

ISSUES IN ECOLOGY

Publicado por la Ecological Society of America

Exceso de Nitrógeno en el Medio Ambiente de EUA: Tendencias, Riesgos y Soluciones

Eric A. Davidson, Mark B. David, James N. Galloway, Christine L. Goodale, Richard Haeuber, John A. Harrison, Robert W. Howarth, Dan B. Jaynes, R. Richard Lowrance, B. Thomas Nolan, Jennifer L. Peel, Robert W. Pinder, Ellen Porter, Clifford S. Snyder, Alan R. Townsend, and Mary H. Ward



Invierno de 2012

esa

Informe Número 15

Exceso de Nitrógeno en el Medio Ambiente de EUA: Tendencias, Riesgos y Soluciones

RESUMEN

No es sorprendente que los seres humanos hayamos afectado profundamente el ciclo global del nitrógeno (N) en el esfuerzo por alimentar a las 7 mil millones de personas que habitan el planeta. Esto se debe a que dicho elemento es esencial para el crecimiento de las plantas y para la nutrición animal. Como consecuencia, el ciclo de nitrógeno ha sido perturbado en mayor medida que el ciclo de carbono (C). La producción de alimentos y energía derivados de la agricultura y el uso de energía en la industria han más que duplicado la cantidad de nitrógeno reactivo que circula anualmente. Presentamos nuevos resultados de investigación que muestran el alcance de dichos efectos sobre los ecosistemas, la biodiversidad, la salud humana y el clima. Sugerimos que, pese a décadas de investigación sobre las consecuencias negativas del exceso de nitrógeno disponible sobre la biósfera, las soluciones permanecen evasivas. No obstante, se han registrado éxitos en la reducción de las emisiones de nitrógeno a la atmósfera, lo que ha mejorado la calidad del aire. Algunas soluciones efectivas para reducir su pérdida en los sistemas agrícolas también han sido identificadas. Sin embargo, aún existen distintos impedimentos económicos y políticos para su adopción. A continuación se muestran las mayores fuentes de nitrógeno reactivo en los Estados Unidos de América (EUA), así como sus impactos y posibles opciones de mitigación:

Fuentes:

- El intenso desarrollo agrícola, industrial y del transporte ha afectado profundamente el ciclo de nitrógeno en EUA.
- Las emisiones de nitrógeno provenientes de los sectores energético y del transporte han disminuido, pero las del sector agrícola se han incrementado.
- Aproximadamente la mitad del nitrógeno usado como fertilizante para aumentar la producción agrícola no cumple dicho rol y se pierde en el medio ambiente.

Impactos:

- Dos terceras partes de los ecosistemas costeros de EUA sufren daño, de moderado a severo, debido al aumento en la descarga de nutrientes. Actualmente, existen cerca de 300 zonas de hipoxia (nivel bajo de oxígeno) y el número va en aumento. Una tercera parte de los arroyos de EUA y dos de cada cinco lagos han sufrido efectos negativos debido a las altas concentraciones de nitrógeno.
- La contaminación del aire continúa reduciendo la biodiversidad. Una evaluación al nivel nacional ha mostrado la pérdida de especies nativas sensibles al nitrógeno, mientras que las plantas exóticas e invasivas se beneficiaron.
- Más de 1.5 millones de estadounidenses beben agua de pozos contaminada con altos contenidos de nitrato (un contaminante conocido y regulado). Esto aumenta el riesgo de tener hijos con defectos de nacimiento o de desarrollar cáncer. Se necesita más investigación para entender a plenitud estos riesgos para la salud humana.
- Se ha detectado que la pérdida de nutrientes por la agricultura y el ingreso de aguas residuales en los ecosistemas están asociados con diversas infecciones causadas por patógenos, incluyendo enfermedades en los corales, la muerte de aves, enfermedades de los peces y enfermedades diarréicas e infecciones causadas por vectores en los humanos.
- El nitrógeno está íntimamente ligado con el ciclo del carbono y tiene efectos tanto de calentamiento como de enfriamiento en el clima.

Opciones de Mitigación:

- La regulación de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) de los sectores energético y del transporte ha mejorado notablemente la calidad del aire, particularmente en el este de EUA. Se espera que el óxido de nitrógeno disminuya aún más conforme nuevas regulaciones entren en vigor. No obstante, el amoníaco permanece casi sin regulaciones, y se espera que aumente a menos que se implementen mejores controles sobre sus emisiones derivadas de las prácticas ganaderas.
- Las pérdidas de nitrógeno debidas a las prácticas agrícolas en las granjas y a las operaciones ganaderas pueden reducirse hasta en 30-50% con la tecnología y prácticas de manejo actuales. Este número puede aumentar hasta 70-90% con aplicaciones novedosas de métodos ya existentes. Las políticas agrícolas y los sistemas de apoyo actuales en EUA, así como la disminución de la inversión en la extensión agrícola, impiden la aplicación de dichas prácticas.

