C y *O. fragilis* que se ubica en Alberta, Canadá, puede tolerar hasta -40 °C, lo cual es una adaptación debido a temperaturas que decrecen gradualmente (Nobel, 1995). Respecto al mejoramiento genético en búsqueda de tolerancia al frío, Felker et al. (2009) seleccionaron en Argentina, cinco híbridos (clones 42, 46, 80, 83 y 150) de *Opuntia lindheimerii* (padre) por *Opuntia ficus indica* (madre) que presentaron mayor tolerancia al frío que *O. ficus indica* y el clon 46 no presentó daños por frío comportamiento similar al de *Opuntia ellisiana* que es el clon sin espina más resistente al frío que se conoce.

Respecto al estrés por calor, el nopal altera su metabolismo para disminuir el efecto. Flores-Hernández (2003), evaluó las características bioquímicas del aparato fotosintético y del sistema de síntesis de proteínas de plantas contrastantes en cuanto a porcentaje de supervivencia en zonas áridas sometidas a estrés por calor, señala que con fines de selección, las plantas tolerantes son aquellas que expresan una reducción en el contenido de clorofila, aumento en la actividad de la enzima PEP'Case y del contenido prolina, disminución de la proteína soluble y ausencia de proteínas de bajo peso molecular (32 y 36 kDa) entre otros, parámetros medidos en brotes de nopal y explantes de raíz de cladodios enraizados.

Nobel (1998) señala que los nopales en general tienen una baja tolerancia a la salinidad por lo cual es necesario tener precaución de no acumular sodio en la zona de anclaje de la planta cuando se riegan por goteo las nopaleras. Se ha determinado que el crecimiento de raíces se inhibe con concentraciones de 12 g de NaCl por litro de agua, disminuyendo la cantidad y calidad de los nopalitos a partir de 5 deciSiemens/m (dS m⁻¹) (Murillo-Amador y Cortés-Ávila, 2003).

LITERATURA CITADA

- Aguilar-García, M. de J. (2003). La familia de las Cactáceas. In: El Nopal. Alternativas para la agricultura de zonas áridas en el siglo XXI. Murillo A., B., E. Troyo D., & J. L. García H. (Eds.). Editorial Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz B.C.S. México. pp. 3-18.
- Alvarado, S., L. (1978). Fisiología y bioquímica del desarrollo del fruto del nopal tunero (*Opuntia amyklaes* Tenore). Tesis Maestría. Colegio de Postgraduados, México. 73 p.
- Arias, M., S. (1997). Distribución general. In: Suculentas mexicanas, Cactáceas. CVS Publicaciones S.A. de C.V. México. pp. 17-26.
- Arreola, N., H. J. (1997). Formas de vida y características morfológicas. In: Suculentas mexicanas, Cactáceas. CVS Publicaciones S. A. de C. V. México. pp. 27-35.
- Badii, M. H., & Flores, A. E. (2001). Prickly pear cacti pests and their control in Mexico. Florida Entomologist, 84, 503-505.
- Barbera, G., Inglese, F., & La Mantia, T. (1994). Influence of seed content on some characteristic of the fruit of cactus pear (*Opuntia ficus-indicus* Mill.). Scientia Horticulturae, 58, 161-165.
- Bravo-Hollis, H. (1978). Las cactáceas de México. Segunda edición. Volumen I. UNAM, México. 719 p.
- Bravo-Hollis, H., & Scheinvar, L. (1995). El interesante mundo de las cactáceas. Sección de obras de Ciencia y Tecnología. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Fondo de Cultura Económica. México. 231 p.
- Bravo-Hollis, H. (1997). Introducción. In: Suculentas mexicanas, Cactáceas. CVS Publicaciones S.A. de C.V. México. pp. 10-12.
- Conde, L., F. (1975). Anatomical comparisons of five species of *Opuntia* (Cactaceae). Annals Missouri Botanical Garden, 62, 425-473.
- Domínguez-Cadena, R. (2003). Aspectos Biológicos y Ecológicos de los nopales silvestres de Baja California Sur. In: El Nopal. Alternativas para la agricultura de zonas áridas en el siglo XXI. Murillo A., B., E. Troyo D., & J. L. García H. (Eds.). Editorial Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz B.C.S. México. pp. 49-68.
- Ezcurra, E. (1997). De árboles leñosos a suculentas espinosas. In: Suculentas mexicanas, Cactáceas. CVS Publicaciones S.A. de C.V. México. pp. 43-47.
- Felker, P., Bunch, R. A., & Guevara, J. C. (2009). Nuevos híbridos de *Opuntia lindheimerii* x *O. ficus indica* forrajeros sin espinas resistentes al frío. In: Memorias del VIII Simposium-Taller nacional y 1er Internacional. Producción y aprovechamiento del nopal. Vázquez Alvarado R. E., F. Blanco-Macías & R. Valdez-Cepeda (Eds.). Universidad Autónoma de Nuevo León. México. pp. 49-57.
- Flores-Hernández, A. (2003). Bioquímica del nopal (*Opuntia* spp). In: El Nopal. Alternativas para la agricultura de zonas áridas en el siglo XXI. Murillo A., B., E. Troyo D., & J. L. García H. (Eds.). Editorial Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz B.C.S. México. pp. 69-92.

