

Juan F. GALLARDO LANCHO (Coord.)

CONTAMINACIÓN, DESCONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN AMBIENTAL EN IBEROAMÉRICA

**Red Iberoamericana
de Física y Química Ambiental**

<www.sifyqa.org.es>

Editores de este volumen:

JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ TURIEL y M^a. ISABEL GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE FÍSICA Y QUÍMICA AMBIENTAL
SALAMANCA (ESPAÑA)

ÍNDICE

<i>Presentación</i>	21
<i>Prólogo</i>	23
<i>Fitorremediación con especies formadoras de céspedes</i> . M. J. Barros, Z. Premuzic, A. E. Rendina y A. R. Fabrizio de Iorio.....	27
<i>Respuesta de un suelo contaminado con metales pesados a la adición de alperujo y estiércol de vaca como enmiendas orgánicas</i> . M ^a . P. Bernal, C. de la Fuente y R. Clemente.....	45
<i>Descontaminación de medios acuosos que contienen plomo mediante el uso de residuos agrícolas</i> . M. Calero de Hoces, M ^a . Á. Martín Lara, G. Blázquez García, I. L. Rodríguez Rico e I. C. Alomá Vicente.....	67
<i>La restauración ecológica en un clima cambiante: ¿Es imprescindible un cambio de modelo?</i> J. Campo Alves.....	81
<i>Aplicación de Microscopia de Fuerza Atómica en la caracterización morfológica de material particulado</i> . M ^a . C. Castañón Bautista, J. Chávez Carvayar y G. C. Díaz Trujillo	99
<i>Impacto de una explotación minera de uranio en la distribución de metales pesados en suelos y aguas</i> . J. A. Egidio Rodríguez, M. I. González Hernández y V. González Lerma	117
<i>Riesgo de contaminación del agua subterránea con plaguicidas en la cuenca del arroyo Pantanoso (R. Argentina)</i> . V. Gianelli, F. Bedmar, H. Angelini, V. Aparicio y J. L. Costa.....	135
<i>Análisis de vulnerabilidad a la contaminación agroquímica de los suelos de una zona agrícola pampeana (R. Argentina)</i> . L. A. Gómez y G. A. Cruzate	153
<i>Impacto y resiliencia en indicadores de calidad de suelos en sabanas y morichales de los Llanos Orientales venezolanos contaminados por un derrame petrolero</i> . D. López-Hernández	165
<i>Contaminación en Buenos Aires (R. Argentina) por transporte de aerosoles procedentes de quema de biomasa (Agosto 2002)</i> . L. A. Otero, P. R. Ristori y E. J. Quel	183

<i>Bioacumulación de metales pesados en la población escolar de Mixquihuala (Valle del Mexquital, Méjico). F. Prieto García, F. E. Aranzabal Paredes, A. Zúñiga Estrada, F. Viso Gurovich y A. J. Gordillo Martínez</i>	203
<i>Cultivo de cana-de-açúcar e a contaminação de águas e solo pelo herbicida atrazina no Estado de São Paulo (Brasil). A. M. da Silva, C. Petrisin Costa de Jesus, L. A. Manfré y R. Custódio Urban</i>	215
<i>Evaluación de formación de piromorfita en suelos contaminados con plomo mediante espectroscopia de infrarrojos. N. R. Souza, K. Yukimitu, E. B. Araújo y L. Caetano</i>	237

LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN UN CLIMA CAMBIANTE: ¿ES IMPRESCINDIBLE UN CAMBIO DE MODELO?

Julio Campo Alves

Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, AP 70-275, Ciudad Universitaria, Ciudad de México 04510 (Méjico). <jcampo@ecología.unam.mx>.

Resumen: Los nuevos escenarios ambientales no permiten el mantenimiento de una restauración ecológica orientada en la utilización de sistemas de referencias prístinos. Existen cambios climáticos inevitables y sus efectos pueden operar antes de que sean perceptibles. Cada ecosistema responderá al incremento de temperatura terrestre dependiendo del clima regional y de la sensibilidad de los ecosistemas a estos cambios (en procesos de retroalimentación), así como a los procesos asociados (v. g.: fertilización con bioelementos o incremento de CO₂ atmosférico). Es indispensable, por tanto, cambiar el modelo de la Ecología de la restauración. Además, es urgente fortalecer la teoría de la Ecología de la restauración de ecosistemas mediante la generación de nuevos experimentos que permitan explorar las trayectorias de los sistemas frente a los cambios esperados en el clima y en los ciclos biogeoquímicos, y mediante el establecimiento de investigaciones y seguimientos a largo plazo.

Palabras clave: Cambios ecosistémicos, Ecosistema de referencia, Objetivos de la restauración ecológica.

Ecological restoration in a changing climate: is a new paradigm necessary?

Abstract: *The postulated new environmental sceneries do not permit to keep the ecological restoration practices based on referenced pristine ecosystems. There are global changes in the Terrestrial climate that are inevitable, and their effects could operate before the signs of the changes could be detected. How each ecosystem will respond to an increase of temperature will depend from regional climate, the ecosystem's sensitivities to these changes, the feedback processes, and changes associated (such as atmospheric CO₂ and soil availability of bio-elements). Then, it is imperative to change the model of the Ecology of the ecosystem restoration and an urgent strengthen of the theory of the Restoration Ecology should be considered, promoting new experiments exploring the trends of the system responses to the expected changes on climate and biogeochemical cycles, and establishing long-term researches and monitoring programs.*

Key words: Ecosystem changes, reference ecosystems, ecosystem restoration goals.