La sociedad se enfrenta a un profundo reto para satisfacer el abasto de alimento, fibra y combustible y a la vez minimizar los impactos no intencionales en el medio ambiente y en la salud humana. Mientras que nuestra habilidad para cuantificar las transferencias de nitrógeno entre la tierra, el agua y el aire ha mejorado desde la primera publicación de esta serie en 1997, aún queda un enorme reto que resolver: usar la ciencia para establecer políticas de manejo efectivas que reduzcan el cambio climático, mejoren la calidad del agua y protejan la salud de los seres humanos y del medio ambiente.

Crédito fotográfico de la portada: El depósito de nitrógeno en el Parque Nacional Joshua Tree en California ha aumentado la abundancia de pastos no nativos, que son más propensos al fuego que la vegetación natural. La foto superior muestra un sitio dominado por pastos anuales, no nativos cinco años después de un incendio y la inferior presenta un sitio inmediatamente después de un incendio. Las fotografías son cortesía de Edith Allen.

Exceso de Nitrógeno en el Medio Ambiente de EUA: Tendencias, Riesgos y Soluciones

Eric A. Davidson, Mark B. David, James N. Galloway, Christine L. Goodale, Richard Haeuber, John A. Harrison, Robert W. Howarth, Dan B. Jaynes, R. Richard Lowrance, B. Thomas Nolan, Jennifer L. Peel, Robert W. Pinder, Ellen Porter, Clifford S. Snyder, Alan R. Townsend, and Mary H. Ward

Introducción

Debido principalmente a la invención de los fertilizantes sintéticos a principios del siglo XX, la creciente población humana tiene, en promedio, una mejor nutrición que nunca antes en la historia. Cerca del 40-60% de la población actual depende del crecimiento de cultivos que reciben la aplicación de fertilizantes sintéticos de nitrógeno.

Desafortunadamente, el avance impresionante en la productividad agrícola y en la nutrición humana ha tenido un costo alto en términos de degradación ambiental y en riesgos para la salud humana por la contaminación. La razón es que una gran proporción del nitrógeno que se utiliza como fertilizante -más de la mitad- es usada por los cultivos y sale al aire y al agua, se mueve tierra y aguas abajo, y contamina paisajes terrestres y acuáticos. Al mismo tiempo, el aumento en el uso de energía fósil en los sectores energético, del transporte e industrial tiene como consecuencia la emisión de contaminantes de nitrógeno al aire. En 1997, el primer número de *Tópicos en Ecología (Issues in Ecology)* describió la magnitud, las causas y las consecuencias de las alteraciones humanas al ciclo del nitrógeno, documentando cómo los seres humanos hemos aumentado en más del doble la cantidad de nitrógeno reactivo (ver Glosario para las definiciones) que se circula anualmente en la biósfera terrestre. Varias de estas tendencias han continuado junto con el incremento poblacional, la mejoría en las dietas de los países en desarrollo, el aumento en el uso de fertilizantes químicos a nivel global, las crecientes concentraciones atmosféricas de óxido nitroso -un potente gas de efecto invernadero- y la mayor eutrofización de hábitats acuáticos y marinos. Quince años después, nos preguntamos: "¿Ha servido el nuevo conocimiento científico sobre los problemas crecientes de la

contaminación con nitrógeno para avanzar en las soluciones a éstos?"

En algunos aspectos la respuesta es un decepcionante "no". El óxido nitroso continúa aumentando en la atmósfera, así como el número de ecosistemas acuáticos que sufren de eutrofización e hipoxia (nivel bajo de oxígeno) y la pérdida de biodiversidad debido a la contaminación del aire. En efecto, estos problemas se han exacerbado por una demanda no anticipada en el crecimiento de cultivos para biocombustibles, misma que aumentó la presión para la expansión del área agrícola y para el uso de fertilizantes. No obstante, existen importantes historias de éxito. Por ejemplo, la calidad del aire ha mejorado significativamente como resultado de las regulaciones y de las innovaciones tecnológicas, que han reducido las emisiones de gases de nitrógeno provenientes de la industria y de los automóviles en muchos países desarrollados. Se ha estimado la cantidad de nitrógeno en el aire contaminado que puede soportar un ecosistema (la "carga crítica"), sin que tenga pérdidas importantes en biodiversidad o en sus funciones. Así mismo, se ha mejorado la eficiencia de uso de los fertilizantes y se han identificado opciones de manejo adecuadas para reducir las pérdidas de nitrógeno de las tierras agrícolas. Se han encontrado evidencias que ligan el exceso de nitrógeno reactivo en el medio ambiente con daños específicos en la salud humana, lo que provee motivación urgente para la reducción de la contaminación. Uno de los aspectos más alentadores es que existen soluciones tecnológicas capaces de disminuir la contaminación por nitrógeno. Se requiere de investigación para disminuir los costos de estas soluciones y de una mejor comunicación para promover las voluntades políticas y culturales para aplicarlas.

