



Consejo de  
Universidades  
Mexicanas

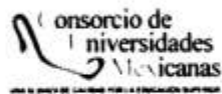
Cátedra Nacional de Biología  
(2008)  
"Juan Luis Cifuentes Lemus"

**Biología de la  
conservación  
II. Ecología**

Cuerpo Académico de Ecología-UAEH  
*coordinación*



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo



COMPILADORES

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Centro de Investigaciones Biológicas  
Cuerpo Académico de Ecología  
Iriana Leticia Zuria Jordan (Coordinadora)  
Ignacio Esteban Castellanos Sturemark  
Claudia Elizabeth Moreno Ortega  
Raúl Ortiz Pulido  
Numa Pompilio Pavón Hernández  
Aurelio Ramírez Bautista  
Alberto Enrique Rojas Martínez  
Gerardo Sánchez Rojas

EDICIÓN Y DISEÑO

Gerardo Sánchez Rojas  
Juan Carlos Gaytán Oyarzún



UACJ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Luis Gil Borja

*Rector*

Humberto A. Veras Godoy

*Secretario General*

Otilio Acevedo Sandoval

*Coordinación de la División de Investigación y Posgrado*

Marco Antonio Alfaro Morales

*Coordinador de la División de Extensión de la Cultura*

Octavio Castillo Acosta

*Director del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería*

Alberto Enrique Rojas Martínez

*Jefe del Área Académica de Biología*

Enrique Rivas Paniagua

*Director de Ediciones y Publicaciones*

Abel L. Roque López

*Subdirector de Ediciones y Publicaciones*

CONSORCIO DE UNIVERSIDADES MEXICANAS (CUMex)

Luis Gil Borja

*Presidente*

Enrique Espinosa Aquino

*Coordinador General*

Portada: Ambiente contaminado. Fotografía: Raúl Ortiz Pulido

Primera edición: 2009

© Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Abasolo 600, Centro, Pachuca, Hidalgo, México, CP 42000

editor@uaeh.edu.mx

© Consorcio de Universidades Mexicanas (CUMex)

Abasolo 600, Centro, Pachuca, Hidalgo, México, CP 42000

www.cumex.org.mx

ISBN 978-607-482-051-5

---

## X. CAMBIO CLIMÁTICO: IMPLICACIONES EN LOS ECOSISTEMAS ÁRIDOS

Numa P. Pavón

Cuerpo Académico de Ecología, Laboratorio de Ecología de Comunidades,  
Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.  
npavon@uaeh.edu.mx

### **Introducción**

El protocolo de Kioto (1997) y recientemente el panel intergubernamental del cambio climático han considerado que el incremento de la población humana, las necesidades y uso de recursos, la industria y las emisiones de combustibles fósiles, han provocado un cambio ambiental global. Actualmente se sabe que la concentración de CO<sub>2</sub> se ha incrementado de 315 ppm a 362 ppm, producto de 5.500 millones de toneladas métricas que anualmente se añaden a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles. Además, se ha incrementado a 230 millones de toneladas métricas de nitrógeno al año, el doble de las que pueden fijarse biológicamente. Entre los principales efectos de este fenómeno se destaca un cambio climático global derivado de un incremento de la temperatura del planeta, la transformación del uso del suelo, la extinción masiva de la biodiversidad y cambios en los ciclos biogeoquímicos. El cambio global antrópico es un fenómeno que, a diferencia de los cambios naturales anteriormente mencionados, ha sido provocado e iniciado hace aproximadamente 100 años y está ocurriendo de manera acelerada. A pesar de su importancia, poca certidumbre existe sobre las consecuencias del cambio global en la vida en el planeta; los pronósticos, sin embargo, son pesimistas, principalmente para la vida humana.

En este ensayo se discuten algunas aproximaciones que se han realizado para el estudio de los efectos del cambio climático en los ecosistemas, enfocándose a las zonas áridas.

### **El origen**

Después de observar una fotografía enviada desde el Voyager a una distancia aproximada de 6,500 millones de kilómetros, Carl Sagan (1994) describió poéticamente

a la Tierra como una partícula de polvo que danza en el espacio (*pale blue dot*). Esta fotografía es quizá la máxima escala espacial desde la cual podemos distinguir nuestro planeta. A esa escala es imposible distinguir la principal característica de la Tierra que la hace única: ¡la vida! Tanto el Universo como la vida en la Tierra han tenido un génesis, el primero hace aproximadamente 15 mil millones años y la otra hace alrededor de 3,500 millones de años.