- Flores-Hernández, A., & Reyes-Agüero, A. (2003). Clasificación taxonómica de nopal. In: El Nopal. Alternativas para la agricultura de zonas áridas en el siglo XXI. Murillo A., B., E. Troyo D., & J. L. García H. (Eds.). Editorial Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz B.C.S. México. pp. 19-25.
- González, D. A., Riojas, M. E., & Arreola, N. H. J. (2001). El género *Opuntia* en Jalisco. Guía de campo. Universidad de Guadalajara-CONABIO. México. 135 p.
- Hernández, R., L. (1978). Distribución del sistema radical del nopal (*Opuntia amyclaeae* Tenore) Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo. México. 115p.
- Lakshminarayana, S., & Estrella, I. B. (1978). Postharvest respiration behaviour of tuna (prickly pear) fruit (*Opuntia robusta* Mill). Journal of Horticultural Science, 53, 327-330.
- Luna, R. J. J. (2010). Ecofisiología del género *Opuntia* con énfasis en nopal (*Opuntia ficus indica*). In: Biotecnología para el semidesierto. Tópicos sobre el cultivo de nopal y maguey. Silos, E. H., L. L. Valera, M., C. Perales, S., A. Nava, C., J. Méndez, G., A. Amante, O., & D. Rossel, K. (comp.) Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes-Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí. México. pp 62-69.
- Mauseth, J. (1991). Anatomía de los cactus. Quepo, 5, 15-28.
- Mondragón, J. C., Fernández, M. R., Rodríguez, A. J., & Flores, V. C. (1995). Propuesta de descriptores para el registro de variedades de nopal. In: Memorias del VI Congreso Nacional y IV Congreso Internacional. Conocimiento y Aprovechamiento del nopal. E. Pimienta B., C. Neri L., A. Muñoz U. & F. M. Huerta M. (Comp.). Guadalajara, Jalisco, México. pp. 127-131.
- Murillo-Amador, B., & Cortés-Ávila, H. A. (2003). Efecto de la salinidad en la producción de nopal-verdura (*Opuntia ficus indica* L. Mill.). In: El Nopal. Alternativas para la agricultura de zonas áridas en el siglo XXI. Murillo A., B., E. Troyo D., & J. L. García H. (Eds.). Editorial Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz B.C.S. México. pp. 213-215.
- Nieto-Garibay, A. (2003). Ecología del Nopal. In: El Nopal. Alternativas para la agricultura de zonas áridas en el siglo XXI. Murillo A., B., E. Troyo D., y J. L. García H. (Eds.). Editorial Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz B.C.S. México. pp. 27-47.
- Nobel, S. P. (1995). Environmental Biology. In: Agroecology, cultivation and uses of cactus pear. FAO, Plant Production and Protection paper 132. Barbera, G., P. Inglese & E. Pimienta B. (Eds.). pp. 36-48.
- Nobel, S. P. (1998). Los incomparables agaves y cactus. Primera edición en español. Editorial Trillas, México. 211 p.
- Pimienta, B. E. (1990). El nopal tunero. Universidad de Guadalajara. México. 246 p.
- Pimienta-Barrios, E., & Muñoz-Urías, A. (1995). Domestication of *Opuntias* and cultivated varieties. In: Agroecology, cultivation and uses of cactus pear. FAO, Plant Production and Protection paper 132. Barbera, G., P. Inglese & E. Pimienta B. (Eds.). pp 58-63.