INTRODUCCION

En el año 2000 más de un tercio de la superficie terrestre libre de hielos estaba destinada a la producción agrícola y ganadera (Ramankutty *et al.* 2008). Se pronostica un incremento en la demanda de tierras destinadas al cultivo para poder sostener una demanda creciente por alimentos y mantener la seguridad alimentaria. Por ejemplo, los pronósticos indican que en el año 2030 la superficie cultivada podría incrementarse entre 5 y 10 % (Leemans *et al.* 2002). La deforestación continuará siendo el conductor de los cambios en el uso de la tierra en la región tropical por el establecimiento de nuevos cultivos y pastizales, mientras que se producirán una reforestación en las zonas templadas. Se pronostica que los nuevos sistemas serán sensibles al calentamiento pronosticado, siendo mayor conforme se incremente la concentración de CO₂ atmosférico (correlativo al calentamiento global). Se supone que el incremento de la temperatura media terrestre reducirá el rendimiento de los cultivos (Easterling 2007), aunque existe la opinión contraria de que el concomitante aumento de la concentración de CO₂ atmosférico hará más efectiva la producción (Körner *et al.* 2007); los pronósticos sugieren que, independientemente del tipo de cultivo y de la región (tropical o extra-tropical), un incremento de 1,8 °C (escenario conservador) de la temperatura media del aire (o más) reduciría el rendimiento de los cultivos. La causa principal de esta reducción se basa en que se producirá un incremento del área terrestre sometida a sequías temporales, estimándose en, aproximadamente, un 70 %.

A pesar de las alternativas desarrolladas para obtener una mayor producción en los cultivos (algunas bajo fuerte debate como es el cultivo de transgénicos y las mejoras dirigidas a la conservación del suelo) la reducción en el rendimiento de los cultivos y el incremento poblacional aumentarán aún más la superficie de tierras degradadas. Daily (1995) estimó que el 39 % de la superficie de las tierras libres de hielo estaban degradadas en el año 1995 y el porcentaje podría ascender a más del 60 % (cifras conservadoras del estudio) de la superficie terrestre en el año 2020.

Así, tanto el presente (como el futuro) escenario implican la necesidad de restaurar la estructura, función y procesos de los ecosistemas en numerosas áreas con el fin de garantizar los servicios ambientales para las generaciones actuales y futuras. Por otra parte, la restauración ecológica en términos de reforestación y restauración de tierras agrícolas degradadas constituye una respuesta importante ante el cambio climático debido a que estas actividades contribuyen al balance de C en una forma positiva. Sin duda un cambio climático deberá influir en los resultados de la práctica de la restauración ecológica debido a los cambios biofísicos que ocurrirán en el futuro.

La restauración ecológica, tal como es definida por la Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica (2004), es “*el proceso de iniciar o acelerar el restablecimiento de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido*”. Las prácticas restauradoras se basan en el reconocimiento de

ecosistemas de referencia, es decir, de los ecosistemas considerados prístinos y poseen atributos que permiten identificar su estado como ecosistemas sanos. Generalmente éstos exhiben los siguientes atributos:

- Presentan especies y estructura biológica característica del **ecosistema de referencia**, estando libres de especies no nativas.
- Un ambiente físico que es representativo del ecosistema referencia o, si estuviera degradado, es aún capaz de mantener a **las especies nativas y a las migratorias**, así como los **procesos básicos** necesarios para desarrollarse en la trayectoria deseada.
- Los indicadores de perturbaciones y el **régimen de perturbaciones históricas** se encuentran en un rango de variaciones de valores considerado normal (tipos de perturbaciones, frecuencias, intensidades, *etc.*).

Las prácticas, políticas y leyes que guían los programas de restauración ecológica suponen que los ecosistemas cambian lentamente y, como consecuencia de ello, los impactos de las acciones pueden ser distinguidos de los procesos naturales. Sin embargo, las evidencias climatológicas indican que se deben establecer nuevas estrategias de manejo en un escenario de cambios, donde la sostenibilidad y objetivos de la restauración no deberán basarse en las condiciones que se han desarrollado en años anteriores como punto de referencia. Cuando se revisen los planes de restauración se deberían reconsiderar sin duda la información recopilada sobre los efectos del cambio del clima sobre la hidrología, régimen de perturbaciones, especies vegetales y animales, *etc.*

Ante este escenario de cambio del ambiente físico exige un cambio de paradigma, dado que ya que no se puede basar en el anterior modelo de considerar condiciones o línea base de referencia las que se derivan de la historia anterior como condiciones deseables en los planes de restauración. Es urgente, por tanto, determinar qué información se debería usar para guiar la práctica restauradora y qué base científica deberá tenerse en cuenta. Esta información debería permitir determinar la línea que diferencie entre el cambio inducido por el manejo y el cambio inducido por las modificaciones en el clima.

La Ecología de la restauración se desarrolló rápidamente durante las últimas décadas (Falk *et al.* 2006; van Andel y Aronson 2006; Hobbs y Suding 2009) y cuenta actualmente con un cuerpo emergente de teorías, junto a prácticas restauradoras. Sin embargo, se necesitan desarrollar experimentos que fortalezcan la teoría y permitan ajustar las prácticas futuras ante un mundo cambiante. Las prescripciones de restauración ecológica utilizando referencias históricas podrían fracasar si no se tiene en cuenta que en el próximo Siglo las condiciones biofísicas es muy probable sean diferentes.

El **objetivo** del presente trabajo es presentar evidencias del posible sinergismo entre cambio climático y los ciclos biogeoquímicos globales, particular-

mente aquellos que tienen mayor interés en las prácticas de la restauración; además se analizarán los estudios más importantes sobre restauración ecológica que han explorado, desarrollado o, al menos, discutido las implicaciones que tendría el cambio climático para la práctica de la restauración.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados emanados de la exploración bibliográfica sobre restauración ecológica, cambio climático, campos científicos y ecosistemas más estudiados se ofrecen en forma gráfica (Fig. 2 a 6).

El cambio climático global pronosticado

El IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) se conformó en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) de forma conjunta. Desde su establecimiento ha generado informes de evaluación respecto al cambio climático (IPCC 1990, 1995 y 2001). Cada Informe del IPCC expresa la opinión consensuada de expertos científicos de todo el mundo respecto al cambio en el clima global. Particularmente, el cuarto y último Informe afirma que el cambio climático es una realidad. En Febrero de 2007 el IPCC (2007a) presentó la primera parte del Cuarto Informe donde se indican una serie de consideraciones sobre cambio del clima terrestre, afirmando que existe un consenso entre los científicos participantes sobre la existencia de un calentamiento global.

Las evidencias del cambio climático (IPCC 2007a) se basan en:

- Aumentos observados en el promedio mundial de la temperatura del aire (0,74 °C en los últimos 100 años) y del océano;
- Aumento del promedio mundial del nivel del mar (el nivel de los océanos ha aumentado desde 1961 a un promedio de 1,8 mm cada año; y
- Deshielo generalizado de nieves e hielos (datos satelitales indican que desde 1978 el promedio anual de la extensión de hielos árticos ha disminuido en 2,7 % por cada 10 años).

