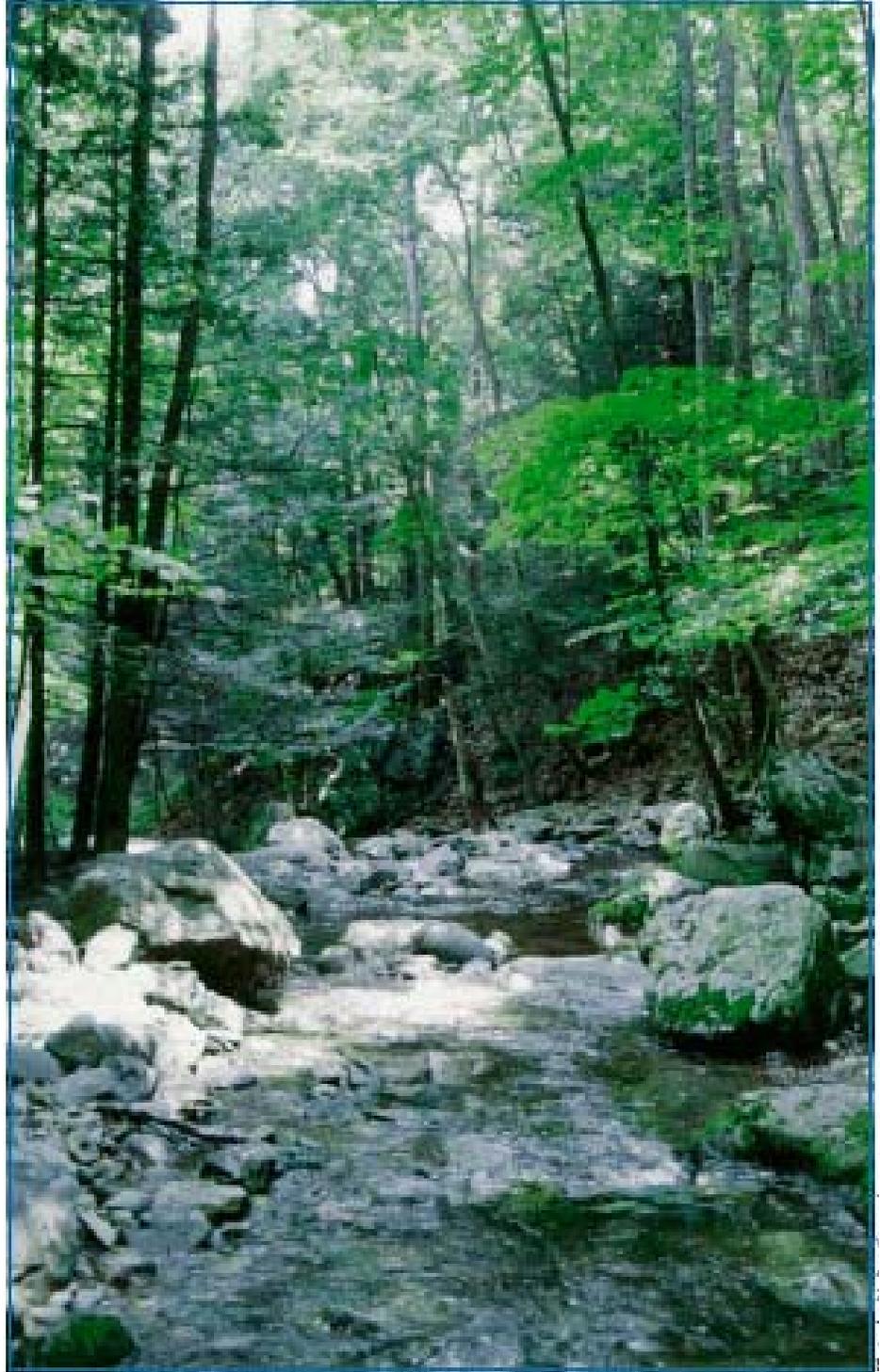


Alteración Antrópogenica del Ciclo Global del Nitrógeno: Causas y Consecuencias



Fotografía por Nadine Cavender

Alteración Antrópogénica del Ciclo Global del Nitrógeno: Causas y Consecuencias

TITULO ORIGINAL

Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle: Causes and Consequences

RESUMEN

Las actividades humanas están incrementando a grandes niveles la cantidad de nitrógeno que se intercambia entre los organismos vivos, el suelo, el agua y la atmósfera. De hecho, los seres humanos ya han duplicado las cantidades de nitrógeno que entra al ciclo terrestre del nitrógeno, y esa tasa continúa incrementándose. El cambio global inducido por el hombre está teniendo serios impactos en los ecosistemas del mundo, pues el nitrógeno es esencial para los organismos vivos y su disponibilidad desempeña un papel crucial en la organización y funcionamiento de los ecosistemas del planeta. En muchos ecosistemas, marinos y terrestres, el nitrógeno es un factor clave para el control de la naturaleza y diversidad vegetal, de la dinámica poblacional tanto de animales herbívoros como depredadores y de procesos ecológicos vitales como la productividad primaria, la dinámica del ciclo de carbono y de los minerales del suelo. Esto es cierto no sólo en los sistemas naturales o sin manejo sino también en la mayoría de las tierras cultivadas y plantaciones forestales. La adición excesiva de nitrógeno pueden contaminar los ecosistemas y alterar tanto sus funcionamiento ecológico como las comunidades biológicas que sostienen.

La mayoría de las actividades humanas responsables del aumento en las aportaciones globales de nitrógeno se da a escalas locales, desde la producción y uso de fertilizantes nitrogenados hasta la quema de combustibles fósiles en automóviles, plantas de generación de energía e industrias. No obstante, las actividades humanas no sólo han incrementado los aportes sino que también han incrementado el movimiento global de diversas formas nitrogenadas a través del aire y el agua. Debido al aumento de esta movilidad, el exceso de nitrógeno por aportes antropogénicos tiene serias consecuencias ambientales a largo plazo para grandes regiones del planeta.

Los impactos del dominio humano del ciclo del nitrógeno, que hemos identificado con certeza incluyen:

- Incremento en las concentraciones globales de óxido nitroso (N_2O), un potente gas de invernadero, en la atmósfera así como el aumento regional de otras formas de óxidos de nitrógeno (incluyendo óxido nítrico, NO) que conducen a la formación de *smog* fotoquímico;
- Pérdida de nutrientes del suelo, tales como calcio y potasio, que son esenciales para su fertilidad a largo plazo;
- Acidificación substancial de suelos y cuerpos de agua ribereños y lacustres de diversas regiones;
- Fuertes incrementos en el transporte de nitrógeno por los ríos hacia los estuarios y aguas costeras en donde se constituye en un contaminante principal.

También estamos seguros que las alteraciones humanas del ciclo del nitrógeno han:

- Acelerado la pérdida de diversidad biológica, especialmente entre plantas adaptadas a suelos pobres en nitrógeno y subsecuentemente, de los animales y microorganismos que dependen de dichas plantas.
- Causado cambios en la vida vegetal y animal, así como en los procesos ecológicos estuarinos y costeros, contribuyendo a la disminución a largo plazo de la producción pesquera marina.

Las políticas nacionales e internacionales deberían esforzarse en disminuir estos impactos a través del desarrollo y amplia difusión de tecnologías más eficientes de consumo de combustibles fósiles y de prácticas de cultivo que reduzcan la gran demanda y utilización de fertilizantes nitrogenados.

Alteración Antrópogenica del Ciclo Global del Nitrógeno: Causas y Consecuencias

por

Peter M. Vitousek, Chair, John Aber, Robert W. Howarth, Gene E. Likens, Pamela A. Matson,
W. Schindler, William H. Schlesinger, y G. David Tilman

David

INTRODUCCIÓN

Este reporte presenta una revisión actual sobre el entendimiento científico de los cambios por actividades humanas al ciclo global del nitrógeno y sus consecuencias. También aborda políticas y opciones de manejo que podrían ayudar a moderar estos cambios y sus impactos.

EL CICLO DEL NITRÓGENO

El nitrógeno es un componente esencial de las proteínas, material genético, clorofila, y de otras moléculas orgánicas clave. Todos los organismos necesitan nitrógeno para vivir. Es el cuarto elemento más abundante en los tejidos vivos después del oxígeno, el carbono e hidrógeno. Sin embargo, el nitrógeno estaba escasamente disponible para la mayor parte del mundo biológico hasta que las actividades humanas comenzaron a alterar el ciclo (Figura 1). Como resultado, el nitrógeno servía como uno de los principales factores limitantes que controlaban la dinámica, biodiversidad y funcionamiento de muchos ecosistemas.

El 78% de la atmósfera terrestre está constituido por nitrógeno gaseoso (N_2), pero la mayoría de las plantas y animales no lo pueden aprovechar directamente del aire como lo hacen con el carbono y el oxígeno. En cambio, las plantas—y todos los organismos, desde los herbívoros hasta los depredadores y descomponedores, que aseguran su alimentación a través de materiales sintetizados por las plantas—deben esperar a que el nitrógeno atmosférico sea “fijado”, esto es, que sea extraído del aire y se enlace a moléculas de hidrógeno u oxígeno para formar compuestos inorgánicos utilizables, principalmente amonio (NH_4) y nitrato (NO_3).