Si bien el trastorno del ciclo de nitrógeno es global, los impactos tienen con frecuencia un

efecto local y las soluciones son específicas para cada región. En este artículo nos enfocamos en las fuentes de nitrógeno reactivo más importantes en EUA, sus impactos en los ecosistemas, el clima y la salud humana, y en las opciones para minimizar las pérdidas de nitrógeno y sus impactos.

Las Fuentes Más Importantes De Nitrógeno Reactivo En EUA

La suma de todas las fuentes antropogénicas de nitrógeno reactivo en EUA, es aproximadamente cuatro veces la cantidad que ingresa a los ecosistemas por medio de la fijación biológica de nitrógeno (ver Glosario para definiciones) a partir de fuentes naturales y por los rayos o relámpagos (Cuadro 1). Debido a la intensificación de la agricultura y del desarrollo industrial, la alteración al ciclo del nitrógeno en EUA es mayor que el promedio global. Mientras que el uso de fertilizantes de nitrógeno está creciendo en las regiones de mercados emergentes tales como Asia, en EUA se ha estabilizado. Por otro lado, la producción de soya se ha incrementado, lo que ha aumentado la fijación biológica de nitrógeno en las tierras de cultivo. Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) han disminuido y se espera que disminuyan aún más.

Además del ingreso anual del nuevo nitrógeno reactivo (Cuadro 1), son importantes también la redistribución y las transferencias de nitrógeno entre los componentes del paisaje (Figura 1). Éstos incluyen las emisiones de amoníaco, óxidos de nitrógeno y óxido nitroso del suelo a la atmósfera, la lixiviación de nitrato y nitrógeno orgánico disuelto de la tierra hacia los cuerpos acuáticos, la cosecha de alimentos y el desecho de aguas residuales. Dicho movimiento de nitrógeno reactivo al aire, agua y tierras no agrícolas tiene consecuencias no intencionales, pero indeseables, para la salud de los ecosistemas y la humana. Un reporte de la Agencia para la Protección Ambiental (APA, EPA en inglés) del 2011 (ver bibliografía adicional sugerida) describe estas estimaciones con más detalle. Nuestro énfasis será describir y cuantificar los impactos de estas alteraciones en la salud humana y de los ecosistemas y las soluciones potenciales.

IMPACTOS EN LOS ECOSISTEMAS

La investigación científica de las últimas décadas ha permitido entender mejor la relación entre las entradas de nitrógeno a los ecosistemas

Movimiento y redistribución del nitrógeno reactivo en la tierra, el agua y el aire

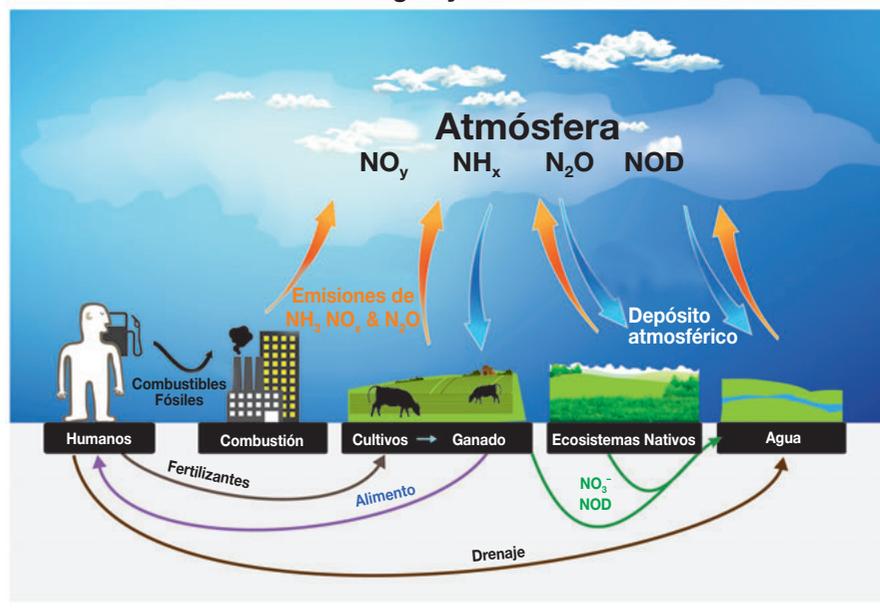


Figura 1. Transferencias y redistribuciones más importantes del nitrógeno reactivo entre los ecosistemas terrestres y acuáticos (ver Glosario para abreviaciones). La fijación biológica de nitrógeno, la desnitrificación y otras transferencias menores se han omitido para simplificar la imagen.