Las causas del cambio climático

La variación de las concentraciones de gases con efecto invernadero (G.E.I.) y aerosoles en la atmósfera, de la cubierta terrestre, de la actividad volcánica y de la radiación solar alteran el equilibrio del sistema climático. Las evidencias (referidas a 2005) indicaron que las concentraciones atmosféricas de CO₂ y de CH₄ excedieron el intervalo natural de los valores de los últimos

650 milenios como consecuencia, principalmente, del uso de combustibles de origen fósil y los cambios del uso de la tierra y agrícolas. Por otra parte, se registró un aumento en la concentración de N_2O desde el año 1750, procedente principalmente del sector agrícola.

El cambio climático y sus posibles impactos

El Informe sobre los escenarios de emisiones (*IPCC 2000*) pronosticó un aumento entre el 25 y el 90 % de las emisiones mundiales de G.E.I. (CO_2 -equivalente) entre los años 2000 y 2030. La situación proyectada para finales del milenio (esto es, década 2090-2099) indica un incremento de la temperatura media global de la superficie terrestre de 1,8 a 4,0 °C y, como estimación más probable en los seis escenarios considerados (con probabilidad de ocurrencia >66 %) de un incremento comprendido entre el 1,1 y 6,4 °C.

Aún en el caso de que las concentraciones de los G.E.I. en la atmósfera se mantuvieran constantes se espera que continúe el calentamiento global debido a que cambios en el “forzamiento radiante” (esto es, un indicador utilizado para ponderar la influencia que un factor ejerce sobre el balance de energía entrante y saliente del sistema suelos-atmósfera) son instantáneos cuando la concentración de CO_2 atmosférico aumenta. Sin embargo, se espera que el calentamiento terrestre, la fusión de hielos y el incremento en el nivel del mar continúen durante más tiempo aún cuando la concentración de CO_2 se estabilice (*IPCC 2007a*). Estos cambios a largo plazo se denominan “*cambio climático comprometido*”. La diferencia entre el estado de un ecosistema en el punto en que se han estabilizado las concentraciones de CO_2 y el estado del ecosistema cuando eventualmente alcanza el equilibrio en las condiciones de las mismas concentraciones de GEI se llama “*cambio climático comprometido del ecosistema*” y se debe a cambios en la cobertura de la vegetación y en el almacenamiento de C. Las consecuencias de este cambio climático comprometido para la distribución de dos tipos de ecosistemas terrestres (bosques boreales y tropicales lluviosos) fueron recientemente exploradas por Jones *et al.* (2009); estos modeladores establecieron, para ambos ecosistemas, que los cambios comprometidos serán inevitables e irreversibles, incluso a escalas de tiempo humanas; concluyen indicando que podrían ocurrir cambios comprometidos en los ecosistemas antes de que los primeros signos de los cambios sean detectables.

El informe del *IPCC* (2007a) señaló un conjunto de tendencias que tienen particular interés en la práctica de la restauración ecológica como, por ejemplo:

- Que los días más cálidos serán más frecuentes, mientras que ocurrirán menos días fríos en la mayoría de la superficie terrestre;
- Que los días y las noches calurosas serán más frecuentes;
- Que las olas de calor serán más frecuentes;

- Que la frecuencia de eventos de lluvias intensas (o la proporción de lluvias intensas respecto al total de la lluvia anual) se incrementarán;
- Que, globalmente, las áreas afectadas por la sequía se han incrementarán; y
- Que se incrementará la frecuencia de los ciclones tropicales más intensos.

Las implicaciones que tendrán éstas tendencias para los eventos extremos de perturbaciones, plagas y enfermedades por insectos, incendios y vulnerabilidad a las especies invasoras, y cambios permanentes en los patrones de la vegetación son evidentes para la comunidad científica (IPCC 2007b). Por ejemplo, las más de 29000 series de datos de observaciones analizadas, procedentes de 577 estudios seleccionados, indican que de los cambios observados en numerosos sistemas físicos y biológicos en el período 1989-2004, más del 89 % son coherentes con la dirección del cambio esperado en respuesta al calentamiento.

Las consecuencias del cambio climático podrían ser más complejas tanto para el funcionamiento como para la selección de ecotipos en aquellos ecosistemas que reciben aportes alóctonos por parte de especies migratorias, dado que éstas podrían cambiar su ruta migratoria como consecuencia del calentamiento global. Por ejemplo, la mariposa monarca (*Danaus plexippus* L) que cada año migra del Este de Canadá y de Estados Unidos a Méjico (donde pasa la temporada de hibernación de Noviembre a Febrero) genera un pulso de recursos alóctonos asociados con la deposición de la necromasa, que varía entre 0,23 y 0,45 Mg MS ha⁻¹ durante cada período de hibernación. Esta necromasa depositada por el insecto y sus cadáveres posee una etiqueta química muy diferente a la correspondiente a la hojarasca del bosque y representa un flujo al piso forestal asociada a la necromasa aérea del ecosistema boscoso que duplica la deposición de N autóctona e incrementa en un 25 % la de P (J. Contreras, datos no publicados).

El contexto y condiciones deseables para la restauración ecológica

Además del incremento de la temperatura media del aire el escenario futuro incluye cambios generalizados de otros componentes del clima (por ejemplo, del promedio anual de precipitación).

Los cambios en la precipitación anual modulan la magnitud de la biomasa, del flujo de la materia al suelo y de la actividad microbiana telúrica (Voroney 2007) incluso en áreas tropicales (Campo *et al.* 1998). Por ejemplo, en áreas abandonadas del trópico estacionalmente seco la biomasa microbiana del suelo disminuye en gradientes ambientales conforme se incrementa el promedio anual de la precipitación, reflejando un mayor consumo por parte de microvóvoros, mientras que la actividad microbiana incrementa con dicha precipitación media anual (V. Maldonado, datos no publicados);

estos resultados (tomados en conjunto) sugieren que conforme se extiende la sequía (en muchas áreas semiáridas tropicales abandonadas) la mineralización orgánica y liberalización de bioelementos disminuyen, produciéndose mayor inmovilización. Es esperable que, consecuentemente, estos cambios climáticos acentúen el estrés vegetal debido a una más baja disponibilidad de bioelementos, aspecto que debería ser considerado en las prácticas futuras de restauración ecológica.