La cantidad de nitrógeno gaseoso que se fija en un momento dado por procesos naturales representa sólo una pequeña adición al reservorio de nitrógeno previamente fijado que circula entre los componentes bióticos y abióticos de los ecosistemas terrestres. Aunque gran parte de ese nitrógeno tampoco está disponible, sino que se encuentra atrapado en la materia orgánica de los suelos—en restos de material vegetal y animal parcialmente podridos—que deben ser descompuestos por microorganismos. Estos liberan el nitrógeno en forma de amonio o nitratos, permitiendo que se recicle a través de la cadena alimenticia. Las dos principales fuentes

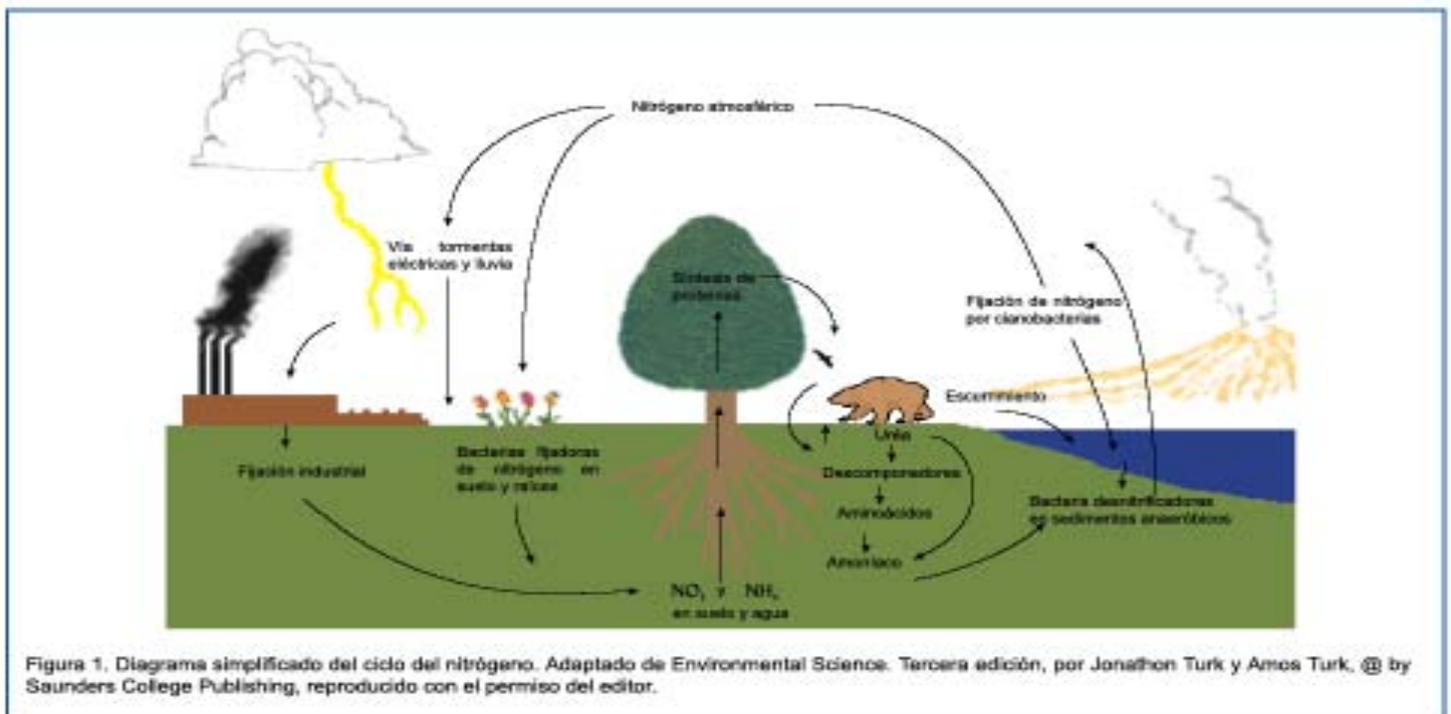


Figura 1. Diagrama simplificado del ciclo del nitrógeno. Adaptado de Environmental Science, Tercera edición, por Jonathon Turk y Amos Turk, © by Saunders College Publishing, reproducido con el permiso del editor.

naturales de fijación que constituyen nuevas entradas de nitrógeno gaseoso a este ciclo, son los relámpagos y la actividad de organismos fijadores.

Los organismos fijadores incluyen un número relativamente bajo de algas y bacterias. Muchos de ellos viven libremente en el suelo, pero los más importantes son las bacterias que forman asociaciones simbióticas estrechas con plantas superiores. Las bacterias simbióticas que fijan nitrógeno, como por ejemplo *Rhizobia*, habitan y realizan sus actividades en nódulos en las raíces de chícharos, frijoles, alfalfa y otras leguminosas. Estas bacterias producen una enzima que les permite convertir el nitrógeno gaseoso directamente en formas útiles para las plantas.

Los relámpagos también pueden transformar de manera indirecta el nitrógeno atmosférico en nitratos que se precipitan al suelo.

Es difícil pero necesario cuantificar la tasa previa a las alteraciones humanas del ciclo de fijación natural de nitrógeno atmosférico para evaluar su impacto en el ciclo global del nitrógeno. La unidad estándar de medición para analizar el nitrógeno global es el Teragramo (Tg), que equivale a un millón de toneladas métricas de nitrógeno. Por ejemplo, los relámpagos fijan menos de 10 Tg de nitrógeno anual a nivel mundial—

y tal vez hasta menos de 5 Tg. Los microorganismos son los principales fijadores naturales de nitrógeno. Antes del cultivo extensivo de leguminosas, los organismos terrestres fijaban probablemente entre 90 y 140 Tg de nitrógeno por año. Un límite superior razonable para el índice de fijación natural de nitrógeno en la tierra es de alrededor de 140 Tg por año.

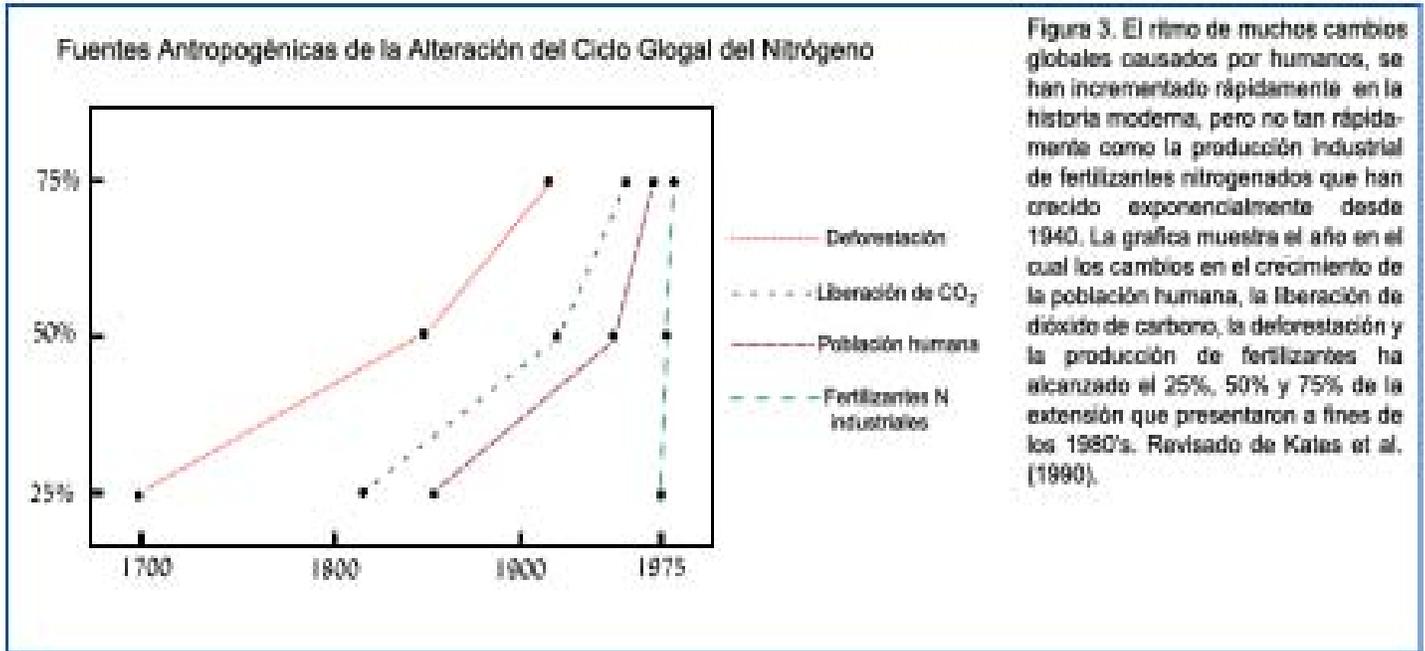
FIJACIÓN DE NITRÓGENO POR ACTIVIDADES HUMANAS

Durante el siglo pasado, las actividades humanas han acelerado claramente la tasa de fijación de nitrógeno en los suelos, duplicando efectivamente la transferencia anual del vasto pero no disponible reservorio atmosférico hacia formas nitrogenadas biológicamente asimilables. Las principales fuentes de aumento incluyen procesos industriales para la producción de fertilizantes, la quema de combustibles fósiles y los cultivos de soya, chícharo, y otros cultivos que hospedan bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno. Además, las actividades humanas están acelerando la liberación de nitrógeno almacenado a largo plazo en los suelos y materia orgánica.