Muy diversas situaciones permitieron el desarrollo de la vida en la Tierra, que incluso podrían considerarse, por un lado, casualidades, y por el otro, causalidades. Entre las primeras está la posición de los planetas en el sistema solar, donde Júpiter, por ejemplo, debido a la gravedad que provoca, evita que un mayor número de objetos estelares choquen con nuestro planeta. Y entre las segundas, una red de interacciones complejas tuvo como efecto el que la vida misma se abriera paso, generando las condiciones propicias para su desarrollo.

En el inicio, y por cerca de 1,500 millones de años, la vida se dio únicamente bajo el agua. Durante ese periodo la atmósfera estuvo saturada por dos gases: el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), productos de la continua actividad volcánica. Aunque los primeros organismos (bacterias) ya excretaban oxígeno, éste no se liberaba a la atmósfera porque en su totalidad reaccionaba oxidando el hierro oceánico, formando inmensos depósitos de hierro. No es hasta hace aproximadamente 1,800 millones de años que el oxígeno se liberó en la atmósfera. Esto representó el paso más importante para el desarrollo de la vida en la superficie del planeta, ya que por reacciones fotoquímicas el oxígeno se transformó en ozono. El ozono se acumuló formando una capa que "casualmente" filtra la radiación ultravioleta, la cual es dañina para la vida. Además, el incremento de oxígeno en la atmósfera generó un cambio en el metabolismo de los organismos hacia la respiración oxidativa, la que permitió la colonización de la tierra emergida de los océanos. Durante cientos de millones de años de proceso evolutivo se desarrolló una considerable diversidad de organismos con diferentes estrategias de supervivencia y reproducción; entre ellos, las plantas jugaron un papel predominante en la transformación de la composición atmosférica, incrementando el oxígeno y capturando  $\text{CO}_2$ . El dióxido de carbono se fijó en biomasa y la acumulación de ésta en depósitos donde parcialmente se mineralizó, dio origen a los hoy conocidos combustibles fósiles. Es así como la atmósfera pasó de 0% de oxígeno a 21%, y de 12% de dióxido de carbono a 0.035 por ciento.

## **Cambio ambiental global**

Espacialmente la Tierra cumple ciclos planetarios que sin duda alguna generan cambios en las condiciones ambientales a todas las escalas. Tres de los principales ciclos ocurren con diferentes periodicidades que van desde 19 mil hasta 400 mil años. Un ciclo, que ocurre cada 19 mil a 23 mil años, es el “bamboleo” del inclinado eje giratorio de la Tierra, tal cual un trompo inestable. Otro ciclo, de aproximadamente 41 mil años, es el cambio de inclinación del eje giratorio que aumenta y después vuelve a disminuir. Y finalmente, un ciclo que tarda de 100 mil a 400 mil años es la expansión de la órbita de la Tierra alrededor del Sol; ésta se expande y se contrae entre trayectorias circulares y elípticas.

Otro fenómeno que genera cambios ambientales de igual magnitud pero de origen único y reciente, es el llamado cambio ambiental global antrópico. Parte fundamental del cambio global lo representa el cambio climático, por lo que para entender esto es necesario partir del concepto de clima. El clima es un modelo de la realidad (es decir, una invención humana) que se define como las condiciones promedio de la atmósfera en un lugar determinado. Existen diversos sistemas de clasificación climática, como el de Holdridge y el de Köppen, que tienen a la temperatura y la precipitación como elementos fundamentales de clasificación. La distribución de la lluvia y las variaciones de temperatura en la Tierra son resultado de un sinnúmero de factores, entre los que destacan la latitud, la altitud, la orografía, la cercanía con masas de agua, etc. Es posible que en conjunto la precipitación y la temperatura formen tantas condiciones como sitios en la Tierra, y por eso el concepto de clima permite identificar condiciones similares (mas no iguales) entre sitios, independientemente de la distancia entre ellos. Considerando lo anterior, es de suponer que un incremento global de la temperatura de 1.5°C (incremento más conservador pronosticado para los próximos 100 años, derivado del cambio ambiental global) provocará cambios significativos en el clima de los diferentes sitios y, con estas variaciones importantes, en los regímenes pluviales.