Existen numerosas interacciones entre el cambio climático y los ecosistemas terrestres (Reich *et al.* 2006; Field *et al.* 2007; Luo 2007). La bibliografía recopilada muestra la existencia de retroalimentación entre el clima y los ecosistemas terrestres (Field *et al.* 2007), teniendo efectos, de interés para la restauración, sobre el desarrollo y crecimiento vegetal, el almacenamiento de C en el suelo, la distribución de los ecosistemas y el régimen de perturbaciones; así como también con consecuencias físicas debido al desarrollo de una nueva cubierta vegetal inducida por la restauración, con efectos sobre el albedo (reflectividad de la superficie terrestre) y la disipación de calor (calor latente), que afectan, a su vez, al clima.

Cada ecosistema responderá al incremento de temperatura de acuerdo con el clima regional y de la sensibilidad de los ecosistemas a éstos cambios; pero esta dinámica no es lineal dado que existen procesos de retroalimentación y otros asociados, por ejemplo, a la fertilización nitrogenada o al aumento del CO₂ atmosférico (Dentener *et al.* 2006; Mahowald *et al.* 2008).

Los mecanismos que regulan la sensibilidad de los ecosistemas terrestres al calentamiento global fueron analizados por Luo (2007); el calentamiento extiende la estación de crecimiento de las zonas extra-tropicales, cambia la composición de especies favoreciendo las plantas C₄, y aumenta el ritmo de crecimiento de las plantas.

Un incremento en el crecimiento demanda, a su vez, más bioelementos (*v. g.*, N) y, como se dijo, un uso más eficiente de los mismos por parte de las plantas. Por otra parte, el calentamiento incrementa la respiración del suelo, lo cual se contrarresta por el efecto del enriquecimiento del CO₂ atmosférico sobre el crecimiento de las plantas, en función de la disponibilidad de N, produciendo pocos cambios en el almacenamiento de C edáfico (Sokolov *et al.* 2008).

Con el incremento del ritmo de crecimiento vegetal la calidad de los tejidos vivos disminuye (esto es, se incrementan las relaciones C:bioelemento) y, con ello, se reduce también la calidad nutricional de la necromasa susceptible a descomponerse (Hessen *et al.* 2004), lo cual reduce la mineralización de bioelementos (con consecuencias sobre la disponibilidad de bioelementos edáficos), lo cual tendrá efectos sobre los procesos de restauración ecológica.

La producción y uso de fertilizantes, el incremento en la extensión del uso de cultivos con capacidad simbiótica para fijar el N atmosférico y la combustión de motores han duplicado la movilización de N en el planeta (Galloway *et al.*

2008). Con ello se incrementó la deposición de N atmosférico, con posibles efectos para el funcionamiento y biodiversidad de los ecosistemas terrestres.

Actualmente se tiene evidencias experimentales relativas a la limitación de la producción primaria neta (PPN) de los ecosistemas terrestres debido a una insuficiente disponibilidad de N edáfico tanto durante la sucesión primaria, como durante la secundaria (LeBauer y Treseder 2008). Por otra parte, la práctica de la roza-tumba-quema durante la preparación de las tierras forestales genera importantes pérdidas de N debido a volatilización (Giardina *et al.* 2000) y el uso posterior de la tierra generalmente acentúa la pérdida del capital total de N en el suelo (McLauchlan 2006). Esta baja disponibilidad de N tras el abandono de las tierras es un aspecto crítico en la restauración de bosques abandonados (Ceccon *et al.* 2003).

A pesar de la dominancia de las especies leguminosas durante la sucesión secundaria el ciclo del N puede que no se haya recuperado, incluso, después de 60 años de instalación, tanto en el trópico seco (Saynes *et al.* 2005) como en el húmedo (Davidson *et al.* 2007). Considerando que (después del C) el N es el bioelemento más demandado por parte de los organismos, un incremento en su deposición atmosférica sin duda afectará las prácticas de la restauración. Se espera que esta mayor deposición de N atmosférico se vaya incrementando en más de un orden de magnitud hasta el año 2050 (Galloway *et al.* 2004). Las evidencias obtenidas en el trópico seco indican que un incremento en la disponibilidad de N tiene consecuencias fisiológicas para el ecosistema, las relaciones tróficas y la regeneración en áreas abandonadas.

Las consecuencias a corto plazo (*v. g.*, 3 años) de un incremento de la deposición de N pudieran ser:

- a. Producir cambios en la circulación de N en el ecosistema (afectando su reabsorción, flujo de N al suelo asociado a la hojarasca, mineralización o pérdidas potenciales de N (Solís y Campo 2004; Campo *et al.* 2007);
- b. Producir cambios en la dinámica del C de la biomasa (incrementando la inmovilización de C en leño, la producción de tejido foliar y la herbivoría; Campo y Dirzo 2003; Campo y Vázquez-Yanes 2004);
- c. No afectar la captura de C edáfico (Gamboa *et al.* 2009);
- d. Producir incrementos en la supervivencia de las plántulas dominantes, reduciendo la biodiversidad (Ceccon *et al.* 2003; Ceccon *et al.* 2004).

Los cambios en la circulación de N en el ecosistema tienen consecuencias en las relaciones estequiométricas de la biomasa (*sensu* Sterner y Elser 2002; esto es, relación entre bioelementos). Un análisis de los datos recopilados (Fig. 1) ponen de manifiesto la flexibilidad por parte de las plantas y que la dirección de las respuestas parece ser función de si las áreas a restaurar están o no limitadas por baja disponibilidad de N. En contraste, se ha comprobado

una aparente falta de flexibilidad de los microorganismos edáficos, aunque no se puede descartar que en los experimentos realizados en campo se hallan producido involuntariamente cambios de la composición de la biomasa microbiana del suelo, o la existencia de ambos hechos conjuntamente; este aspecto necesita sin duda una investigación más profunda.