Figura 2. El nitrógeno es el principal limitante en muchos ecosistemas, incluyendo la mayoría de aquellos ubicados en zonas templadas, como esta sabana con encinos. El número e identidad de las especies de plantas y animales que viven en tales ecosistemas terrestres y el funcionamiento del ecosistema, dependen de la tasa de ingreso de nitrógeno al mismo.

Fotografía por G. Tilman



Fertilizantes Nitrogenados

Actualmente la fijación industrial de nitrógeno para uso como fertilizante alcanza un total de 80 Tg por año, y representa por mucho la contribución humana más alta de entrada de nitrógeno al ciclo global (Figura 3). Esta cifra no incluye la contribución por abonos u otros fertilizantes orgánicos, que representan una transferencia de nitrógeno ya fijado de un estado a otro, más no una fijación nueva.

El proceso de fabricación de fertilizantes por medio de fijación industrial de nitrógeno fue desarrollado por primera vez en Alemania durante la Primer Guerra Mundial, y ésta producción ha crecido exponencialmente desde 1940. En años recientes, el incremento en la producción y uso de fertilizantes industriales ha sido verdaderamente asombroso. La cantidad de nitrógeno fijado por procesos industriales, que se aplicó a los cultivos desde 1980 a 1990 superó la cantidad total aplicada en la historia de la humanidad.

Hasta finales de los 70's la mayor parte de los fertilizantes industriales se aplicaban en los países desarrollados. El uso en estas regiones ya se ha estabilizado, mientras que en los países en vías de desarrollo ha incrementado dramáticamente. La culminación del crecimiento poblacional y el incremento de las áreas urbanas garantiza que la producción de fertilizantes continúe y aumente durante décadas en función de satisfacer la creciente demanda por la producción de alimentos.

Cultivos Fijadores De Nitrógeno

Cerca de un tercio de la superficie terrestre está destinada a usos agrícolas y de pastizales, y los

humanos han sustituido extensas áreas de vegetación natural diversa por monocultivos de leguminosas como soya, frijol y pastizales de forrajeo. Debido a que estas plantas hospedan bacterias fijadoras de nitrógeno, conducen una gran cantidad de nitrógeno directamente de la atmósfera, aumentando grandemente la tasa de fijación de nitrógeno que previamente ocurría en los suelos de esas tierras. También ocurren tasas de fijación sustanciales en cultivos de algunas plantas que no son leguminosas, especialmente en los de arroz. Todo esto representa nuevos ingresos de nitrógeno biológicamente asimilable como consecuencia de las actividades humanas. Sin embargo, resulta más difícil evaluar la cantidad de nitrógeno fijado por cultivos que la por producción industrial. Las estimaciones van desde 32 hasta 53 Tg por año. Como promedio, en éste artículo se manejan 40 Tg.

Quema De Combustibles Fósiles

La quema de combustibles fósiles como el carbón y aceites, liberan hacia la atmósfera nitrógeno almacenado durante muchos años, en formaciones geológicas, en forma de gases traza como el óxido nitroso. Las combustiones que se dan a altas temperaturas también fijan directamente pequeñas cantidades de nitrógeno. En suma, la operación de automóviles, fábricas, plantas generadoras y otros procesos de combustión fijan más de 20 Tg de nitrógeno anualmente. Este es considerado nitrógeno nuevo entrante al ciclo pues ha estado atrapado durante millones de años y de no ser liberado por las actividades humanas, permanecería atrapado indefinidamente.

Mobilización De Nitrógeno Almacenado

Además aumentar la tasa de fijación y liberar el nitrógeno de las reservas geológicas, las actividades humanas también movilizan el nitrógeno almacenado a largo plazo las reservas de almacenamiento biológico como en la materia orgánica de los suelos y los troncos de los árboles así contribuyendo aún más a la proliferación del nitrógeno biológicamente disponible. Las actividades que ejercen este efecto incluyen la quema de bosques, leña y pastizales, las cuales emiten más de 40 Tg de nitrógeno anualmente; el drenaje de humedales, que establece el estado de oxidación de la materia orgánica del suelo, que podría movilizar 10 Tg de nitrógeno al año o más; y el desmonte para tierras de cultivo, que podrían movilizar hasta 20 Tg anualmente.

Existen, sin embargo, substanciales incertidumbres científicas en relación a la cantidad y el destino del nitrógeno que se moviliza a través de dichas actividades. Tomándolas en consideración, sin embargo, podrían contribuir significativamente a los cambios en el ciclo global del nitrógeno.

Fijación Por Actividades Humanas vs Fijación Natural

En conjunto, la producción de fertilizantes, los cultivos de leguminosas y la quema de combustibles fósiles depositan aproximadamente 140 Tg de nitrógeno nuevo hacia los ecosistemas terrestres cada año, cifra que iguala las estimaciones más altas de fijación natural por organismos en dichos ecosistemas. Otras actividades humanas liberan y hacen disponible un 50% más de ésta cantidad de nitrógeno. Con estas evidencias, es justo en concluir que las actividades humanas han, por lo menos, duplicado la transferencia de nitrógeno de la atmósfera hacia la fase terrestre del ciclo biológico del nitrógeno.

Este nitrógeno adicional se esparce de manera heterogénea a través de la superficie terrestre: algunas áreas como el norte de Europa están siendo alteradas profundamente, mientras que otras zonas, como algunas regiones remotas del hemisferio sur reciben poca influencia directa del nitrógeno generado por actividades humanas. Sin embargo, no hay región que no este siendo afectada de alguna manera. El incremento de nitrógeno fijado que circula en el globo y que llega a los suelos por deposición seca o húmeda es fácil de detectar, inclusive en las muestras de las perforaciones en el hielo glacial de Groenlandia.

IMPACTOS SOBRE LA ATMÓSFERA

Una de las principales consecuencias de las alteraciones antropogénicas sobre el ciclo del nitrógeno

es el cambio químico de la atmósfera, tanto a nivel local como global (Figura 4)—específicamente, el aumento en las emisiones de gases traza nitrogenados, tales como el óxido nitroso, óxido nítrico y amoníaco (NH_3). Aunque dichas emisiones han recibido menos atención que el incremento en las emisiones de dióxido de carbono y diversos compuestos sulfurados, los gases traza nitrogenados tienen efectos sobre el ambiente, tanto desde que se forman en la atmósfera hasta después de que se depositan en el suelo. En primer lugar, el óxido nitroso tiene un largo período de vida en la atmósfera y contribuye al efecto invernadero ocasionado por el hombre, que probablemente calienta la tierra alterando el clima a nivel global. El óxido nítrico es un precursor importante de la lluvia ácida y del *smog* fotoquímico.

Algunas de las actividades humanas discutidas previamente afectan de manera directa a la atmósfera. Por ejemplo, básicamente, el total de los más de 20 Tg anuales del nitrógeno que se fija por el uso de automóviles y el de otras emisiones que involucran la quema de combustibles fósiles, es liberado directamente hacia la atmósfera en forma de óxido nítrico. Otras actividades incrementan las emisiones hacia la atmósfera de manera indirecta. La fertilización intensiva de suelos agrícolas incrementa la tasa a la que el nitrógeno en forma de amoníaco se volatiliza hacia la atmósfera. También puede incrementar la tasa a la que el amonio y nitratos se rompen por actividad bacteriana, aumentando la liberación de óxido nítrico. Incluso en suelos con vegetación nativa o tierras sin manejo que reciben vientos provenientes de tierras agrícolas o áreas industriales, reciben nitrógeno fijado por actividades humanas a través de lluvia o deposición eólica, que pueden estimular el aumento de emisiones de gases nitrogenados en los suelos.

Óxido Nitroso

El óxido nitroso es un gas con una gran capacidad para atrapar calor en la atmósfera, en parte debido a que absorbe radiación infrarroja que sale de la tierra y que no es atrapada por otros gases de efecto invernadero, por el vapor de agua o por el dióxido de carbono. Al absorber y devolver a la tierra este calor, el óxido nitroso contribuye en un pequeño porcentaje al calentamiento global por parte de gases de efecto invernadero.

Aunque el óxido nitroso no es reactivo ni de larga vida en la atmósfera inferior, cuando llega a la estratosfera puede desencadenar reacciones que desgastan y adelgazan la capa de ozono estratosférica que protege a la tierra de la nociva radiación ultravioleta.

Emisiones Globales de Nitrógeno Causadas por Actividades Humanas.