Bajo este aspecto, los fenómenos del Niño y la Niña, derivados de variaciones en la temperatura oceánica, están provocando cambios importantes en la precipitación y un incremento de la potencia de otros fenómenos meteorológicos como los huracanes. El Niño es un fenómeno que está ocurriendo con mayor frecuencia en los años recientes, con una periodicidad de entre dos y diez años, mientras que la Niña ocurre generalmente después de un Niño. Por otro lado, recientemente se ha documentado que existen ciclos de mayor periodicidad y que influyen en la intensidad del Niño y la Niña:

son el Viejo y la Vieja, que ocurren aproximadamente en intervalos de 50 años. Cuando existe un Viejo, los eventos del Niño son más intensos que si ocurrieran en un periodo de la Vieja; lo contrario ocurre para la relación entre la Vieja y la Niña.

### **Aproximaciones para el estudio de los efectos del cambio climático**

De acuerdo con la RED MEX-LTER (Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo) son tres los enfoques principales para el estudio del cambio climático y su impacto en los ecosistemas: I) seguimiento de las variables clave para la detección de los cambios en el clima; II) utilización de modelos de simulación que puedan acoplar variables biogeoquímicas, de uso del suelo y atmosféricas; y III) utilización de experimentos en que se incluya de manera explícita la manipulación de variables climáticas específicas.

Por desgracia, el primer enfoque ha sido muy limitado debido a las condiciones sociales, económicas, políticas y científicas de los países del mundo. Por ejemplo, aunque en México se tiene distribuido a lo largo del país un gran número de estaciones meteorológicas para el registro de temperatura, precipitación y evaporación, la realidad es que en la mayor parte de ellas no se toman adecuadamente estos registros. La mayoría de las estaciones tienen menos de 50 años de establecimiento y generalmente hay muchos datos faltantes, incluso años completos sin datos. Lo anterior es reflejo del personal poco capacitado —y frecuentemente sin paga— que tiene la responsabilidad de las estaciones. Al parecer estas condiciones son un común denominador de los países en desarrollo (la gran mayoría del total mundial), y así, la detección local de los cambios climáticos en los diferentes sitios del planeta es una tarea imposibilitada, al menos en la mayoría de los casos.

La utilización de modelos de simulación ha surgido como un *boom*, con aproximaciones muy interesantes del impacto del cambio climático en los sistemas biológicos. Sin embargo, estos modelos están limitados por dos aspectos fundamentales: la tecnología y los datos con que se alimentan estos modelos. Sin lugar a dudas, la tecnología avanza muy rápidamente y cada vez se desarrollan modelos de simulación de mayor precisión, cuyo principal reto es disminuir la escala espacial del pronóstico. Esto no es trivial cuando las decisiones se toman en la realidad a una escala local. Por otra parte, la precisión de los pronósticos derivados de los modelos depende en gran medida de los datos de los que se alimentan. Éstos son los que en un principio deben evaluarse en cuanto a su “calidad”, es decir, a la precisión con que fueron tomados, información de la que, en la mayoría de los casos, se carece.



Un modelo muy interesante porque considera un buen número de variables ambientales y biológicas, es el de la dinámica global de la vegetación (Woodward *et al.*, 2001). Entre otras variables, este modelo considera las tendencias de precipitación y temperatura, la productividad primaria neta, la toma de nitrógeno (modelo Century), la fotosíntesis, la transpiración de hojas, la conductancia estomática, la conductancia del dosel, el intercambio gaseoso del dosel, la toma de agua del suelo y las tendencias de concentración de CO<sub>2</sub>. En resumen, el modelo prevé para el año 2090 un incremento significativo de la productividad primaria neta en las zonas de altitudes medias y altas; con ello, la disminución de las zonas desnudas, la transformación de los bosques de coníferas en bosques mixtos y el incremento de matorrales en zonas desérticas. En una escala espacial menor, considerando el territorio de México, Villers y Trejo (2004) realizaron simulaciones de vulnerabilidad de ecosistemas al cambio climático. Su trabajo mostró un posible desplazamiento de bosques templados de coníferas y encinos, pastizales de alta montaña y matorrales con afinidades templadas, por vegetación con especies de afinidades más cálidas y xéricas. La crítica más importante a estos pronósticos es que sólo consideran las variaciones climáticas y no el conjunto de condiciones, recursos e interacciones ambientales para su establecimiento. Es decir, aunque un primer filtro en la distribución de las especies lo representa el clima (mejor dicho, los elementos del clima), existen otros factores, quizá de igual importancia, como el suelo, que influyen directamente en el establecimiento, supervivencia y reproducción de las plantas.