Cuadro 1. Estimaciones de las mayores fuentes de entrada de N antropogénico en EUA en 1990 y en 2008 y proyecciones para 2014.

| Fuentes de N en EUA | 1990 | 2008 | Proyección para 2014 |
|--|-------------|-------------|----------------------|
| Millones de toneladas métricas de N por año | | | |
| Fuentes naturales | | | |
| Rayos | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Fijación biológica de N | 6.4 | 6.4 | 6.4 |
| Agricultura | | | |
| Fertilizantes sintéticos de N | 9.7 | 11.4 | 11.9 |
| Fijación biológica de N por cultivos | 5.4 | 8.3 | 9.1 |
| Importación de alimentos | | | |
| | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| Combustión | | | |
| NO _x de la industria | 1.5 | 1.1 | 1.1 |
| NO _x del transporte | 3.7 | 2.6 | 2.0 |
| NO _x de la generación de electricidad | 1.8 | 0.8 | 0.6 |
| Usos industriales* | | | |
| | 4.2 | 4.2 | 4.2 |
| TOTAL | 34.0 | 35.2 | 35.8 |

*Los usos industriales de N reactivo sintético incluyen la producción de nylon y de municiones. El único cálculo disponible es para 2002, el cual suponemos como constante para este período de tiempo, a falta de mejores datos. Las fuentes incluyen los reportes y bases de datos (EPA-SAB-11-013, EPA-HQ-OAR-2009-0491, <http://www.epa.gov/ttnchie1/trends>) y de la Asociación Internacional de la Industria del Fertilizante (International Fertilizer Industry Association).

Figura 2. El depósito de nitrógeno por la contaminación del aire aumenta el crecimiento de muchas especies de árboles de madera dura, como el maple rojo (izquierda). Algunas coníferas como el pino rojo (derecha) disminuyen su tasa de crecimiento. Las respuestas de las 24 especies más comunes en el este de EUA pueden encontrarse en Thomas et al. 2010. *Nature Geoscience*, 3:13-17.

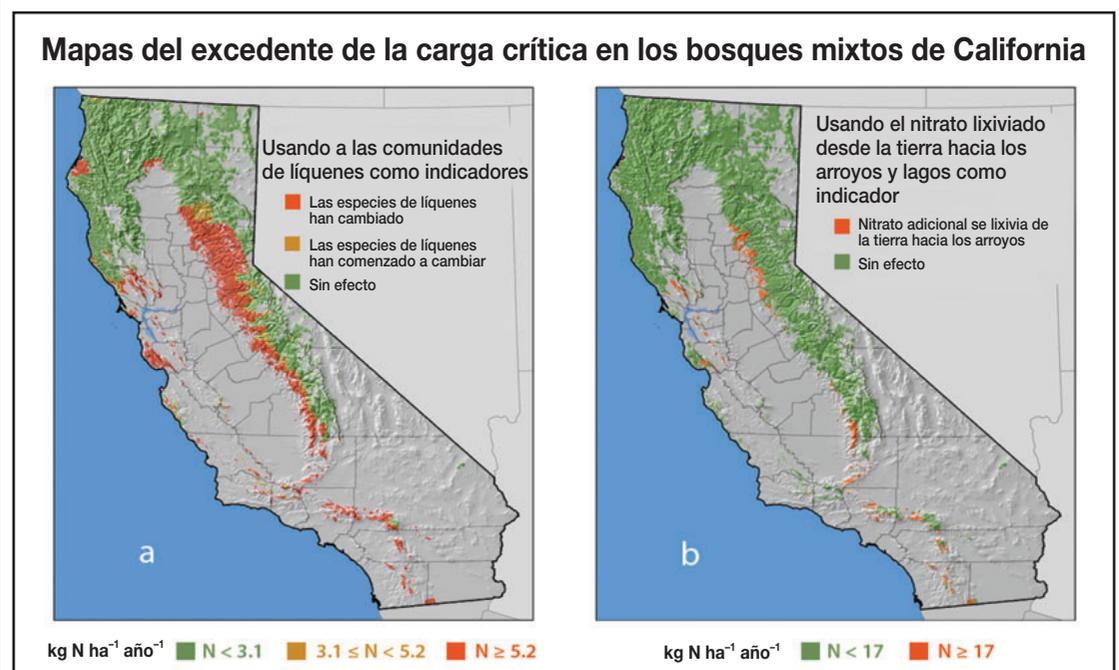


y la demanda existente por parte de las comunidades de plantas. En general, una entrada adicional de nitrógeno aumenta el crecimiento vegetal, pero las especies difieren en sus habilidades para responder, pues varían en sus tasas inherentes de crecimiento y en sus respuestas a otros cambios asociados, como la acidificación del suelo y el desbalance de nutrientes. Muchas especies de árboles de madera dura nativos del este de EUA, como el arce rojo, el arce azucarero, el fresno americano, el cerezo negro americano, el tulípero de Virginia y el roble rojo, responden positivamente al depósito del nitrógeno proveniente de la contaminación del aire. En contraste, distintas especies de hayas, abedules y encinos no muestran respuesta. Las especies de coníferas exhiben una gama de respuestas, con varias especies como el pino

rojo, mostrando una disminución en su crecimiento con un mayor depósito de nitrógeno (Figura 2). Además de los efectos sobre los árboles, la vegetación del sotobosque es particularmente susceptible a los cambios en la composición de especies debidos a una mayor entrada de nitrógeno atmosférico.

