

¿Están los cactus preparados para escenarios de cambio climático?

Por: Ana Marta Francisco y Renny Sandoval
Investigadores del Centro de Ecología
Imágenes: José Ramos, Edgar Jiménez

En el escenario del cambio climático, investigar sobre los mecanismos que permitan a las especies animales y vegetales sobrellevar, tolerar y responder a estos cambios, debe ser el objetivo *sine qua non*.

El estudio de los mecanismos que permiten a las especies, y en este estudio nos referiremos a especies vegetales, resistir a la sequía son imprescindibles ante los ya presentes cambios en el clima. Grandes inundaciones o, por el contrario, extensos periodos de sequía en regiones del mundo donde estos fenómenos naturales no eran frecuentes, ya están formando parte del paisaje.

En el caso de las grandes sequías, aquellas que van más allá de la estacionalidad climática, vienen asociadas con el aumento en las temperaturas y una mayor incidencia lumínica. Todos estos factores abióticos, representan el mayor estrés para la supervivencia de las plantas y una reducción de la productividad de los cultivos. Esto, por supuesto, redonda en menor producción agrícola y pecuaria y, por lo tanto, en una menor disponibilidad de alimentos, en un mundo donde cada vez hay mayor población humana.

Las plantas de regiones áridas o ambientes estacionalmente secos tiene una constante dicotomía entre abrir los estomas para adquirir el CO₂ atmosférico necesario para la fotosíntesis, con el costo de una pérdida importante de agua frente a una escasez de la misma, o por el otro lado un cierre estomático, reducción del tamaño foliar y hasta una eliminación y sustitución





de hojas por espinas, reduciendo así la evaporación del agua, pero también implica la disminución de la fotosíntesis por no poder asimilar el carbono atmosférico, y con ello ocurre una merma en la productividad.

En ambientes áridos, la carencia de materia orgánica en los suelos, nos llevan a pensar que debe existir una eficiente forma de combinar los factores abióticos y bióticos que conduzcan a la descomposición de los elementos minerales, que serán los nutrientes necesarios para el establecimiento y permanencia de las especies que allí habitan. La actividad microbiana actúa eficientemente en la descomposición de tejidos que forman los esqueletos de plantas que mueren, y esta forma biológica de mineralización es primordial para la disponibilidad de sales, principalmente de fosfatos y carbonatos.

La presencia y acumulación de cristales de oxalato de calcio ha sido un tema de interés desde hace décadas y que aún sigue vigente, considerando la presencia y acumulación de los cristales por diversos orígenes y con posibles distintas funciones, tales como: alta capacidad de secuestrar el calcio del suelo, factor de regulación osmótica en el balance iónico, factor quelatante en la detoxificación con metales pesados, colectores y reflectores de luz y repelentes de la herbivoría.

Un grupo de plantas que han evolucionado en ambientes con severa escasez de agua, alta intensidad lumínica y elevadas temperaturas, son los llamados cactus. Las familias del orden *Caryophyllales*, entre ellas las *cactáceae*, se caracterizan por la elevada acumulación de oxalato de calcio (CaC_2O_4) en sus tejidos, llegando a alcanzar $>50\%$ de su peso seco. Especies de estas familias han sido denominadas como “plantas de oxalato”.

Muchas especies de *cactáceae* crecen en ambientes áridos y semiáridos costeros en América tropical y subtropical, con substratos generalmente ricos en carbonato de Ca. Es de esperar, por lo tanto, una elevada concentración de Ca en los tejidos de estas plantas, ya que no producen órganos deciduos, de manera que la acumulación de Ca “debería ser continua” durante toda la vida de la planta. Por otra parte, elevadas concentraciones de Ca soluble pueden ser favorables en ambientes secos si este ion actúa como agente osmótico en la vacuola, pero pueden tener efectos tóxicos, entre otras causas, por la perturbación de procesos metabólicos asociados con la alcalinización del citoplasma y procesos de transporte intracelular; sin embargo, el proceso de cristalización del calcio,

en forma de oxalatos de Ca, atrapa este posible exceso del elemento inmovilizándolo hasta su requerimiento por diversos procesos.