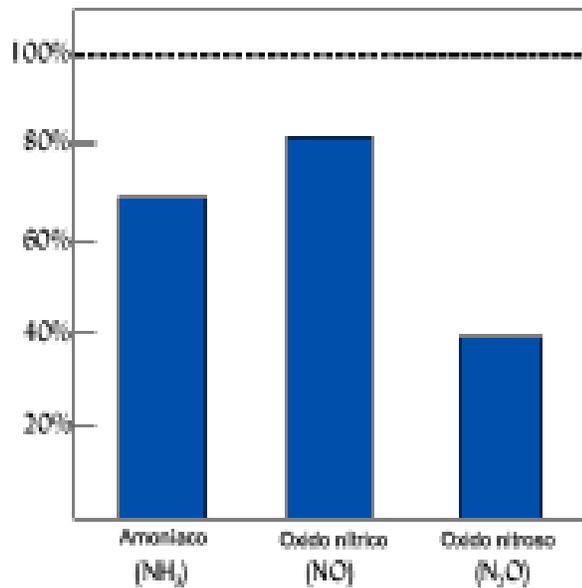


Figura 4. Las actividades humanas son responsables de una gran proporción de las emisiones globales de gases traza que contienen nitrógeno, incluyendo el 40% del oxido nitroso, el 80% o mas del oxido nítrico y el 70% o mas de las liberaciones de amonio. El resultado es un incremento en la concentraciones atmosféricas de oxido nitroso, del nitrógeno precursor del smog y del nitrógeno biológicamente disponible que se depositan de la atmósfera fertilizando los ecosistemas. Los datos de amonio son de Schlesinger y Hartley (1992), los de oxido nítrico de Delmas *et al.* (en prensa) y los de oxido nitroso de Prather *et al.* (1995).

La concentración de óxido nitroso en la atmósfera está aumentando a tasas de 0.2 a 0.3% anualmente. Aunque este incremento está bien documentado, las fuentes o causas siguen siendo inciertas. Tanto la quema de combustibles fósiles como el impacto directo de la fertilización agrícola son consideradas y rechazadas como la principal fuente de emisiones de óxido nitroso hacia la atmósfera. En cambio, se está desarrollando la tendencia a considerar que muchas de las actividades humanas contribuyen sistemáticamente al enriquecimiento del ciclo terrestre del nitrógeno. Esta "fuente dispersa" incluye el uso de fertilizantes, el enriquecimiento con nitrógeno de los mantos freáticos, la saturación en nitrógeno de los bosques y su quema, el desmonte de vegetación nativa e inclusive la fabricación de nylon, ácido nítrico y otros productos industriales.

El efecto neto es el aumento en las concentraciones globales de un potente gas invernadero que también contribuye al deterioro de la capa de ozono estratosférico.

Óxido Nítrico Y Amoníaco

A diferencia del óxido nitroso, que no es reactivo en la atmósfera inferior, tanto el óxido nítrico como el amoníaco son altamente reactivos y por tanto de vida más corta. De tal manera que los cambios en su concentración dentro de la atmósfera pueden ser detectados únicamente a escalas locales o regionales.

El óxido nítrico desempeña diversas funciones críticas en la química atmosférica, incluyendo la

catalización de *smog* fotoquímico (o *smog* café). En presencia de luz solar, el óxido nítrico y el oxígeno reaccionan con hidrocarburos emitidos por los automóviles para formar ozono, el componente más peligroso del *smog*. El ozono que se encuentra a nivel de suelo tiene severos efectos determinantes para la salud humana así como para la salud y productividad de bosques y cultivos.

El óxido nítrico, en conjunto con otros óxidos de nitrógeno y sulfuro, pueden transformarse en la atmósfera en ácido nítrico y ácido sulfúrico, los principales componentes de la lluvia ácida.

A pesar de que diversas fuentes contribuyen a la liberación de óxido nítrico, la combustión es el proceso dominante. La quema de combustibles fósiles emite más de 20 Tg de óxido nítrico cada año. La quema de bosques y otros materiales vegetales pueden sumar alrededor de 10 Tg, y las emisiones globales de óxido nítrico por lo suelos, de los cuales una fracción substancial es causada por acción humana, es de 5 a 20 Tg anuales. En total, el 80% o más de las emisiones de óxido nítrico a nivel mundial son ocasionadas por actividades humanas y en muchas regiones, el resultado es un incremento en las concentraciones de *smog* y de lluvia ácida.

En comparación con el óxido nítrico, el amoníaco funciona como el principal neutralizador de ácidos en la atmósfera, ejerciendo una influencia opuesta a la acidez de los aerosoles, del agua de las nubes, y de las lluvias. Cerca del 70% de las emisiones de amoníaco son provocadas por los humanos. Cerca de 10 Tg de

amoníaco se volatilizan de las tierras de cultivo anualmente; el amoníaco liberado por desechos de animales domésticos es de aproximadamente 32 Tg; y la quema de bosques libera cerca de 5 Tg cada año.

EFFECTOS SOBRE EL CICLO DEL CARBONO

El incremento en las emisiones de nitrógeno hacia el aire ha inducido un aumento en la deposición de nitrógeno en la tierra y los océanos. Gracias al efecto fertilizante del nitrógeno, al estimular el crecimiento vegetal, es posible que éstas deposiciones influyan indirectamente sobre la atmósfera alterando el ciclo global del carbono.

Gran parte de la superficie terrestre, la exuberancia del crecimiento vegetal y la acumulación adicional de material vegetal han estado limitados históricamente por aportaciones escasas de nitrógeno, particularmente en las regiones templadas y boreales. La actividad humana ha incrementado substancialmente la deposición de nitrógeno en gran parte de estas áreas, haciendo que nos planteemos preguntas importantes: ¿cuanto crecimiento vegetal extra ha sido ocasionado por las adiciones de nitrógeno ocasionadas por el hombre?, en consecuencia, ¿cuanto carbono extra ha sido almacenado en los ecosistemas terrestres en lugar de contribuir al incremento en las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera?

Las respuestas a estas preguntas podrían ayudar a explicar el desequilibrio en el ciclo del carbono, que ha llegado a ser conocido como el “*sumidero perdido*”. Las emisiones de dióxido de carbono ocasionadas por actividad humana, tales como la quema de combustibles fósiles y deforestación, exceden más de los 1,000 Tg de dióxido de carbono que se sabe que se acumula en la atmósfera cada año. ¿Podrían, los incrementos en el crecimiento vegetal, ser el sumidero que explique el destino de la mayor parte de éste carbono perdido?



Figura 5. Las plantas silvestres que viven en ecosistemas naturales, como este lupinus, es una planta fijadora del nitrógeno que domino el ciclo de este gas por millones de años. La producción humana de fertilizantes nitrogenados, quema de combustibles fósiles y el cultivo intensivo de leguminosas, introduce tanto nitrógeno a los ecosistemas terrestres como lo hacen todos los procesos naturales combinados.

Experimentos realizados en Europa y América indican que la mayor parte del nitrógeno retenido en los bosques, humedales y tundras estimulan la asimilación y almacenamiento de carbono. Por otro lado, este nitrógeno también puede estimular la descomposición por microorganismos y en consecuencia liberar carbono de la materia orgánica del suelo. Sin embargo, la asimilación de carbono a través del crecimiento vegetal, aparentemente excede las pérdidas de carbono, especialmente en los bosques.

Diversos grupos de científicos han intentado calcular la cantidad de carbono que podría almacenarse en la

vegetación terrestre gracias al crecimiento ocasionado por adiciones de nitrógeno en el sistema. Los resultados estiman un rango de entre 100 y 1300 Tg anualmente. Este número se ha incrementado en investigaciones recientes, conforme la magnitud de alteración sobre el ciclo del nitrógeno por actividades humanas se ha ido aclarando. Los análisis más recientes sobre el ciclo global del carbono, realizados por el Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático, han llevado a la conclusión de que la deposición de nitrógeno puede representar un componente principal del “sumidero perdido” de carbono.

Estimaciones más precisas serán posibles cuando se tenga un entendimiento más integral sobre la fracción de nitrógeno fijado por actividades humanas, que actualmente está retenido dentro de diversos ecosistemas terrestres.

SATURACIÓN DE NITRÓGENO Y FUNCIONALIDAD DE LOS ECOSISTEMAS

Existen límites en relación a cuánto puede influenciarse el crecimiento vegetal por efecto de fertilizantes nitrogenados. Hasta cierto punto, cuando las deficiencias naturales de nitrógeno en los

ecosistemas han sido totalmente compensadas, el crecimiento vegetal se ve limitado por la escasez de otros nutrientes, como el fósforo, calcio o agua. Cuando la vegetación deja de responder a las adiciones de nitrógeno, se dice que el ecosistema alcanzó un estado de "saturación de nitrógeno". En teoría, cuando un ecosistema está saturado de nitrógeno y sus suelos, plantas y microorganismos no lo pueden seguir utilizando o reteniendo, todas las nuevas deposiciones del nutriente se dispersan a través del agua hacia cauces de ríos o se volatilizarán hacia la atmósfera.

La saturación de nitrógeno tiene algunas consecuencias graves para la salud y funcionamiento adecuado de los ecosistemas. Estos impactos se hicieron presentes por primera vez en Europa, hace casi dos décadas, cuando los científicos observaron un aumento significativo en la concentración de nitratos en algunos lagos y ríos además de que notaron también una amarillamiento y pérdida de las acículas en árboles de *Picea* y en otros bosques de coníferas sometidos a fuertes deposiciones de nitrógeno. Estas observaciones condujeron a la realización de diversos experimentos de campo en los Estados Unidos de Norteamérica y en Europa, que han revelado una compleja cascada de efectos que se desencadenaron por el exceso de nitrógeno en los suelos de los bosques.