Los árboles crecen más lentamente donde los suelos son más delgados y la estación de crecimiento es más corta, como en las Montañas Rocallosas. Los estudios de campo han mostrado que se necesita un depósito de nitrógeno mucho menor para saturar la demanda de las plantas en bosques de elevaciones altas que en elevaciones más bajas. Como consecuencia, mucho del nitrógeno que no es capturado por las plantas se incorpora a los arroyos, a las aguas subterráneas o mantos freáticos y a los lagos, donde afecta la

Figura 3. En California, el nitrógeno en el aire ha impactado una tercera parte de las áreas naturales del Estado. Los líquenes y las concentraciones de nitrato en los arroyos se han utilizado como indicadores eficaces de cambios no deseables en los ecosistemas. Las áreas sombreadas en color rojo indican bosques de coníferas en peligro debido a que las entradas de nitrógeno por la contaminación del aire exceden la capacidad de carga crítica estimada. Esto se deriva de que (a) se espera un cambio en la composición de especies de líquenes o (b) se espera que el nitrato en los arroyos exceda un valor umbral establecido. El sombreado verde indica lugares donde las entradas de nitrógeno por contaminación son menores que la carga crítica. Figuras modificadas de Fenn et al. (2010. *Journal of Environmental Management* 91:2404-2423), donde se pueden encontrar mapas sobre el excedente de las cargas críticas en otros ecosistemas en California.



Recuadro 1. CARGAS CRÍTICAS: ¿CUÁNTO NITRÓGENO ES DEMASIADO?

El exceso de nitrógeno puede alterar los ecosistemas naturales, causando acidificación, desbalance de nutrientes y pérdida de biodiversidad. Para manejar el nitrógeno eficazmente es importante saber cuánto puede ser añadido a un ecosistema sin provocar efectos dañinos. La "carga crítica" describe cuánto nitrógeno es demasiado. Se refiere comúnmente al nitrógeno que se deposita como resultado de la contaminación del aire y se expresa como una tasa de entrada de nitrógeno en una área determinada en el tiempo, normalmente como kilogramos de nitrógeno por hectárea por año. Este concepto se utiliza ampliamente en Europa y Canadá para evaluar cómo el nitrógeno, el azufre y otros contaminantes del aire afectan los arroyos, lagos y bosques y actualmente se comienza a desarrollar para los ecosistemas de EUA. Los mapas de cargas críticas se combinan con mapas de contaminación del aire para mostrar en dónde las cargas de contaminación exceden las estimaciones de cargas críticas locales, poniendo a los ecosistemas en riesgo. Por ejemplo, en California, los mapas de cargas críticas, combinados con los de las cargas reales de nitrógeno han permitido identificar en qué lugares el nitrógeno está afectando probablemente a los bosques (Figura 3), los pastizales, el matorral costero de salvia, los desiertos y los arroyos. Esta información es útil para que los encargados de la calidad del aire determinen dónde y cuánto necesita mejorarse la calidad del aire, para poder reducir las cargas de nitrógeno y restaurar las áreas dañadas.

productividad de las algas y a las redes tróficas acuáticas. A lo largo del país, este tipo de investigación está permitiendo estimar la carga crítica del depósito de nitrógeno para cada tipo de ecosistema y localidad (Recuadro 1).

Además de ser un nutriente esencial para la vegetación, el depósito de nitrógeno también afecta las propiedades del suelo. Tanto el nitrógeno como el azufre provenientes de la contaminación del aire contribuyen a la acidificación del suelo. Esto lleva a una pérdida de nutrientes esenciales para las plantas, tales como el calcio y el magnesio y altera la disponibilidad de fósforo. La acidificación del suelo moviliza elementos como el aluminio, que es tóxico para muchas plantas terrestres y para muchos peces y fauna en los arroyos y lagos; además, puede aumentar la susceptibilidad del bosque a las enfermedades y a la sequía debido a las plantas que se encuentran bajo estrés. El aire contaminado con nitrógeno suele estar acompañado por contaminación con ozono, que suprime la fotosíntesis en las plantas.