La cristalización en forma de oxalatos también ha sido caso de estudio, ya que se ha comprobado una especificidad de la molécula de esta sal según el grupo taxonómico. Esto es, cristales de whewelita ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), oxalato de calcio monohidrato, que caracteriza al grupo de las *Opuntioideae* y weddelita ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que es el oxalato de calcio dihidratado, presente en las *Cereoideae*.

En todas las plantas, existen diversos tejidos con distinta función y constitución, y los cactus no son diferentes. Tejidos de cactáceae de ambientes áridos en California (EE. UU.) mostraron variaciones marcadas en la concentración total de Ca en el clorénquima (rango 422-1522 mmol/kg), y el cociente clorénquima/hidrénquima de concentración de Ca varió entre 2,4 y 0,6, mientras que para la concentración de K varió entre 0,3 y 1,1 (Nobel 1986).

En este trabajo hicimos un estudio de algunas de las cactáceae considerando diferentes formas de vida: columnares (*Cereoideae*), opuntias (*Opuntioideae*), y epifitas (*Hyllocereae*) presentes en la zona de la región norte costera de Venezuela, estas fueron Cerro Rojo (Cr), edo. Anzoátegui, y en la región de Macanao (Ma) de la isla de Margarita, edo. Nueva Esparta.

Analizamos en las especies columnares, la distribución longitudinal de nutrientes y compuestos estructurales, considerando tres (3) regiones: punta, medio y base, de acuerdo con la columna principal, con fragmentos de 20-30 cm de longitud, y a su vez con relación a sus tejidos, el clorénquima, tejido fotosintético, el más externo y de color verde, y el tejido interno, de coloración blanquizca y con mayor contenido de agua, denominado hidrénquima. Los análisis iónicos realizados (absorción atómica, Varian B6) tanto en el clorénquima (externo), y el hidrénquima (interno) muestran diferencias considerables entre los iones Na, K, Ca y Mg, de los distintos tejidos.

Los resultados de los análisis de ligninas, celulosa, fibras, compuestos solubles y cenizas (Van Soest y Wine 1967) corroboran la diferenciación existente a lo largo de la columna. Mientras las fibras (Figura 1), celulosa (Figura 2) y ligninas (Figura 3), incrementan de la punta a la base, lo contrario ocurre con el % de compuestos solubles (Figura 4) y cenizas (Figura 5), donde la mayor acumulación es hacia la punta. Esto se explica porque en las bases son tejidos de mayor

edad, han acumulado fibra y celulosa, al punto de ser casi leñosos, lo cual permite sostener el gran peso de estas plantas, por el agua acumulada y a la vez la flexibilidad que requieren esas columnas para no quebrarse. Hacia las puntas se encuentra la mayor concentración de sales minerales, donde las sales de calcio, son las de mayor proporción. Esto se refleja al determinar el % de cenizas, donde el oxalato de calcio representa la mayor proporción.