Esta alteración en las relaciones estequiométricas podría conducir a cambios en las relaciones planta-atmósfera (por una menor fijación de CO₂ atmosférico durante la producción primaria) y, con ello, exacerbar el cambio en el clima o, por otra parte, reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera al reducir el ritmo de mineralización (Cárdenas y Campo 2007). También, podría afectar el éxito competitivo de las especies con capacidad simbiótica para fijar el N atmosférico (Reich *et al.* 2006) tan utilizadas en la práctica de la restauración ecológica de tierras abandonadas.

Estos estudios, globalmente, ejemplifican la necesidad de realizar evaluaciones en más de un nivel trófico.

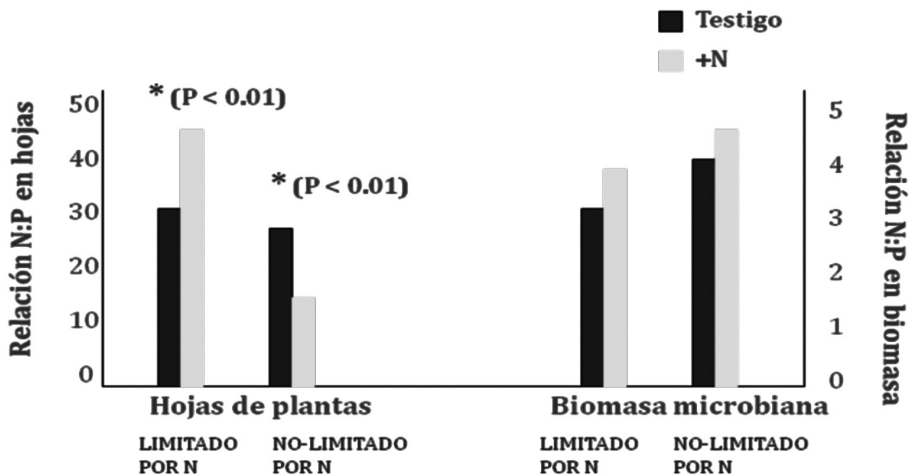


Figura 1. Efectos de la fertilización nitrogenada sobre la relación N/P de las hojas de los árboles y sobre la biomasa microbiana edáfica en función de la limitación de la producción primaria por baja disponibilidad de N.

Condiciones deseables

Dado que el cambio climático es hecho real existen numerosos sinergismos entre el cambio del clima, otros cambios globales y los ecosistemas, los cuales afectan los procesos naturales y producen cambios ecológicos. Considerando que estos cambios pueden ocurrir rápidamente los planes y objetivos de restauración no pueden entonces formularse tomando como base a las condiciones prístinas o deseables sin considerar los efectos del cambio climático. Como se ha visto la comunidad científica ha generado abundante

información ecológica respecto a las consecuencias potenciales del cambio climático sobre los ecosistemas que pueden resultar útiles en el fortalecimiento de las bases de la teoría y práctica de la restauración ecológica.

¿Qué estudios se han hecho que evalúen o, al menos, interpreten las posibles consecuencias del cambio climático desde la perspectiva de la Ecología de la restauración?

Un análisis de 364 publicaciones, realizado por el autor, correspondientes al período 1999-2008 (I.S.I., Thompson Reuters) muestra un neto incremento del número de publicaciones sobre Ecología de la restauración con el tiempo; y, por otra parte, indica también el impacto que tuvo el tercer Informe del Grupo de Expertos (IPCC 2001) en el desarrollo de la investigación científica y de la práctica referente a la restauración ecológica (Fig. 2).

Los estudios desarrollados son principalmente comparativos (por ejemplo, sitios secos *vs.* húmedos; sitios con mayor *vs.* menor temperatura; *etc.*) y experimentales (generalmente de tipos de trasplantes recíprocos, analizando las respuestas de ecotipos; Fig. 3). Luego siguen en abundancia la formulación de modelos respecto al cambio climático y sus consecuencias ecológicas, así como la discusión del potencial de su influencia para la práctica de la restauración ecológica.

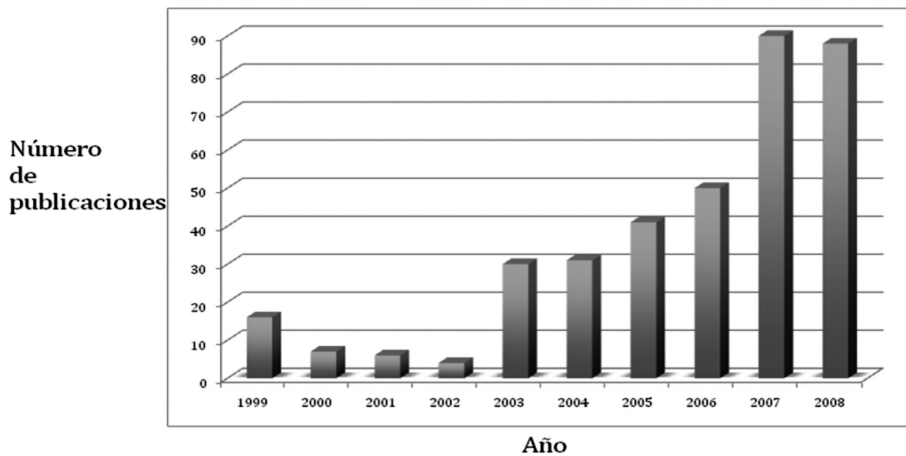


Figura 2. Evolución temporal del número de publicaciones sobre Ecología de la restauración y cambio climático.

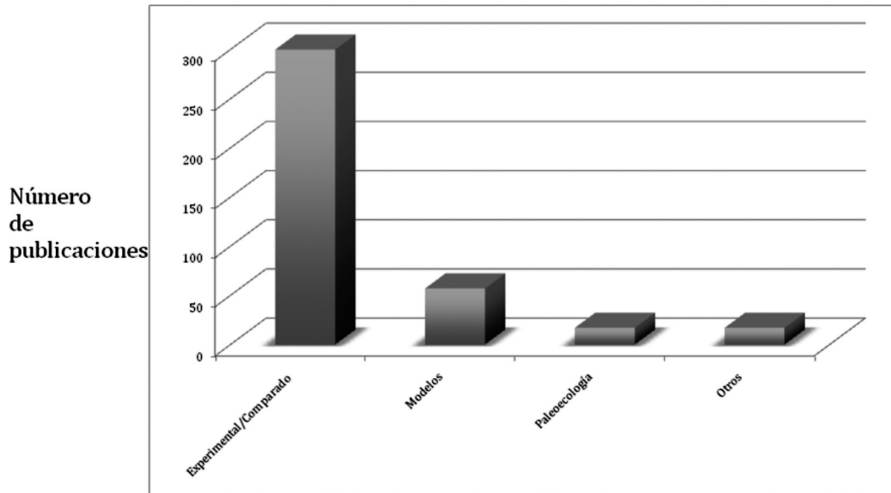


Figura 3. Estudios sobre Ecología de la restauración y cambio climático.