Las especies varían en su habilidad para soportar el estrés debido a la contaminación del aire. La respuesta particular de las especies a un aumento en el depósito de nitrógeno ha disminuido la diversidad de ecosistemas terrestres y acuáticos. En general, las especies de crecimiento rápido (p.ej. malezas), muchas de ellas plantas exóticas o no nativas, responden rápida y positivamente a un incremento en el depósito de nitrógeno. De manera contraria, las plantas nativas de crecimiento lento, adaptadas a bajos niveles de nitrógeno, están menos capacitadas para utilizar un incremento de dicho elemento. Las diferentes respuestas pueden derivar en la extinción de poblaciones locales de plantas nativas raras y de crecimiento lento. Los herbívoros

que se alimentan de estas plantas también son afectados. Por ejemplo, las poblaciones de mariposas "checkerspot" en los pastizales de serpentina de California han disminuido como consecuencia del reemplazo de las especies nativas de pasto por especies exóticas, que responden positivamente al nitrógeno. En otros casos, las poblaciones de herbívoros se expanden al consumir tejidos con concentraciones altas de nitrógeno y bajas de químicos de defensa. La expansión de pastos no nativos, que responden positivamente al nitrógeno y que son altamente inflamables, ha incrementado el riesgo de incendios en el oeste de EUA. (p. ej., ver fotos de portada)

Mucho del nitrógeno reactivo en los ecosistemas terrestres que no es capturado por las plantas o retenido en los suelos termina en los ecosistemas acuáticos. Aproximadamente dos terceras partes de los ecosistemas costeros de EUA han sido clasificados recientemente como mediana o altamente alterados a causa de las descargas de nitrógeno. El sobre-enriquecimiento con nitrógeno se asocia con el aumento en la frecuencia, severidad y extensión de eventos de hipoxia (nivel bajo de oxígeno) y de anoxia (falta de oxígeno), así como con brotes dañinos de algas y cambios en la composición de especies con pérdida de biodiversidad. El aumento en la ocurrencia de las zonas hipóxicas y anóxicas en los ecosistemas costeros ha sido documentado cada década desde principios de 1900, con cerca de 300 zonas hipóxicas identificadas a lo largo de la costa de EUA. En los estuarios de Nueva Inglaterra, el fitoplancton (algas microscópicas) domina sobre los pastos acuáticos nativos, generando ecosistemas con menor complejidad estructural y menor claridad en el agua.

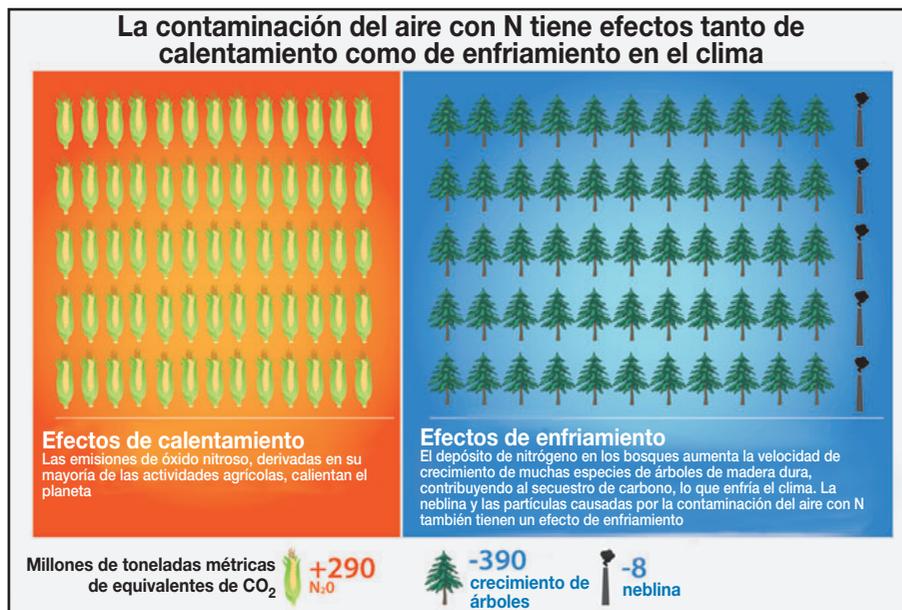


Figura 4. El efecto de enfriamiento, resultado del depósito de nitrógeno (que permite a los árboles remover carbono de la atmósfera y que causa el reflejo del sol por la neblina y las partículas del aire que contienen nitrógeno) es un poco mayor que el efecto de calentamiento derivado de las emisiones de óxido nítrico en EUA. Sin embargo, la incertidumbre en estos cálculos es muy grande, dando los siguientes ámbitos de las estimaciones: de +180 a +400 para el N₂O; de -240 a -540 para el crecimiento de árboles; y de -2 a -16 para la neblina, donde los números positivos indican calentamiento y los negativos enfriamiento. Debido a que este análisis incluye diferentes gases de efecto invernadero y aerosoles, todos se convirtieron a la unidad común de "equivalentes de CO₂" para un potencial de calentamiento en un período de 100 años, utilizando las metodologías del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

El enriquecimiento del agua dulce con nitrógeno suele tener impactos negativos similares a los que tiene en las zonas costeras, pero adicionalmente afecta la calidad del agua potable (ver sección de impactos en la salud humana). Aunque el crecimiento de algas y plantas en los ecosistemas de agua dulce está restringido fuertemente por el fósforo (P), hay evidencia de una co-restricción por ambos elementos. Inspecciones recientes realizadas por la APA indican que aproximadamente una tercera parte del largo de los arroyos de EUA está catalogada como "altamente perturbada" y cerca de una quinta parte de todos los lagos está catalogada en un nivel de calidad bajo con respecto a las concentraciones de nitrógeno total.