Stenocereus griseus



Figura 1

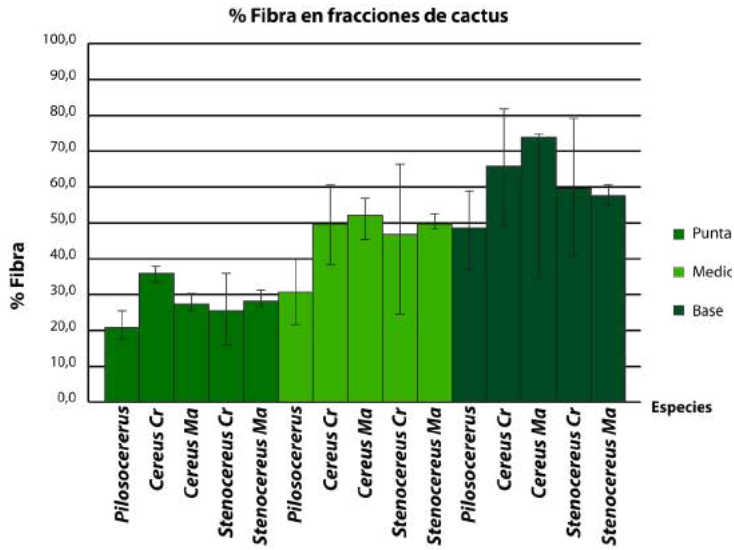


Figura 2

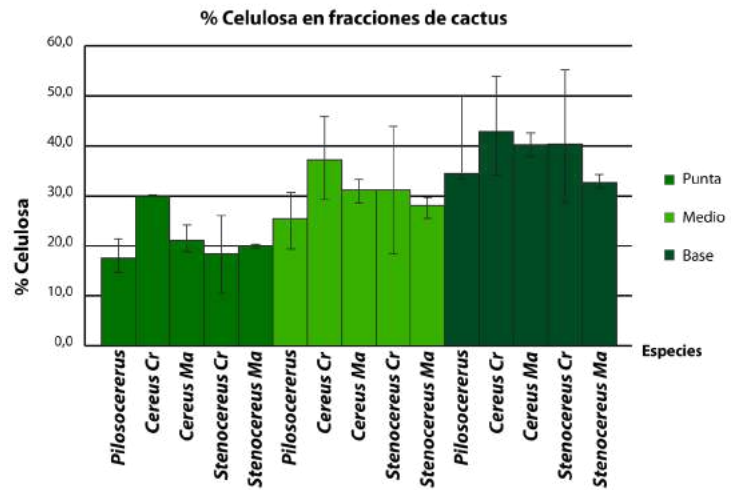


Figura 3

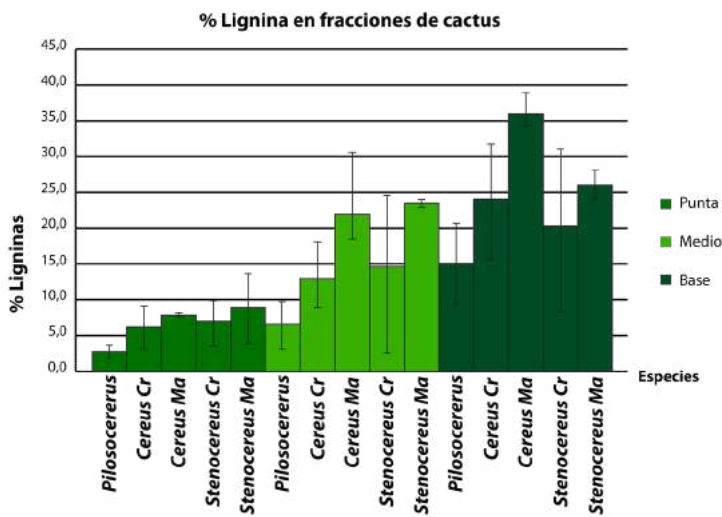


Figura 4

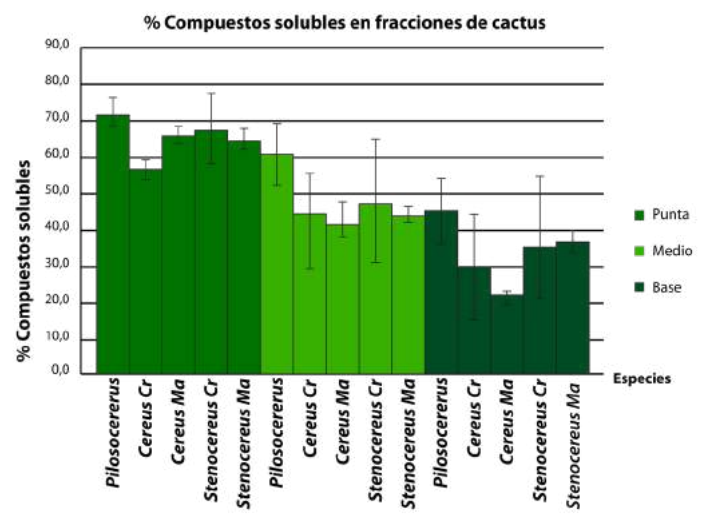
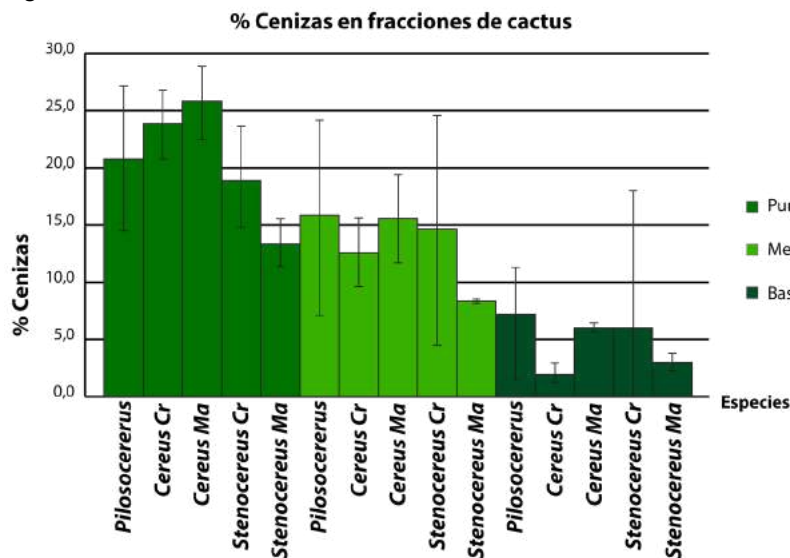


Figura 5



Con la separación de los tejidos, el clorénquima, que es el tejido fotosintético, y en el “hidrénquima”, donde se encuentran las reservas minerales, se encontraron, como se dijo anteriormente, diferencias significativas de las concentraciones iónicas, y en este caso particularmente de calcio. Estas diferencias fueron evidentes en las especies columnares y la *opuntioide*, donde se hizo la separación de tejidos, e indica la importancia de hacer las consideraciones pertinentes en los análisis,

porque los resultados pueden variar de forma importante.

La Tabla 1 muestra los resultados de concentración de elementos totales (Ca, K, Mg, y Na), según el tipo de tejido, y se puede observar en la Tabla 2 los cocientes molares Ca/K, Ca/Mg y -/Na.