Se exploraron los efectos de los cambios de la pluviometría y de la temperatura media anual (factores abióticos) sobre la Ecología de la restauración; son, sin lugar a dudas, estudios menos costosos que la simulación de cambios en la concentración de CO₂ u ozono, de los cuales existen muy pocos (Fig. 4). Más escasos son los trabajos que exploraron experimentalmente las posibles interacciones entre cambios climáticos y efectos de la fertilización nitrogenada o del incremento del CO₂ atmosférico.

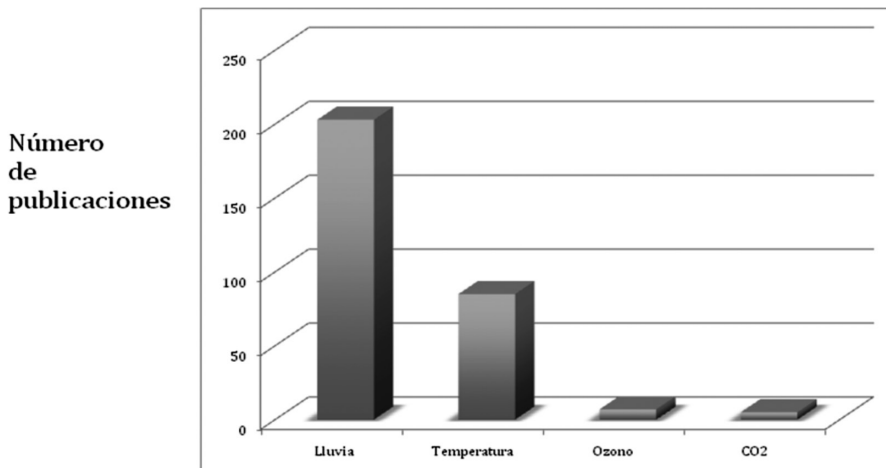


Figura 4. Factores explorados en Ecología de la restauración y cambio climático.

En la investigación realizada suele existir un sesgo hacia el estudio de ecosistemas forestales o pastizales, lo cual refleja el interés político y público en la captura de C por los bosques y la fortaleza teórica desarrollada respecto a la biogeoquímica de los pastizales, principalmente del hemisferio del Norte (Fig. 5). Se ha realizado, en términos relativos, poco o muy poco esfuerzo en explorar las consecuencias del cambio climático sobre los ecosistemas áridos o las sabanas.

Un análisis de la abundancia relativa de estudios sobre la contribución relativa de cada ecosistema al ciclo del C terrestre indica que los bosques templados han sido estudiados en mayor proporción respecto a su capacidad total de captura de C, o su capacidad de almacenamiento de C edáfico (Fig. 6). Por otra parte, se puede deducir que existe una urgente necesidad de fortalecer los estudios sobre sabanas, no sólo por su importancia en la captura de CO₂ atmosférico y sus reservas de C terrestre, sino también por el hecho de que los escenarios de cambio climático y de cambios en la distribución de la vegetación pronostican un incremento del área de este ecosistema que suele substituir a los bosques tropicales estacionalmente secos tras su deforestación.

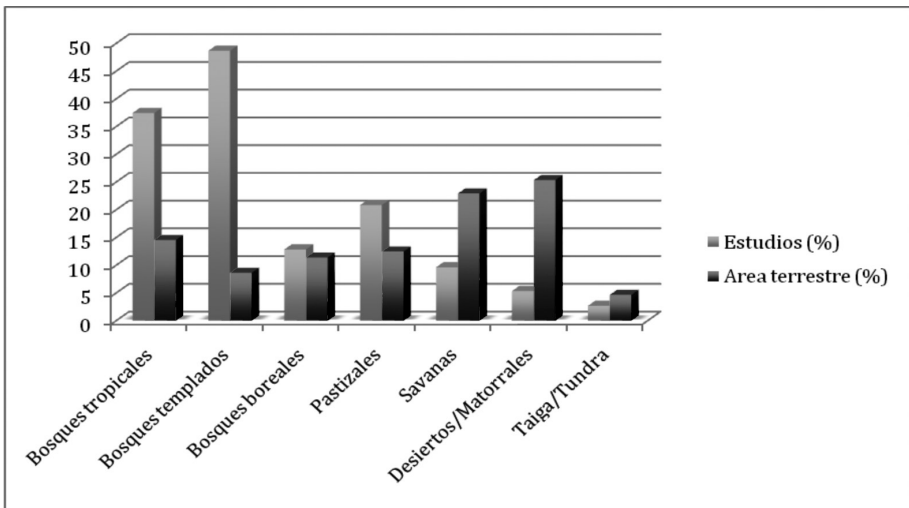


Figura 5. Ecosistemas estudiados en Ecología de la restauración y cambio climático.