Bajando aún más la escala espacial a una zona semiárida del país, en la barranca de Metztlán, Hidalgo, se realizaron simulaciones climáticas usando dos modelos de cambio climático: el Inglés HadCM3 y el Americano GFDC-R30 (Tinoco *et al.*, 2007). Los resultados indicaron un incremento de la aridez, lo que indica que habrá para el año 2050 una fuerte presión para la conservación de los bosques templados de la zona. El problema de este trabajo son los datos de precipitación y temperatura usados para trazar las isotermas e isoyetas, ya que las estaciones meteorológicas de la zona carecen de un gran número de datos. Conozco las estaciones y dudo de la calidad de los datos; por ejemplo, la estación de Metztlán está ubicada en la azotea de una casa dentro del pueblo, lo cual va en contra de las especificaciones mínimas para colocar una estación meteorológica.

Una herramienta de gran impacto para la simulación del cambio climático en la distribución espacial de las especies han sido los modelos basados en nicho ecológico, por ejemplo BIOCLIM y GARP. Usando BIOCLIM, Telles y Dávila (2003) simularon la



distribución de 20 especies de cactáceas en la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán dentro de los estados de Puebla y Oaxaca. Los autores simularon la distribución de las cactáceas bajo diferentes escenarios, como incremento de 1°C y 2°C y disminución de la precipitación de 10% y 15%. Gran parte de las especies disminuiría su distribución bajo los escenarios del cambio climático; sin embargo, en el caso de *Echinocactus platyacanthus* los incrementaría 21% y en *Pachycereus weberi* 170%, ambos bajo el escenario de un incremento de 1°C y una disminución de 10% de lluvia. Como mencioné anteriormente, estos modelos no consideran otros factores, entre ellos el suelo, el cual sabemos que es crucial para el establecimiento de estas plantas. Además, no se toma en cuenta la presencia de especies nodrizas de igual manera importantes para el establecimiento de cactáceas. Por lo anterior, es recomendable que simultáneamente se simule la distribución de especies que interactúan de forma directa.

Sin desacreditar la importancia de realizar simulaciones a partir de modelos, éstos deben tomarse como tales y no considerarlos actos de fe y creerlos como verdaderos. En el mejor de los casos, la validación de los modelos de los efectos del cambio global se ha realizado matemáticamente; es necesario entonces poner a prueba estos modelos de manera experimental. Combinar la simulación y la experimentación.

No debemos dejar a un lado que los ecosistemas son complejos, por lo que predecir escenarios futuros no es tarea nada fácil. Los experimentos ecológicos a largo plazo son esenciales para comprender en el campo la respuesta de las especies y el sistema a la variación ambiental. En el sur del desierto de Atacama, en Chile, se lleva a cabo un experimento a largo plazo de más de 18 años; gracias a esto se ha logrado evaluar el impacto de fenómenos como el Niño en los ecosistemas áridos y semiáridos. El Niño en la zona actúa a manera de *switch* entre controles *top-down* y *bottom-up*, como procesos alternos en la estructura de la comunidad. A la fecha no existen en nuestro país ejemplos de experimentos como el anterior. Sin embargo, se han realizado estudios que permiten entender la respuesta de los desiertos a estos eventos. En México, a diferencia de Sudamérica, cuando ocurre un evento del Niño se presenta una fuerte sequía intraestival o canícula, y cuando ocurre el evento opuesto (la Niña) se registran altas precipitaciones, al menos en la zona centro del país. Durante el evento del Niño de 1997, registré en la reserva de Tehuacán-Cuicatlán la sequía de verano más intensa reportada para la zona; y en septiembre de 1998, con la influencia de la Niña, una precipitación de 300 mm que equivale a cerca del 70% de lo que se registra en promedio en el año para la estación meteorológica de Zapotitlán de las Salinas, ubicada en la misma reserva.

### **Estudios de caso en ecosistemas áridos de México**

Mediante estudios ecológicos que hemos realizado en los matorrales semiáridos de la reserva de Tehuacán-Cuicatlán, sabemos de la relación directamente proporcional que existe entre la precipitación y la productividad primaria (aérea y subterránea), de modo que cuando ocurrió la sequía de 1997 observamos una marcada disminución de la productividad tanto aérea como de raíces. Esto puede tener implicaciones importantes en la dinámica trófica del ecosistema, ya que la biomasa vegetal es la base de la cadena. Además, registramos la carencia y/o disminución de estructuras reproductivas de las especies de arbustos dominantes del matorral, por lo que ciertos recursos (como el néctar) se ven disminuidos para los herbívoros.