La mayor concentración de K, Na y Mg en el hidrénquima con respecto al clorénquima contribuyen al carácter suculento de las

TABLA 1

Concentración total de los elementos (mmol/kg)

ESPECIES TERRESTRES	TEJIDO	Ca	K	Mg	Na
<i>Cereus hexagonus</i> (L.) Mill. Cactoideae, Cereae	CLORENQUIMA	1420	153	382	19
	HIDRENQUIMA	598	1446	1900	134
<i>Cereus cf. repandus</i> (L.) Mill. (<i>Subpilocereus repandus</i>) Cactoideae, Cereae	CLORENQUIMA	911	214	285	7
	HIDRENQUIMA	580	1403	728	24
<i>Stenocereus griseus</i> (Haw.) Buxb. Cactoideae, Cereae	CLORENQUIMA	454	320	307	41
	HIDRENQUIMA	1218	2202	580	219
<i>Opuntia cf. ficus indica</i> (L.) Mill. Opuntioideae, Opuntieae	CLORENQUIMA	1721	229	433	359
	HIDRENQUIMA	1165	580	566	884
ESPECIE EPIFITA-TREPADORA					
<i>Opuntia cf. ficus indica</i> (L.) Mill. Opuntioideae, Opuntieae	CLORENQUIMA	787	491	413	100
	HIDRENQUIMA	972	1437	848	370