Conforme se forma amoníaco en los suelos, éste es convertido en nitrato por actividad bacteriana, proceso en el que se liberan iones de hidrógeno que contribuyen a la acidificación de los suelos. El incremento de nitratos aumenta las emisiones de óxido

nitroso y provoca la filtración de nitrato altamente soluble hacia ríos o agua subterránea. Conforme los nitratos con cargas negativas se escurren, arrastran con ellos minerales alcalinos de carga positiva como el calcio, magnesio y potasio. Así, las modificaciones en el ciclo del nitrógeno, por las actividades humanas, disminuyen la fertilidad de los suelos pues aumentan la pérdida de calcio y otros nutrientes que son vitales para el crecimiento de las plantas. Conforme se remueve el calcio y el suelo se acidifica, se movilizan iones de aluminio, que eventualmente alcanzan concentraciones tóxicas que pueden dañar las raíces de plantas o matar peces si éste llega a los cuerpos de agua. Los árboles que crecen en sitios saturados de nitrógeno, pero deficientes en calcio, magnesio y potasio pueden desarrollar un desequilibrio en la concentración de nutrientes en sus raíces y hojas, lo que puede reducir su capacidad y eficiencia para realizar fotosíntesis, detener su crecimiento e inclusive aumentar su tasa de mortandad.

La saturación de nitrógeno esta mucho más avanzada sobre áreas extensas en el norte de Europa que en Estados Unidos, pues la deposición de nitrógeno causada por el hombre es mucho mayor en Europa que en cualquiera de los sitios más deteriorados de Norte América. En los ecosistemas Europeos saturados de nitrógeno, una fracción substancial de nitrato atmosférico depositado se moviliza de la tierra hacia los cuerpos de agua sin haber sido aprovechado por ningún organismo o haber desempeñado algún papel en el ciclo biológico.



Figura 8. Se cree que la deposición del nitrógeno atmosférico es responsable del amarillamiento y pérdida de las acículas en las coníferas y de casos de mortalidad de bosques, tal como se muestra aquí.

En contraste, en el norte de los Estados Unidos, el aumento en los escurrimientos de nitrato de los suelos y grandes fluctuaciones en las proporciones de nutrimentos de las hojas de los árboles, generalmente se han observado sólo en ciertos tipos de bosques. Estos incluyen sitios elevados que reciben grandes deposiciones de nitrógeno y en sitios con suelos someros que contienen escasos minerales alcalinos que puedan amortiguar la acidificación del suelo. En otros sitios del país ya se han identificado las primeras etapas de saturación de nitrógeno en respuesta a altas entradas de nitrógeno en los bosques que rodean la cuenca de Los Ángeles y en franja frontal de las Rocallosas de Colorado.

Algunos bosques tienen una alta capacidad para retener nitrógeno adicional, especialmente aquellos que se están recuperando de manejos de tala intensos o repetitivos, actividad que usualmente causa pérdidas severas de nitrógeno. Además, la capacidad que poseen los bosques para retener nitrógeno depende de su potencial para continuar creciendo y del la concentración de nitrógeno disponible en los suelos. Aunado a esto, los impactos de la deposición de nitrógeno están fuertemente ligadas a otros cambios acelerados causados por las actividades humanas, tales como el cambio en el uso de suelo, el clima, las concentraciones de dióxido de carbono y los niveles de ozono en la atmósfera.

EFFECTOS SOBRE LA BIODIVERSIDAD Y LA MEZCLA DE ESPECIES

Las aportaciones limitadas de nitrógeno biológicamente disponible son determinantes para la vida en la mayor

parte de los ecosistemas, y muchas especies vegetales nativas están adaptadas a ésta condición restringida. Nuevas aportaciones de nitrógeno hacia estos ecosistemas pueden causar cambios considerables sobre las especies dominantes e inclusive una reducción marcada en la diversidad de las especies, pues aquellas pocas plantas adaptadas para aprovechar las altas concentraciones de nitrógeno, compiten mejor y terminan por desplazar a las menos adaptadas. En Inglaterra, por ejemplo, los fertilizantes nitrogenados aplicados a unos pastizales, como parte de un experimento, causaron una dominancia de

pocas especies de pastos que soportan altas concentraciones de nitrógeno en los suelos y a la pérdida de muchas otras especies de plantas. Sobre la tasa más alta de fertilización, el número de especies de plantas bajó más de cinco veces de lo que había inicialmente. En Norte América, de manera similar, se



Fotografía por D. Tilman

Figura 7. Diferentes tasas de adición de nitrógeno llevan a cambios marcados en la composición de especies de plantas e insectos y en la diversidad de especies de estos cuadros de pastizal en Minnesota. Cada cuadro es de 4m x 4m (aproximadamente 13 x 13 pies) y han recibido cantidades adicionales de nitrógeno (nitrato de amonio) como parte de un experimento desde 1982.



Fotografía por D. Tilman

Figura 8. Los pastizales nativos de Minnesota a menudo contienen de 20 a 30 o más especies de plantas por metro cuadrado, como muestra este cuadro, se trata de un cuadro "control" que no recibe nitrógeno y que mantiene su diversidad de plantas original.

ha observado una reducción dramática de la biodiversidad causada por la fertilización de pastizales en Minnesota y California (Figuras 7,8 y 9). Se considera que la gran pérdida de diversidad observada en décadas recientes sobre los brézales ricos en especies del el Oeste de Europa, fue ocasionada por la deposición de nitrógeno dirigida por actividades humanas.

En los países bajos de Europa la combinación de la densidad poblacional alta, las actividades industriales y ganaderas intensivas, han generado las tasas más altas de deposición de nitrógeno en el mundo. Una consecuencia bien documentada ha sido la conversión de brézales ricos en especies hacia pastizales y bosques de poca riqueza. No solo la riqueza de especies del brezal, si no la diversidad biológica del paisaje ha sido reducida, de manera que las comunidades vegetales ahora asemejan a la composición propia de tierras fértiles. El ensamblaje único de especies adaptadas a suelos arenosos, pobres en nitrógeno se está perdiendo en la región.

La pérdida de biodiversidad causada por entradas de nitrógeno a los suelos puede afectar también otros procesos ecológicos. Experimentos realizados recientemente en pastizales de Minnesota, mostraron que en aquellos ecosistemas reducidos en riqueza de especies a causa de fertilización, la productividad primaria se volvió inestable debido al aumento en las sequías. Inclusive en años húmedos, los caprichos normales del clima produjeron una variación mucho mayor entre años en la productividad

de parcelas de pastizales pobres en especies que en aquellas más diversas.

EFFECTOS SOBRE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

Cambios Históricos En La Composición Química Del Agua

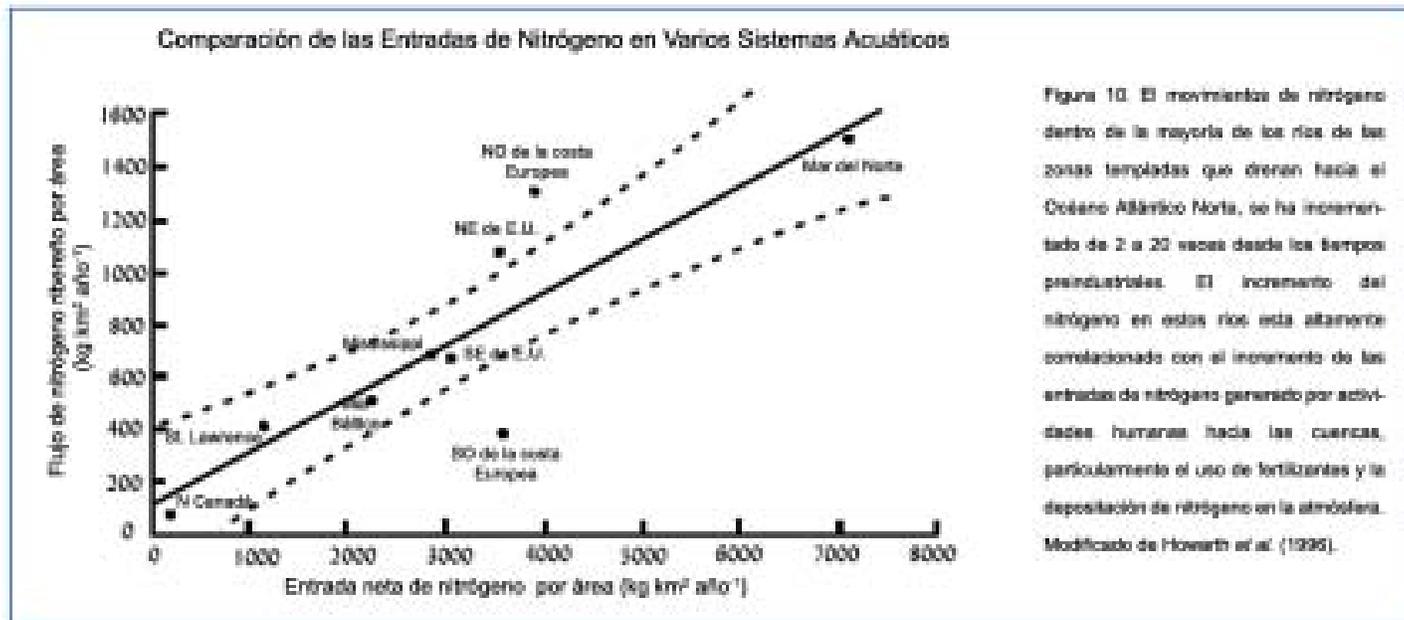
No es sorprendente, que las concentraciones de nitrógeno en las aguas superficiales aumenten conforme las actividades humanas han acelerado la tasa de nitrógeno fijado puesto en circulación. En un estudio reciente, realizado en la cuenca oceánica del Atlántico del Norte por científicos de una docena de países, se estimó que la movilización del nitrógeno disuelto total que entra los ríos en zonas templadas de la cuenca se ha incrementado de 2 a 20 veces desde los tiempos preindustriales (Figura 10). Para los ríos en la región del Mar del Norte, se estima que el incremento en nitrógeno podría ser desde 6 hasta 20 veces mayor. Estos aumentos están altamente correlacionados con las entradas de nitrógeno a los cuerpos de agua ocasionadas principalmente por la utilización de fertilizantes y por deposición atmosférica.