- Roberts, N. C. (1989). Baja California plant field guide. Natural History Publishing Company. La Joya. EE.UU. 309 p.
- Robles, E. F. J. (1987). Crecimiento y desarrollo del fruto (tuna) del nopal (*Opuntia ficus indica* (L) Miller) tunero. Tesis Licenciatura. Universidad Autónoma de Aguascalientes. México. 38 p.
- Sánchez-Mejorada, H. (1982). Consideraciones generales sobre la clasificación de las Cactáceas. Cactáceas y Suculentas Mexicanas, 27, 3-9.
- Sudzuki, H., F. (1995). Anatomy and Morphology. In: Agroecology, cultivation and uses of cactus pear. FAO, Plant Production and Protection paper 132. Barbera, G., P. Inglese & E. Pimienta, B. (Eds.). pp 28-35.
- Sutton, G. B., Ting, I. P., & Sutton, R. (1981). Carbohydrate metabolism of cactus in a desert environment. Plant Physiology, 68, 784-787.
- Turner, N. C., & Jones, M. M. (1980). Turgor maintenance by osmotic Adjustment: a Review and evaluation. In: Adaptations of plants to water and high temperature stress. Turner N. C. & P. J. Kramer (Eds.). John Wiley & Sons Inc. Australia. 496 p.
- Vázquez-Yanes, C. (1997). Extraordinarias administradoras de agua. In: Suculentas mexicanas, Cactáceas. CVS Publicaciones S. A. de C.V. México. pp. 49-54.

Selección del sitio y Plantación del Nopal



Panorámica de una huerta de nopal tunero en Zacatecas. Foto: Dr. Jaime Mena Covarrubias, INIFAP-CEZAC

Índice

	C	México, 1, 4, 6, 7, 8, 9, 14, 15, 18, 20, 28, 36, 37, 38, 40, 44, 46, 47, 48, 56, 64, 79, 80
Cactáceas, 79		
	E	
Especies, 40		
	L	
lindheimeri, 8, 18		
	M	
Metabolismo, 20		
	O	
		Opuntia, 8, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 44, 48, 49, 51, 54, 56, 64
	S	
		streptachantha, 18
	T	
		Tuna, 47

Sobre los compiladores



Dr. Ernesto González Gaona. Investigador Titular del Programa de Sanidad Forestal y Agrícola del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, adscrito al Campo Experimental Pabellón en Aguascalientes desde 1984, Miembro del SNII Nivel 1. Líneas de Investigación: Manejo orgánico biológico de plagas y enfermedades en Guayaba, Nopal, Vid, Maíz, así como plagas forestales con énfasis en defoliadores de la familia Diprionidae.



Dr. Leandris Argente Martínez. Profesor Investigador Titular C, del Tecnológico Nacional de México, Campus valle del Yaqui. Doctorado en Ciencias Biotecnológicas por el Instituto Tecnológico de Sonora. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 1. Profesor Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, Líder del Cuerpo Académico ITVAYA-CA-3. Línea de investigación: Agricultura sustentable, Fisiología, Bioquímica, Biología Celular y Molecular del estrés.



Dra. Lucila Perales Aguilar. Profesora Investigadora del Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, miembro del SNII candidata, con experiencia en biotecnología de plantas del semidesierto y remediación de suelos contaminados con metales pesados. Profesor con perfil deseable de la Secretaría de Educación Pública. Línea de investigación sobre Producción de Cactáceas y Agavaceas in vitro y remediación de suelos del semidesierto.



Dra. Ofelda Peñuelas-Rubio. Profesora Investigadora Titular C, del Tecnológico Nacional de México, Campus valle del Yaqui Doctorado en Ciencias Biotecnológicas por el Instituto Tecnológico de Sonora. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 1. Profesora Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, Miembro del Cuerpo Académico ITVAYA-CA-3. Línea de investigación: Agricultura sustentable, Fisiología, Bioquímica, Biología Celular y Molecular de sistemas terrestres y costeros.



Dr. Alberto Margarito García Munguía. Profesor Investigador Titular C, de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNII) Nivel 2. Profesor Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, Miembro del Cuerpo Académico Protección Vegetal. Línea de investigación: Manejo Integral de Plagas, Manejo de agroquímicos y biológicos, Autodiseminación de Entomopatógenos.



MC. Karla Vanessa De Lira Ramos. Investigadora Titular del Programa de Sanidad Forestal y Agrícola del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, adscrita al Campo Experimental Pabellón en Aguascalientes desde 2014. Líneas de Investigación: Manejo orgánico biológico de plagas y enfermedades en Guayaba, Nopal, Vid, Maíz, así como plagas forestales y resistencia a *Begomovirus* en Chile.



Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000

Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil

Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp)

<https://www.editorapantanal.com.br>

contato@editorapantanal.com.br