IMPACTOS EN EL CLIMA

La importancia del ciclo de nitrógeno como un agente regulador del clima ha ganado atención. Los primeros modelos climáticos globales se concentraron únicamente en la física de los gases de efecto invernadero; modelos posteriores incorporaron fuentes y sumideros biológicos de dióxido de carbono, pero no las interacciones entre el carbono (C) y el nitrógeno. En años recientes, algunos modelos del sistema de la Tierra han añadido alguna representación del ciclo de nitrógeno como un agente regulador crucial del ciclo del C, el clima y la química atmosférica. Sin embargo, la representación de los procesos del ciclo del nitrógeno en los modelos climáticos es aún incompleta.

El depósito de nitrógeno reactivo del aire sobre la superficie terrestre afecta los sum-

ideros de carbono mediante dos procesos clave. En primer lugar, la entrada adicional de nitrógeno a menudo favorece el crecimiento de los árboles, que almacenan grandes cantidades de carbono en su madera. La magnitud de la estimulación del crecimiento está en debate, pero es posiblemente mayor en las regiones con un depósito moderado. El incremento de dióxido de carbono en la atmósfera también estimula el crecimiento vegetal, pero dicha estimulación está restringida por la disponibilidad de nitrógeno para las plantas. En segundo lugar, las entradas de nitrógeno reactivo desaceleran la descomposición de material vegetal muerto y de la materia orgánica del suelo en muchos suelos forestales, más no en todos. El entendimiento de este proceso es un tema de investigación activa que implica el estudio de los cambios en las comunidades microbianas, la biomasa microbiana y la producción de enzimas necesarias para romper la materia orgánica compleja.

El efecto más directo del nitrógeno sobre el clima se da a través del óxido nítrico. Este gas de efecto invernadero es el tercero más importante de origen humano y contribuye con un 6% del calentamiento global de origen antrópico. Tiene un potencial de calentamiento cerca de 300 veces mayor por molécula que el dióxido de carbono y tiene una permanencia larga en la atmósfera (con un "tiempo medio de residencia" mayor a 110 años). Las concentraciones atmosféricas de este gas se han incrementado vertiginosamente desde 1860, como consecuencia del aumento global en la producción ganadera y el aumento en el uso de fertilizantes sintéticos de nitrógeno después de la segunda guerra mundial. La APA estima que las actividades agrícolas en EUA son directa o indirectamente responsables de emitir 0.48 millones de toneladas de óxido nítrico por año, lo que es aproximadamente el 80% de las emisiones totales del país (el porcentaje restante proviene de la generación de energía y de la industria) y cerca del 10% de las emisiones globales del sector agrícola.

El nitrógeno reactivo también afecta al metano, otro importante gas de efecto invernadero, a través de una serie de reacciones químicas que lo destruyen en la atmósfera. Lo afecta también porque inhibe su producción y consumo por parte de los microorganismos en los suelos y en los humedales. Sin embargo, los impactos climáticos totales del nitrógeno reactivo por la vía del metano son pequeños comparados con los que tienen el óxido

nitroso y el secuestro de carbono.

Aunque los óxidos de nitrógeno no son gases de efecto invernadero como tales, afectan la producción de ozono en la tropósfera (parte baja de la atmósfera). El ozono afecta el clima directamente, pues es un gas de efecto invernadero, y además es tóxico para las plantas, ya que disminuye la fotosíntesis y la entrada del dióxido de carbono atmosférico hasta en un 20%.