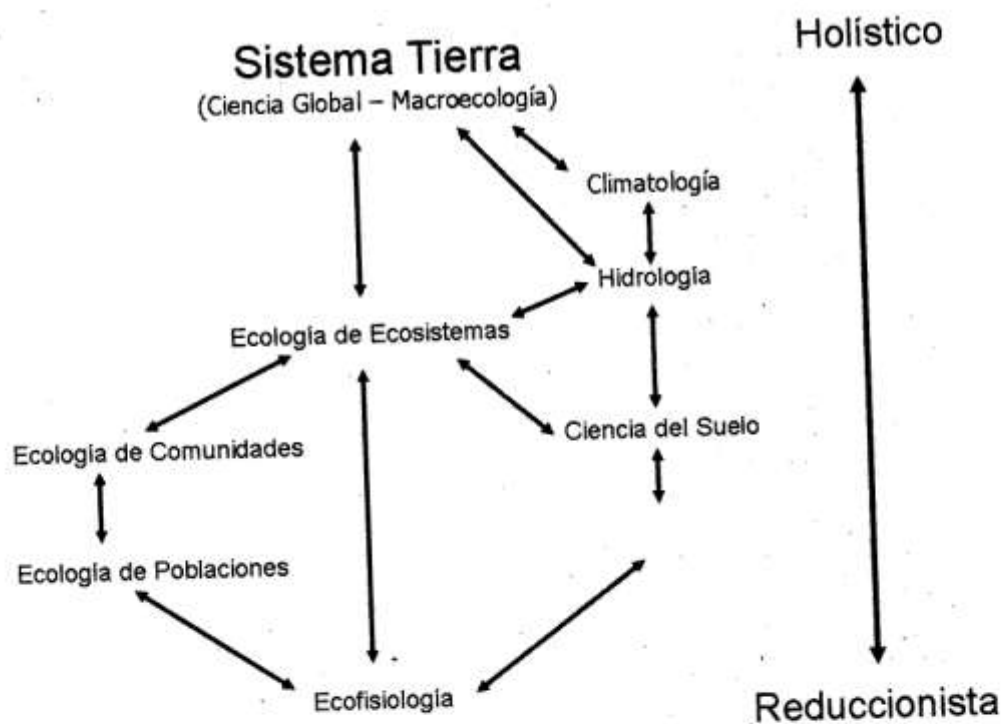
A más largo plazo, los regímenes de precipitación modulan la fenología reproductiva de las especies dominantes de los matorrales. En la reserva de Tehuacán-Cuicatlán se registran dos épocas bien marcadas: la de lluvias y la de secas. Esta periodicidad en las lluvias ha modulado diferentes patrones fenológicos reproductivos en las especies dominantes del matorral crasicaule de Zapotitlán de las Salinas, donde hay especies que generan estructuras reproductivas previamente, durante y después de la estación de lluvias (mayo-octubre) y sólo unas pocas, como *Castella tortuosa*, durante todo el año. Así, un cambio importante de los regímenes de precipitación, tanto en periodicidad como en intensidad y magnitud, puede modificar la estructura de la comunidad y los flujos a través del ecosistema.

Otro fenómeno importante derivado del cambio global es la alta deposición de nitrógeno en el suelo. En los 150 años recientes se ha incrementado la deposición de nitrógeno inorgánico en 230 millones de toneladas métricas. Considerando la hipótesis de que esto incrementará la productividad primaria, se especula que el efecto es positivo. Sin embargo, poco se sabe del efecto que podría tener esta deposición en ecosistemas naturalmente pobres en nitrógeno. En estos sitios, por lo regular ecosistemas desérticos, las plantas se han adaptado a estas condiciones de escasez de nutrientes, en especial de nitrógeno. Es así como las especies dominantes de los matorrales son principalmente leguminosas, las cuales pueden obtener nitrógeno fijado biológicamente por bacterias que viven en sus raíces. En la reserva de la biosfera Barranca de Metztitlán realicé experimentos para evaluar el efecto de la deposición de nitrógeno en la producción de raíces en las dos formas de vida características del matorral crasicaule: las cactáceas y los arbustos. Los resultados indicaron que la mayor producción de raíces ocurre en el suelo nativo; pero si éste se "enriquecía" con nitrógeno (simulando la deposición), la producción decrecía significativamente. Al

parecer, un exceso de nitrógeno en el suelo en estos ambientes podría ser tóxico para las raíces de las plantas, donde las cactáceas serían las más perjudicadas. Estos resultados muestran que los modelos de simulación basados en hipótesis —como la de que el incremento de nitrógeno en el suelo aumentaría la productividad primaria— deben ser tomados con mucho cuidado y evitar hacer generalizaciones, ya que no todos los sistemas responden de la misma forma.