Durante décadas, las concentraciones de nitrato en muchos ríos y reservas de agua dulce han sido monitoreados cuidadosamente en las regiones desarrolladas del mundo, y los análisis de los datos obtenidos confirman un aumento histórico en los niveles de nitrógeno en las aguas superficiales. En mil lagos de Noruega, por ejemplo, los niveles de nitrato se han duplicado en menos de una década. En el Río



Fotografía por D. Tilman

Figura 9. La adición de nitrógeno en este cuadro experimental, cercano al sitio de la Figura 8, llevo a la pérdida de casi todas las especies nativas de la pradera y a la dominancia de una hierba invasora europea. En 1982 este cuadro lucía de manera muy similar al que se muestra en la Figura 8.



Mississippi, los nitratos han aumentado en más del doble desde 1965. En los grandes ríos del Noreste de Estados Unidos las concentraciones de nitrato se incrementaron de tres a diez veces desde los inicios de 1900, y las evidencias sugieren una tendencia similar en muchos ríos europeos.

Nuevamente, no es sorprendente que las concentraciones de nitratos en los ríos más importantes del mundo se incrementen en relación a la densidad poblacional que habita cerca de las cuencas. Las concentraciones de nitrógeno total disuelto en los ríos también están correlacionadas con la densidad de la población humana, sin embargo el nitrógeno total no se incrementa tan rápidamente como sucede con la fracción de nitratos. Las evidencias sugieren que con el incremento de las perturbaciones ocasionados por el hombre, una mayor proporción del nitrógeno total del agua superficial se compone de nitratos.

El aumento en las concentraciones de nitrato también han sido observadas en aguas subterráneas de muchas regiones agrícolas, aunque la magnitud de ésta tendencia ha sido difícil de determinar exceptuando por algunos acuíferos muy bien caracterizados. En resumen, los aportes hacia el agua subterránea, probablemente representen sólo una pequeña fracción del aumento total de nitratos transportado por aguas superficiales. De cualquier manera, el agua subterránea suele tener largos períodos de residencia en los acuíferos, lo cual implica que la calidad de agua subterránea continuará declinando en tanto las actividades humanas sigan teniendo impactos substanciales sobre el ciclo del nitrógeno.

Los niveles altos de nitratos en el agua potable generan preocupaciones importantes sobre la salud

humana, especialmente por los niños. Los microorganismos en los estómagos de los niños pueden convertir los altos niveles de nitratos en nitritos, cuando éstos son absorbidos hacia el torrente sanguíneo, el oxígeno transportado por la hemoglobina es convertido por el nitrito en una forma poco efectiva llamada metahemoglobina. Altos niveles de metahemoglobina—una condición anémica llamada metahemoglobinemia—puede causar daños cerebrales o la muerte. Esta condición es poco común en los Estados Unidos, pero el potencial dañino existe siempre que las concentraciones de nitrato en el agua superen los estándares establecidos por los servicios de salud pública de Estados Unidos (10 miligramos por litro).

Nitrógeno Y Acidificación De Los Lagos

El rol del ácido nítrico se vuelve cada vez más evidente en cuanto a la acidificación de los lagos y ríos básicamente por dos razones. Por un lado, la mayor parte de los esfuerzos realizados para controlar la deposición de ácidos—incluyendo lluvia ácida, nieve, niebla, bruma y deposición seca—se han concentrado en reducir las emisiones de dióxido sulfúrico para limitar la formación de ácido sulfúrico en la atmósfera. En muchas áreas, estos esfuerzos han sido exitosos en reducir las entradas de ácido sulfúrico en los suelos y agua, mientras que las emisiones de óxidos de nitrógeno, los precursores del ácido nítrico, no han sido monitoreados. La segunda razón, es que muchos cuerpos de agua en zonas de deposición de nitrógeno moderadas a altas están alcanzando sus puntos de saturación, y los suelos que se están acidificando como consecuencia, tienen poca capacidad para amortiguar la lluvia ácida antes de que ésta llegue hacia los ríos.



Fotografía por Robert Howarth

Figura 11. Plantas que habitan en el fondo de ecosistemas marinos y que recibieron tasas naturales de adición de nitrógeno. Noten la alta diversidad de plantas y su espaciamento.

Un factor adicional en muchas áreas, es que el ácido nítrico predomina entre los contaminantes que se acumulan en la nieve de invierno. Mucho de éste ácido nítrico es liberado con los primeros deshielos al llegar la primavera, causando una lixiviación repentina, se da entonces un “pulso ácido” en los lagos vulnerables.

Agregar nitrógeno inorgánico a los ecosistemas de agua dulce que también son ricos en fósforo puede eutrofizar el agua además de acidificarla. Generalmente tanto la eutrofización como la acidificación conllevan a la pérdida de biodiversidad de especies vegetales y animales. Las poblaciones de peces, en particular, se han visto reducidas o eliminadas en muchos lagos acidificados en Escandinava, Canadá y en el Noreste de los Estados Unidos.

Debido a que la saturación por nitrógeno de los ecosistemas continúa incrementándose, junto con la deposición de nitrógeno generada por el hombre, sólo el control sobre las emisiones de dióxido sulfúrico no será suficiente para disminuir la lluvia ácida o prevenir sus efectos dañinos sobre ríos y lagos. Los gobiernos Europeos ya han reconocido la importancia del nitrógeno en la acidificación de los suelos y agua y los esfuerzos intergubernamentales se están

encaminando a reducir las emisiones y deposición a niveles regionales.

Eutrofización En Estuarios Y Aguas Costeras

Una de las consecuencias mejor documentadas y comprendidas sobre las alteraciones humanas al ciclo del nitrógeno es la eutrofización de estuarios y zonas costeras marinas (Figuras 11 y 12). Es discutiblemente, la mayor amenaza humana a la integridad de los ecosistemas costeros.

En contraste con la mayoría de los lagos templados, en donde el fósforo es el principal nutrimento que limita de la productividad primaria de algas y otras plantas acuáticas y controla la eutrofización, en la mayoría de los estuarios templados y en aguas marinas costeras, estos procesos son controlados por el nitrógeno. Esto se debe principalmente a que, en condiciones naturales, el flujo de nitrógeno hacia estas aguas y las tasas de fijación de nitrógeno por parte de

organismos planctónicos son relativamente bajos, mientras que los microorganismos en los sedimentos marinos liberan nitrógeno constantemente hacia la atmósfera.

Cuando las altas tasas de deposición de nitrógeno causan eutrofización en aguas estratificadas—donde una gradiente de temperatura dado evita que se mezclen aguas superficiales cálidas con aguas profundas más frías—el resultado puede ser la anoxia (ausencia de oxígeno) o hipoxia (bajas concentraciones



Fotografía por Robert Howarth

Figura 12. Plantas que habitan en el fondo de ecosistemas marinos que recibieron altas tasas de ingreso de nitrógeno. Noten que hay pocas especies de plantas y sus hojas están cubiertas con una gruesa capa de algas.

de oxígeno) de aguas profundas. Ambas condiciones se están volviendo prevalecientes en muchos estuarios y zonas costeras. Hay evidencia suficiente indicando que desde la década de 1950 ó 1960, se ha incrementado la anoxia en el Mar Báltico y en la Bahía de Chesapeake. Incrementos en los períodos de hipoxia han aumentado en Long Island Sound, en el Mar del Norte y en Kattegat, resultando en pérdidas significativas de especies de peces y mariscos.

La eutrofización también está ligada con la pérdida de biodiversidad, tanto de las comunidades bentónicas marinas—incluyendo algas marinas, pastos marinos y corales—como de los organismos planctónicos. En aguas eutróficas, por ejemplo, las algas problemáticas pueden llegar a dominar las comunidades fitoplanctónicas. Durante décadas recientes se han observado crecimientos explosivos de algunas especies de algas tóxicas en muchos estuarios y zonas costeras marinas alrededor del mundo. Durante la década de 1980, los afloramientos tóxicos de dinoflagelados y organismos de marea café provocaron muertes extensivas de peces y mariscos en muchos estuarios. Aunque las causas de éstos fenómenos no se conocen detalladamente, hay evidencias convincentes de que el enriquecimiento de las zonas por nutrimentos es, por lo menos en parte, responsable de dichos afloramientos.