especies. El cociente Ca/K se utiliza como indicativo de "calciotrofia", es decir que las plantas son acumuladoras de calcio, cuando el valor es >1, y por el contrario se habla de plantas "calciofobas" cuando Ca/K <1 (hay más potasio K, que calcio Ca). En las especies estudiadas todos los cocientes, particularmente del tejido fotosintético, es decir, clorénquima, el Ca/K >1, en *Opuntia* ambos tejidos son >1. De esta manera se corrobora la importancia de hacer tales consideraciones al analizar un determinado

tejido (Tabla 2) y la variación entre especies. El cociente K/Na, indica el carácter halofítico. Esto es la tolerancia a la salinidad (K/Na < 1), en el caso de la Opuntioide, y haloresistencia cuando K/Na >1. En todas las especies, menos en *Opuntia* a pesar a su proximidad con el frente marino, los valores fueron >>1.

Estudios recientes han demostrado oscilaciones diurnas en la concentración y tamaño de los cristales de oxalato de calcio, en especies

TABLA 2

Cocientes molares

ESPECIES TERRESTRES	TEJIDO	Ca/K	Ca/Mg	K/Na
<i>Cereus hexagonus</i> (L.) Mill. Cactoideae, Cereae	CLORENQUIMA	9,30	3,72	8,25
	HIDRENQUIMA	0,41	0,31	10,78
<i>Cereus cf. repandus</i> (L.) Mill. (<i>Subpilocereus repandus</i>) Cactoideae, Cereae	CLORENQUIMA	4,26	3,20	30,40
	HIDRENQUIMA	0,41	0,80	57,44
<i>Stenocereus griseus</i> (Haw.) Buxb. Cactoideae, Cereae	CLORENQUIMA	1,42	1,48	7,74
	HIDRENQUIMA	0,55	2,10	10,04
<i>Opuntia cf. ficus indica</i> (L.) Mill. Opuntioideae, Opuntieae	CLORENQUIMA	7,51	3,97	0,64
	HIDRENQUIMA	2,01	2,10	0,66
ESPECIE EPIFITA-TREPADORA				
<i>Hylocereus lemairei</i> (Hook) Britton & Rose Hylocereeae	CLORENQUIMA	1,60	1,10	4,92
	HIDRENQUIMA	0,68	1,15	3,88

sometidas a estrés hídrico. Con disminución durante el día y recuperación en horas nocturnas. Esto indica la utilización de los cristales de oxalato de calcio como fuente de carbono endógena, evitando pérdida de agua por apertura estomática, a través de reacción enzimática de un oxalato oxidasa, enzima que provee el CO₂, sin pérdida por transpiración. Esta vía alterna propuesta de la fotosíntesis, denominada “fotosíntesis de alarma” (Tooulakou *et al.* 2016), podría ser el factor clave en plantas acumuladoras de calcio, bajo condiciones de estrés hídrico y térmico. Considerando que ambos factores climáticos son determinantes en la supervivencia de especies tanto silvestres como de cultivos, ante los ya presentes escenarios de cambio climático, y que las cactáceas columnares de gran porte, contienen grandes concentraciones de calcio en forma insoluble (oxalatos), y que a su vez contribuyen con grandes cantidades de calcio al suelo una vez que senecen, y aportan al retorno de nutrientes en las zonas áridas. De esta manera, podríamos proyectar a las cactáceas como plantas ya preparadas para enfrentar estos cambios climáticos.

Referencias

Garvie LA (2003) Decay-induced biomineralization of the saguaro cactus (*Carnegiea gigantea*). *American Mineralogist* 88:1879-1888.

Nobel PS (1986) Relation between monthly growth of *Ferocactus acanthodes* and an environmental productivity index. *American Journal Botany* 73:541-547.

Tooulakou G *et al.* (2016) Alarm Photosynthesis: Calcium Oxalate Crystals as an Internal CO₂ Source in Plants. *Plant Physiology* 171(4):2577-2585. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00111>

Van Soest PJ & Wine RH (1967) Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds. IV. Determination of Plant Cell-Wall Constituents. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists* 50(1):50-55.



Hylocereus lemairei