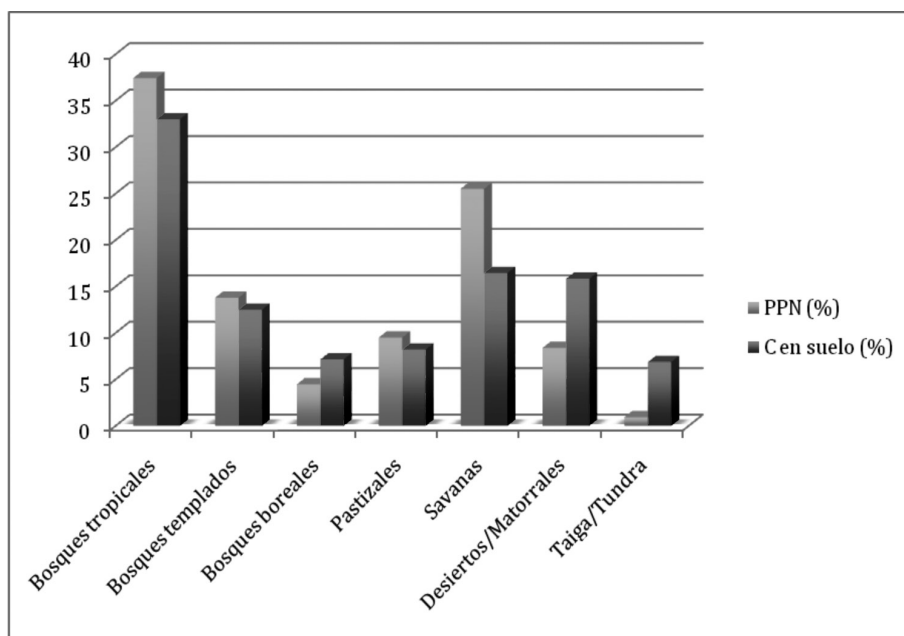


Figura 6. Porcentajes de estudios sobre producción primaria neta (PPN) y C edáfico de los principales ecosistemas terrestres (Sabine *et al.* 2004).

Consideraciones finales

La restauración hacia las condiciones prístinas de los ecosistemas posee un sesgo con el fin de conservar la máxima biodiversidad y el funcionamiento más equilibrado, además de un mayor almacenamiento de C, que es una de las acciones más urgentes a realizar para mitigar los impactos del cambio climático y dar a las especies y ecosistemas la oportunidad de adaptarse al calentamiento global.

Con este fin nos atrevemos a exponer las siguientes **propuestas**:

- Establecer como meta la restauración del funcionamiento integral de los ecosistemas y la preservación de ecotipos como forma de mantener el capital natural;
- Crear redes de seguimiento de programas de restauración, lo cual permitirá identificar las respuestas ante tendencias de cambio climático y diferenciarlas de aquellas que son meros eventos extremos y no cambio de clima;
- Desarrollar foros de discusión para la creación de un programa de ensayos donde se simulen los cambios pronosticados en los principales vectores del cambio climático global;

- Fortalecer la colaboración entre modeladores del cambio climático y ecólogos de la restauración que conduzca al desarrollo de simulaciones del cambio climático a escala regional y local, y su interacción con los ecosistemas; y, por supuesto,
- Usar modelos de escenarios planificados que contemplen las condiciones deseadas por parte de los equipos de restauradores y consensuadas mediante la participación de los agentes sociales.

CONCLUSIONES

Los nuevos escenarios ambientales no permiten mantener una adecuada práctica de restauración ecológica si sólo se basa en la utilización de sistemas de referencia, dado que existen cambios climáticos (con inercia en estos cambios) previsiblemente inevitables; además, sus efectos pueden operar antes de que sean perceptibles.

Como responderá cada ecosistema al incremento de la temperatura dependerá del clima regional y de la sensibilidad de los ecosistemas a éstos cambios y procesos de retroalimentación, así como a procesos asociados, fertilización con bioelementos y aumento del CO₂ atmosférico.

Por tanto, es necesario cambiar el paradigma de la Ecología de la restauración de ecosistemas. Para ello, es urgente fortalecer la teoría de la Ecología de la restauración mediante un nuevo enfoque de los experimentos que permitan explorar la evolución de los sistemas ante los cambios esperados, climáticos y en los ciclos biogeoquímicos, con el complemento de programas de seguimiento a largo plazo.

Por otra parte la Ecología de la restauración de ecosistemas ofrece a la Ecología del cambio global un nuevo campo experimental que le permitirá avanzar en la comprensión de las respuestas de los ecosistemas ante el cambio climático u otros cambios globales.

BIBLIOGRAFÍA

- Campo J., V.J. Jaramillo y J.M. Maass. 1998. Pulses of soil phosphorus availability in a tropical dry forest: effects of seasonality and level of wetting. *Oecologia*, 115: 167-172.
- Campo J. y R. Dirzo. 2003. Leaf quality and herbivory responses to soil nutrient addition in secondary tropical dry forests of Yucatán, Mexico. *J. Trop. Ecol.*, 19: 525-530
- Campo J., E. Solís y M.G. Valencia. 2007. Litter N and P dynamics in two secondary tropical dry forests after relaxation of nutrient availability constraint. *For. Ecol. Manag.*, 252: 33-40.

- Campo J. y C. Vázquez-Yanes. 2004. Effects of nutrient limitation on aboveground carbon dynamics during tropical dry forest regeneration in Yucatán, Mexico. *Ecosystems*, 7: 311-319.
- Cárdenas I. y J. Campo. 2007. Foliar nitrogen and phosphorus resorption and decomposition in the nitrogen-fixing tree *Lysiloma microphyllum* in primary and secondary seasonally tropical dry forests in Mexico. *J. Trop. Ecol.*, 23: 107-113.
- Ceccon E., P. Huante y J. Campo. 2003. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on the survival and recruitment of seedling of dominant tree species in two abandoned tropical dry forests in Yucatán, Mexico. *For. Ecol. Manag.*, 182: 387-402.
- Ceccon E., S. Sánchez y J. Campo. 2004. Tree seedling dynamics in two tropical abandoned dry forests of differing successional status in Yucatan, Mexico: a field experiment with N and P fertilization. *Plant Ecol.*, 170: 277-285.
- Daily G.C. 1995. Restoring value to the World's degraded lands. *Science*, 269: 350-354.
- Davidson E.A., C.J. Reis de Carvalho, A.M. Figueira, F.Y. Ishida, J.P.H.B. Ometto, G.B. Nardoto, R.T.Saba, S.N. Hayashi, E.C. Leal, I.C.G. Vieira y L.A. Martinelli. 2007. Recuperation of nitrogen cycling in Amazonian forests following agricultural abandonment. *Nature*, 447: 995-999.
- Dentener F., J. Drevet, J.F. Lamarque, I. Bey, B. Eickhout, A.M. Fiore, D. Hauglustaine, L.W. Horowitz, M. Krol, U.C. Kulshrestha, M. Lawrence, C. Galy-Lacaux, S. Rast, D. Shindell, D. Stevenson, T. Van Noije, C. Atherton, N. Bell, D. Bergman, T. Butler, J. Cofala, B. Collins, R. Doherty, K. Ellingsen, J. Galloway, M. Gauss, V. Montanaro, J.F. Müller, G. Pitari, J. Rodríguez, M. Sanderson, F. Solomon, S. Strahan, M. Schultz, K. Sudo, S. Szopa y O. Wild. 2006. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: A multimodel evaluation. *Global Biogeochem. Cycles*, 20: GB4003.
- Easterling W.E. (Ed.). 2007. Climate change and the adequacy of food and timber in the 21st. Century. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 104: 19679-708.
- Falk D.A., M.A. Palmer y J.B. Zedler. Editores. 2006. *Foundations of restoration ecology*. Island Press, Washington D.C. 364 pp.
- Field C.B., D.B. Lobell, H.A. Peters y N.R. Chiariello. 2007. Feedbacks of terrestrial ecosystems to climate change. *Annu. Environ. Resour.*, 32: 1-29.
- Gamboa A.M., C. Hidalgo, F. de León, J.D. Etchevers, J.F. Gallardo y J. Campo. Nutrient addition differentially affects soil carbon sequestration in secondary tropical dry forests: Early- vs. late-succession stages. *Restoration Ecol.*, D.o.i.: 10.1111/j.1526-100X.2008.00432.x.
- Galloway J.N., F.J. Dentener, D.G. Capone, E.W. Boyer, R.W. Howarth, S.P. Seitzinger, G.P. Asner, C.C. Cleveland, P.A. Green, E.A. Holland, D.M. Karl, A.F. Michaels, J.H. Porter, A.R. Townsend y C.J. Vöosmarty. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochem.*, 70: 153-226.
- Galloway J.N., A.R. Townsend, J.W. Erisman, M. Bekunda, Z.C. Cai, J.R. Freney, L.A. Martinelli, S.P. Seitzinger y M. Sutton. 2008. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320: 889-892.