INCERTIDUMBRES IMPORTANTES

Aunque éste reporte está enfocado hacia lo que se sabe sobre los cambios en el ciclo del nitrógeno provocados por las actividades humanas, aún quedan muchas dudas al respecto. Algunas de ellas han quedado plasmadas en secciones anteriores del artículo. Esta sección, sin embargo, está enfocada a procesos importantes que aún son tan poco comprendidos que se dificulta distinguir los impactos provocados por el hombre o poder predecir sus consecuencias.

Fijación De Nitrógeno En El Mar

Poco se sabe sobre el ciclo del nitrógeno no modificado, en condiciones naturales, en mar abierto. Estimaciones conservadoras sobre las tasas de fijación de nitrógeno en el mar abierto, varían desde menos de 30 hasta más de 300 Tg anuales. Algunas evidencias sugieren que las modificaciones al ciclo del nitrógeno por actividades humanas podrían alterar procesos biológicos en mar abierto, pero no hay ningún marco de referencia sólido contra el cual evaluar cambios potenciales dirigidos por el hombre sobre la fijación de nitrógeno en el mar.

Cambios En Recursos Limitantes

Una consecuencia de las alteraciones antropogénicas del ciclo nitrógeno global, es el cambio



Fotografía por Nadine Caverder

Figura 13. Las actividades humanas, tales como la producción de fertilizantes, los crecientes cultivos de leguminosas y la quema de combustibles fósiles son ahora, de igual o mayor magnitud que los procesos naturales del ciclo del nitrógeno. La influencia humana sobre el ciclo del nitrógeno impacta el funcionamiento de muchos ecosistemas terrestres y acuáticos incluyendo aquellos que parecen ser hábitat prístinos, como este ecosistema alpino.

en los recursos que limitan los procesos biológicos de muchas áreas. Actualmente grandes cantidades de nitrógeno son depositadas en muchos ecosistemas que fueron alguna vez deficientes en este nutrimento. Las especies dominantes en estos sistemas pudieron haber evolucionado bajo condiciones limitadas en la disponibilidad de nitrógeno, así, la forma en la que crecen y entablan relaciones simbióticas puede ser un reflejo de sus adaptaciones a ésta condición restringida. Eliminando dicha limitante, las especies deben operar bajo nuevas restricciones, como podrían ser el suministro de agua o fósforo inadecuado. Ahora bien, ¿Cómo se ven afectados el desempeño de los organismos y sus roles en procesos ecológicos más amplios, cuando se dan cambios en el entorno químico a los cuales no poseen antecedentes evolutivos y no están adaptados?

Capacidad Para Retener Nitrógeno

Los bosques y humedales difieren substancialmente en su capacidad para retener nitrógeno. Algunos factores que interactúan influyendo sobre ésta capacidad incluyen la textura de los suelos, el grado de erosión química de los suelos, historial de incendios, la tasa a la cual se acumula material vegetal y el uso de pastizales por parte del hombre. De cualquier forma, aún carecemos de información fundamental que ayude a comprender cómo y por qué varían los procesos de retención de nitrógeno entre los ecosistemas- menos aún sabemos cómo han cambiado y continuarán haciéndolo en el futuro.

Alteración En La Desnitrificación

En las grandes cuencas, probablemente la mayor proporción de nitrógeno entrante es transformado por actividad de bacterias desnitrificadoras y posteriormente liberado hacia la atmósfera en forma de nitrógeno gaseoso u óxido de nitroso (N_2O). Se sabe poco de el sitio exacto en donde se lleva a cabo la mayor proporción de esta actividad, aunque sabemos que en áreas ribereñas y humedales es un proceso de suma importancia. Las actividades humanas como aquellas que generan grandes deposiciones de nitratos, la construcción de presas y los cultivos de arroz probablemente han generado un aumento en la tasa de desnitrificación, mientras que al drenar humedales y alterar los ecosistemas riparios probablemente se ha causado una disminución de ésta actividad bacteriana. Sin embargo, el efecto neto de la influencia humana a éste respecto continúa siendo incierta.

Ciclo Natural Del Nitrógeno

Los registros sobre deposición y pérdidas de nitrógeno, anteriores a las extensivas alteraciones humanas al ciclo, aún están incompletos. En parte, esto refleja el hecho de que, por lo menos en algún grado, la totalidad del globo terráqueo ha sido alterado por las actividades humanas. Sin embargo, estudios realizados en regiones remotas del Hemisferio Sur, ilustran que aún hay información valiosa por recopilar en aquellos sitios que han sufrido alteraciones mínimas por las actividades del hombre.

PERSPECTIVAS FUTURAS Y OPCIONES DE MANEJO

Uso De Fertilizantes

Los aportes de nitrógeno más grandes, dirigidos por actividades humanas, están ligadas con las actividades relacionadas con la alza en la producción de alimentos. Las actividades agrícolas intensivas requieren grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados; la humanidad, a su vez, requiere de actividades agrícolas intensivas para poder soportar el crecimiento poblacional que se tentativamente se duplicará para finales del próximo siglo. En consecuencia, la producción y utilización de fertilizantes nitrogenados ha aumentado exponencialmente y las tasas de mayor uso de fertilizantes actualmente se observan en algunos países en desarrollo que poseen las tasas más altas de crecimiento poblacional. Un estudio predice que para el año 2002, la producción global de fertilizantes nitrogenados aumentará del nivel actual de cerca de 80 Tg hasta 134 Tg por año.

Disminuir el incremento en la producción de éstos fertilizantes será un desafío difícil. Sin embargo existen formas para frenar el uso de fertilizantes e inclusive es posible reducir la movilidad—y por tanto los impactos regionales y globales—del nitrógeno que es aplicado en los suelos.

Un manera de disminuir la cantidad de fertilizantes utilizados es aumentando su eficiencia. Comúnmente, por lo menos la mitad del fertilizante aplicado en los suelos se pierde hacia la atmósfera o el agua. Estas fugas representan tanto un desperdicio costoso para los agricultores como un conductor significativo del cambio ambiental. Se han identificado actividades de manejo que pueden reducir la cantidad de fertilizante utilizado y que disminuyen la pérdida de nitrógeno hacia el aire o agua sin tener que sacrificar los beneficios o ganancias (y en algunos casos incrementándolos). En primera instancia, en una plantación de caña de azúcar en Hawai se logró reducir

el uso de fertilizantes en un tercio y la pérdida de nitrógeno en forma de óxido nitroso y óxido nítrico fue hasta diez veces menor al diluir el fertilizante en agua de irrigación, aplicándolo por debajo de la superficie del suelo y de manera intermitente en relación a las necesidades del cultivo. Este manejo intensivo-conciente también probó ser más viable que aquellos métodos en los que se aplican grandes cantidades de fertilizante, en menor número de ocasiones, sobre la superficie del suelo. La implementación de éste tipo de manejo, particularmente en regiones desarrolladas, debería ser una prioridad para los agrónomos así como para los ecólogos, ya que el mejoramiento en las prácticas de manejo proveen la oportunidad de reducir los costos en la producción de alimentos mientras que se frena la velocidad a la que se da de cambio global.

También existe la forma de prevenir que el nitrógeno que se lixivia de tierras de cultivo llegue a los ríos, estuarios y costas marinas, en donde contribuye al proceso de eutrofización. En muchas regiones, las tierras agrícolas se han expandido mediante la canalización de ríos, el desmonte de bosques riparios y al drenar el agua de los humedales. Aún así, estas áreas sirven como importantes trampas naturales de nitrógeno. La restauración de humedales y áreas riparias e inclusive el establecimiento de humedales artificiales han demostrado ser efectivos en evitar que el exceso de nitrógeno entre a los cuerpos de agua.

Quema De Combustibles Fósiles

La segunda fuente principal de nitrógeno fijado por el hombre está representada por la quema de combustibles fósiles. Esta actividad, al igual que el uso de fertilizantes, se incrementara de manera marcada a principios del próximo siglo, particularmente en los países en vías de desarrollo del mundo. Un estudio sugiere que la producción de óxidos de nitrógeno a partir de combustibles fósiles aumentará en más del doble dentro de los siguientes 25 años, desde 20 Tg hasta 46 Tg por año. Reducir estas emisiones exigirá mejoras en la eficiencia de la combustión así como en la intercepción de subproductos de la combustión que se generan en la atmósfera. Igual que en el caso del uso de fertilizantes, será particularmente importante transferir las tecnologías para combustión eficiente a los países en desarrollo conforme su industria y economía se incrementen.

CONCLUSIONES

Durante el siglo pasado, las actividades humanas han incrementado al doble la tasa a la cual se fija el nitrógeno, y el paso tiende a acelerarse. Serias

consecuencias en el medio ambiente ya se han hecho presentes. En la atmósfera, las concentraciones de gases de efecto invernadero, como el óxido nitroso y los precursores del *smog* y la lluvia ácida se están incrementando. Los suelos en muchas regiones se están acidificando además de que están perdiendo nutrientes esenciales para su fertilidad. Las aguas de ríos y lagos en éstas regiones, también se están viendo afectados y el exceso de nitrógeno está siendo transportada por los ríos hacia los estuarios y costas marinas. Es muy probable que éstas aportaciones de nitrógeno sin precedentes haya contribuido ya de alguna manera a la disminución a largo plazo en la producción pesquera y en la aceleración de la pérdida de diversidad de plantas y animales tanto en los ecosistemas acuáticos como en los terrestres. Es urgente que se generen políticas nacionales e internacionales dirigidas al control en el manejo del nitrógeno, a reducir la velocidad del cambio global y a moderar sus impactos.