### **Conclusiones**

El cambio climático es un hecho cuyas consecuencias están ocurriendo de manera continua. Sin embargo, la respuesta de los ecosistemas a este cambio aún es poco predecible y los pronósticos derivados de simulaciones practicadas a la fecha son demasiados generales y lineales. Es necesario realizar una síntesis del conocimiento ecológico que permita identificar huecos necesarios de cubrir para establecer escenarios futuros derivados del cambio climático, por lo que la experimentación en proyectos a largo plazo es esencial para establecer tendencias y respuestas a diferentes niveles ecológicos, desde las poblaciones hasta las comunidades. No debemos pasar por alto que el conocimiento ecológico obtenido en un nivel de complejidad ecológico no es lo suficientemente preciso para contestar preguntas en otro nivel o escala de integración; es decir, la información de la fotosíntesis de una muestra de hojas en una muestra de individuos de una especie vegetal no puede predecir con precisión la productividad primaria de una región o bioma, y de igual manera los parámetros a nivel global o ecosistémico no pueden predecir la respuesta a un cambio ambiental en la demografía de la población de una especie. Mientras que en el primer caso aumentamos la generalización, en el segundo invocamos el reduccionismo (*Figura 1*).



**Figura 1.** Niveles de complejidad ecológica y relación con otras ciencias en un contexto de escala holística a reduccionista. (Modificada de Chapin III *et al.*, 2002).

### Literatura citada

- Chapin III, F. S., Matson, P. A., y H. A. Mooney. 2002. *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer-Verlag, New York.
- Intergovernmental Panel on Climatic Change. 2001. *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*. Summary for policymakers. Cambridge University Press.
- Meserve, P. L., Kelt, D. A., Milstead, B., y J. R. Gutiérrez. 2003. *Thirteen year of shifting top-down and bottom-up control*. *Bioscience* 53:633-646.
- Pavón, N. P. 2007. *Fine root biomass and production in a semiarid Mexican shrubland*. *The Southwestern Naturalist* 52:116-119.
- Pavón, N. P. 2005. *Biomass and root production of two plant life forms in a semiarid Mexican scrub: responses to soil nitrogen availability*. *Canadian Journal of Botany* 83:1317-1321.
- Pavón, N. P., y O. Briones. 2001. *Phenological patterns of nine perennial plants in an intertropical semiarid Mexican scrub*. *Journal of Arid Environments* 49:265-277.
- Pavón, N. P., Briones, O., y J. Flores-Rivas. 2005. *Litterfall production and nitrogen content in an intertropical semi-arid Mexican scrub*. *Journal of Arid Environments* 60:1-13.

- Red Mexicana de Investigaciones Ecológicas a Largo Plazo (RED MEX-LTER).  
www.mexlter.org.mx
- Sagan, C. 1994. *Pale blue dot: a vision of the human future space*. Ballantine Books, New York.
- Telles, O., y P. Dávila- Aranda. 2003. *Protected areas and climate change: a case study of the cacti in the Tehuacán-Cuicatlán biosphere reserve, Mexico*. *Conservation Biology* 17:846-853.
- Tinoco-Rueda, J. A., Monterroso Rivas, A. I., y J. D. Gómez Díaz. 2007. *Cambio climático y vegetación en la reserva de la biosfera Barranca de Metztitlán*. p. 85-90. In: G. Pulido-Flores y A. L. López-Escamilla (eds.) *IV Foro de investigadores por la conservación y II Simposio de áreas naturales protegidas del estado de Hidalgo*. Ciencia al día, núm. 5. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México.
- Villers-Ruiz, L., y I. Trejo-Vázquez. 2004. *Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales*. p. 239-254. In: J. Martínez y A. Fernández Bremauntz (eds). *Cambio climático: una visión desde México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / INE, México.