- Giardina C.P., R.L. Sanford, I.C. Dockersmith y V.J. Jaramillo. 2000. The effects of slash burning on ecosystem nutrients during the land preparation phase of shifting cultivation. *Plant & Soil*, 220: 247-260.
- Hessen D.O., G.I. Agren, T.R. Anderson, J.J. Elser y P.C. de Ruiter. 2004. Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry. *Ecology*, 85:1179-1192.
- Hobbs R. y K. Suding. 2009. *New models of ecosystem dynamics and restoration*. Island Press, Washington D.C., 366 pp.
- IPCC. 2000. *Special report on emission scenarios (SRES)*. N. Nakicenovic y R. Swart (eds.). Cambridge University Press, Cambridge. 570 pp.
- IPCC. 2007a. *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, y H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge. 996 pp.
- IPCC. 2007b. *Climate change 2007: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson (ed.). Cambridge University Press, Cambridge. 976 pp.
- Jones C., J. Lowe, S. Liddicoat y R. Betts. 2009. Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. *Nature GeoSci.*, 2: 484-487.
- Körner C., J. Morgan y R. Norby. 2007. *CO₂ fertilization: When, where, how much?* En: J.G. Canadell, D.E. Pataki y L.F. Pitelka (eds.). *Terrestrial ecosystems in a changing World*. Springer, New York, 9-21 pp.
- LeBauer D.S. y K.K. Treseder. 2008. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 89: 371-379.
- Leemans R., B. Eickhout, B. Strengers, L. Bouwman y M. Schaeffer. 2002. The consequences of uncertainties in land use, climate and vegetation responses on the terrestrial carbon. *Sci. China Ser. C Life Sci.*, 45: 126-141.
- Luo Y. 2007. Terrestrial carbon-cycle feedback to climate warming. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 38: 683-712.
- Mahowald N., T.D. Jickells, A.R. Baker, P. Artaxo, C.R. Benitez-Nelson, G. Bergametti, T.C. Bond, Y. Chen, D.D. Cohen, B. Herut, N. Kubilay, R. Losno, C. Luo, W. Maenhaut, K.A. McGee, G.S. Okin, R.L. Siefert y S. Tsukuda. 2008. Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts. *Global Biogeochem. Cycles*, 22: GB4026.
- McLauchlan K. 2006. The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: A review. *Ecosystems*, 9: 1364-1382.
- Ramankutty N., A.T. Evan, C. Monfreda y J.A. Foley. 2008. Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochem. Cycles*, 22: GB1003.
- Reich P.B., B.A. Hungate y Y. Luo. 2006. Carbon-nitrogen interactions in terrestrial ecosystems in response to rising atmospheric carbon dioxide. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37: 611-636.

- Sabine C.L., M. Heimann, P. Artaxo, D.C.E. Bakker, C.T.A. Chen, C.B. Field, N. Gruber, C. Le Quéré, R.G. Prinn, J.E. Richey, P. Romero Lankao, J.A. Sathaye y R. Valentini. 2004. Current status and past trends of the global carbon cycle. En: C.B. Field y M.E. Raupach (eds.). *The global carbon cycle. Integrating humans, climate, and the natural World*. Island Press, Washington, 17-44 pp.
- Saynes V., C. Hidalgo, J.D. Etchevers y J.E. Campo. 2005. Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *Appl. Soil Ecol.*, 29: 282-289.
- Society for Ecological Restoration International (S.E.R.I.)*. Grupo de trabajo sobre Ciencia y Políticas. 2004. *Principios del S.E.R.I. sobre restauración ecológica*. S.E.R.I., Tucson (USA). 16 pp.
- Sokolov A.P., Kicklighter, David W., Melillo, Jerry M., Felzer, Benjamin S., Schlosser, C. Adam, Cronin TW. 2008. Consequences of considering carbon-nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle. *J. Clim.*, 21: 3776-3796.
- Solis E. y J. Campo. 2004. Soil N and P dynamics in two secondary tropical dry forests after fertilization. *For. Ecol. Manage.*, 195: 409-418.
- Stener R.W. y J.J. Elser. 2002. *Ecological stoichiometry. The biology of elements from molecules to biosphere*. Princenton University Press, Princenton. 437 pp.
- van Andel J. y J. Aronson. Editores. 2006. *Restoration ecology: the new frontier*. Blackwell, Oxford. 312 pp.
- Voroney R.P. 2007. *The soil habitat*. En: E.A. Paul (ed.). *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry*. Academic Press, Burlington (Gran Bretaña). Pp.: 25-49.