INFORMACION FUTURA

Este reporte resume los descubrimientos de nuestro panel. Nuestro reporte completo, el cual esta siendo publicado en la revista *Journal of Ecological Applications* (Volumen 7, Agosto de 1997), en él se discuten y citan más de 140 referencias relacionadas con las publicaciones científicas más importantes sobre el tema. De esa lista hemos elegido las que se encuentran abajo, consideramos que son las más ilustrativas de las publicaciones científicas y resúmenes en que nos basamos para crear éste reporte.

Aber, J.D. 1992. Nitrogen cycling and nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution* 7:220-223.

Berendse, F., R. Aerts, and R. Bobbink. 1993. Atmospheric nitrogen deposition and its impact on terrestrial ecosystems. Pp. 104-121 in C.C. Vos and P. Opdam (eds), *Landscape Ecology of a Stressed Environment*. Chapman and Hall, England.

Cole, J. J., B. L. Peierls, N. F. Caraco, and M. L. Pace. 1993. Nitrogen loadings of rivers as a human-driven process. Pages 141-157 in M. J. McDonnell and S. T. A. Pickett (eds.), *Humans as Components of Ecosystems: The Ecology of Subtle Human Effects and Populated Areas*. Springer-Verlag, NY.

DOE (Department of Environment, UK). 1994. Impacts of Nitrogen Deposition in Terrestrial Ecosystems. Technical Policy Branch, Air Quality Div., London.

Galloway, J. N., W. H. Schlesinger, H. Levy II, A. Michaels, and J. L. Schnoor. 1995. Nitrogen fixation: atmospheric enhancement-environmental response. *Global Biogeochemical Cycles* 9:235-252.

Howarth, R. W., G. Billen, D. Swaney, A. Townsend, N. Jaworski, K. Lajtha, J. A. Downing, R. Elmgren, N. Caraco, T. Jordan, F. Berendse, J. Freney, V. Kudeyarov, P. Murdoch, and Zhu Zhao-liang. 1996. Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences. *Biogeochemistry* 35: 75-139.

Nixon, S. W., J. W. Ammerman, L. P. Atkinson, V. M. Berounsky, G. Billen, W. C. Boicourt, W. R. Boynton, T. M. Church, D. M. Ditoro, R. Elmgren, J. H. Garber, A. E. Giblin, R. A. Jahnke, N. P. J. Owens, M. E. Q. Pilson, and S. P. Seitzinger. The fate of nitrogen and phosphorus at the land-sea margin of the North Atlantic Ocean. *Biogeochemistry* 35: 141-180.

NRC. 1994. Priorities for Coastal Ecosystem Science. National Research Council. Washington, D.C.

Prinn, R., D. Cunnold, R. Rasmussen, P. Simmonds, F. Alyca, A. Crawford, P. Fraser, and R. Rosen. 1990. Atmospheric emissions and trends of nitrous oxide deduced from 10 years of ALE-GAGE data. *Journal of Geophysical Research* 95:18,369-18,385.

Schindler, D. W. and S. E. Bayley. 1993. The biosphere as an increasing sink for atmospheric carbon: estimates from increasing nitrogen deposition. *Global Biogeochemical Cycles* 7:717-734.

Schlesinger, W. H. 1991. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Academic Press, San Diego.

Smil, V. 1991. Population growth and nitrogen: an exploration of a critical existential link. *Population and Development Review* 17:569-601.

Tamm, C. O. 1991. *Nitrogen in Terrestrial Ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin. 115 pp.

Tilman, D. 1987. Secondary succession and the pattern of plant dominance along experimental nitrogen gradients. *Ecological Monographs* 57(3):189-214.

Vitousek, P. M. and R. W. Howarth. 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry* 13:87-115.

Sobre El Panel De Científicos

Este reporte representa el consenso alcanzado por un panel de ocho científicos elegidos para incluir una amplia gama de expertos en el área. Este reporte fue sometido a revisión y fue aprobado por el equipo de redactores de *Issues in Ecology*. Las afiliaciones de los miembros del panel de científicos son:

Dr. Peter M. Vitousek, Panel Chair, Department of Biological Sciences, Stanford University, Stanford, CA 94305

Dr. John Aber, Complex Systems Research Center, Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire, Durham, NH 03824-3525

Dr. Robert W. Howarth, Section of Ecology and Systematics, Corson Hall, Cornell University, Ithaca, NY 14853

Dr. Gene E. Likens, Institute of Ecosystem Studies, Cary Arboretum, Millbrook, NY 12545

Dr. Pamela A. Matson, Soil Science, University of California, Berkeley, Berkeley, CA 94720

Dr. David W. Schindler, Department of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, Alberta, T6G 2E9, CANADA

Dr. William H. Schlesinger, Departments of Botany and Geology, Duke University, Durham, NC 27708-0340

Dr. David Tilman, Department of Ecology, Evolution and Behavior, University of Minnesota, St. Paul, MN 55108-6097

Sobre El Escritor científico

Yvonne Baskin, una escritora científica, editó el reporte del panel de científicos para asegurar una comunicación más efectiva de sus descubrimientos con lectores no científicos.

Traducción De Este Número

Alejandra G. Vovides Tejeda, Posgrado del Instituto de Ecología A.C., Kilómetro 2.5 antigua Carretera a Coatepec, Congregación el Haya, Xalapa 91070, Veracruz, México

Agradecimientos

Esta serie está inspirada en el Dr. Ron Pulliam, quien primero propuso la idea, y en la Dr. Judy Meyer quien presidió el comité de una Sociedad Ecológica Americana, el cual creó el concepto y convenció a la ESA de realizarlo. Agradecemos profundamente sus contribuciones. También agradecemos a Faith Kearns por su apoyo en el diseño y producción de éste número.

Comité Editorial De *Issues in Ecology*

Dr. David Tilman, Editor-in-Chief, Department of Ecology, Evolution and Behavior, University of Minnesota, St. Paul, MN 55108-6097. E-mail: tilman@lter.umn.edu

Sobre *Issues In Ecology*

Issues in Ecology es una edición diseñada para reportar, en un lenguaje claro para el público en general, el consenso de un panel de expertos científicos sobre temas relevantes al medio ambiente. *Issues in Ecology* es financiada por el programa "*Pew Scholars in Conservation Biology*" y por la Sociedad Americana de Ecología (ESA por sus siglas en inglés). Se publica periódicamente, conforme se completan los reportes. Todos los reportes son sometidos a revisión y deben ser aprobados por un comité editorial antes de ser publicados.

Miembros Del Comité

- Dr. Stephen Carpenter, Center for Limnology, University of Wisconsin, Madison, WI 53706
Dr. Deborah Jensen, The Nature Conservancy, 1815 North Lynn Street, Arlington, VA 22209
Dr. Simon Levin, Department of Ecology & Evolutionary Biology, Princeton University, Princeton, NJ 08544-1003
Dr. Jane Lubchenco, Department of Zoology, Oregon State University, Corvallis, OR 97331-2914
Dr. Judy L. Meyer, Institute of Ecology, The University of Georgia, Athens, GA 30602-2202
Dr. Gordon Orians, Department of Zoology, University of Washington, Seattle, WA 98195
Dr. Lou Pitelka, Appalachian Environmental Laboratory, Gunter Hall, Frostburg, MD 21532
Dr. William Schlesinger, Departments of Botany and Geology, Duke University, Durham, NC 27708-0340

Copias Adicionales

Para recibir copias adicionales de este reporte (\$5 dólares cada uno) o artículos anteriores de *Issues in Ecology*, favor de contactar:

Ecological Society of America
1707 H Street, NW, Suite 400
Washington, DC 20006
(202) 833-8773, esahq@esa.org



La serie *Issues in Ecology* está también disponible electrónicamente en www.esa.org/science/Issues

Acerca de Issues in Ecology

Issues in Ecology está diseñado para reportar, en lenguaje comprensible para no-científicos, el consenso de un panel de científicos expertos en temas ambientales relevantes. *Issues in Ecology* son financiados por el Programa “Pew Scholars in Conservation Biology” y por la *Ecological Society of America* –ESA- (la Sociedad Norteamericana de Ecología). Este es publicado en intervalos irregulares, conforme los reportes se completan. Todos los reportes están sujetos a una detallada revisión y deben ser aprobados por el Consejo editorial antes de su publicación. Ninguna responsabilidad por la opinión expresada por los autos en las publicaciones de ESA es asumida por los editores o la editorial de la *Ecological Society of America*.

Issues in Ecology es una publicación oficial de la Sociedad Americana de Ecología, la sociedad nacional de profesionales líder de ecologistas. Fundada en 1915, ESA busca promover la aplicación responsable de principios ecológicos para la solución de problemas ambientales. Para mayor información, contactar a la *Ecological Society of America*, 1707 H Street, NW, Suite 400, Washington, DC, 20006. ISSN 1092-8987.