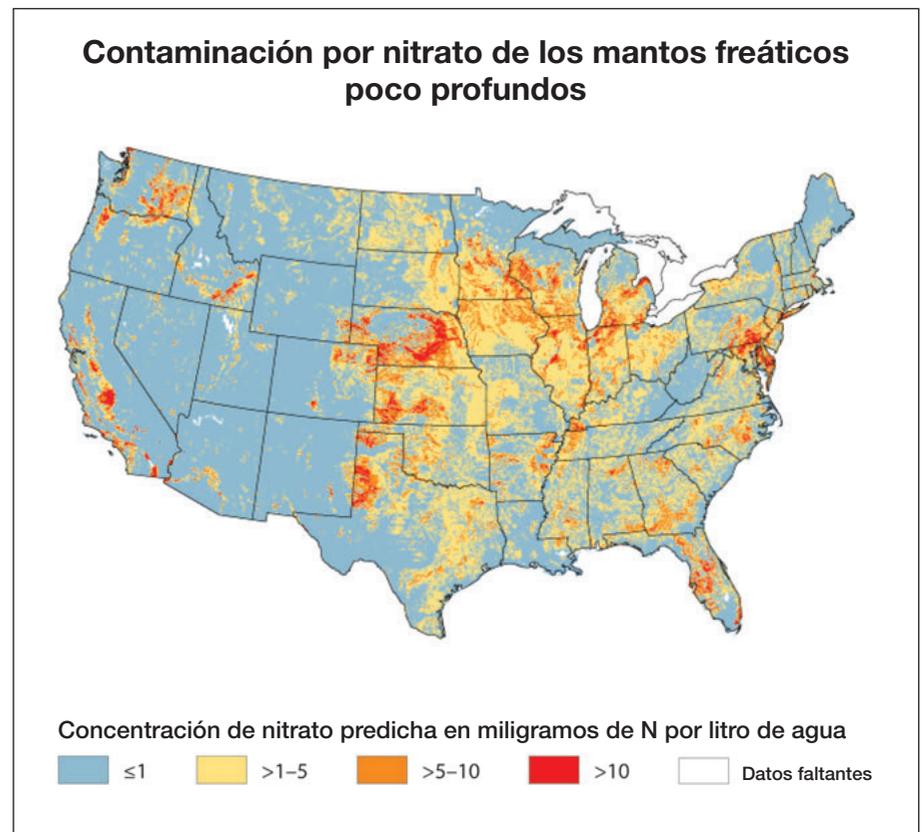
Tanto los óxidos de nitrógeno como el amoníaco afectan la formación de partículas atmosféricas muy pequeñas, conocidas como aerosoles, así como sus propiedades químicas. La abundancia y las propiedades de estas partículas influyen en la formación de gotitas de agua formadoras de nubes. En algunos casos las nubes pueden ser más brillantes y permanecer más tiempo, lo que tiene efectos importantes sobre los patrones de temperatura y precipitación. En general, los aerosoles tienen un efecto de enfriamiento de corto plazo, pues son lavados rápidamente por la lluvia.

La discusión anterior sobre los efectos del nitrógeno reactivo sobre el clima tiene un enfoque global y no específico a EUA. Se están realizando esfuerzos por crear un programa de evaluación del nitrógeno específico para EUA, cuyos hallazgos preliminares se muestran en la Figura 4. En ésta se comparan los potenciales de calentamiento a largo plazo de los gases y las formas particuladas de nitrógeno y el secuestro de carbono atribuible a las emisiones de nitrógeno reactivo en EUA. Los efectos del depósito de nitrógeno que disminuyen la temperatura por el secuestro de carbono cancelan el efecto de calentamiento del óxido nitroso (Figura 4). Desde una perspectiva más amplia, dichos efectos contrastantes del nitrógeno, de enfriamiento y calentamiento, representan menos del 10% del efecto de calentamiento que tienen las emisiones de dióxido de carbono de EUA por el uso de combustibles fósiles.

IMPACTOS EN LA SALUD HUMANA

Agua potable y salud humana

Las concentraciones de nitrato en los mantos acuíferos están aumentando en muchos lugares de EUA. Esto ha generado preocupación por la salud humana, en particular en las áreas rurales donde el agua poco profunda se usa para proveer agua doméstica. De acuerdo con la APA, el nivel máximo de contaminación (NMC, MCL en inglés) para el agua potable es de 10 miligramos por litro como nitrógeno-nitrato (o cerca de 45 miligramos por litro



como nitrato). Concentraciones de nitrato superiores al NMC son poco comunes en los arroyos y en los acuíferos profundos, usados como fuentes de agua potable. Sin embargo, 22% de los pozos domésticos poco profundos (menos de 100 pies por debajo del nivel freático) en áreas agrícolas mostraron valores mayores al NMC, lo que representa un incremento con respecto a la década anterior, de acuerdo con el reporte del 2010 del U.S. Geological Survey (USGS). Tomando en consideración las fuentes regionales de nitrato y las diferencias geológicas regionales que afectan su traslado hacia las aguas subterráneas, el estudio del USGS muestra grandes áreas en zonas agrícolas y urbanas con nitrato en aguas poco profundas en concentraciones que exceden los 10 miligramos de nitrógeno por litro (Figura 5). Con base en un modelo del USGS sobre la calidad del agua potable, se estima que cerca de 1.2 millones de estadounidenses usan pozos privados con concentraciones de nitrato entre 5 y 10 miligramos de nitrógeno por litro y que cerca de medio millón usan pozos que exceden el NMC, de 10 miligramos de nitrógeno por litro. Existe una preocupación creciente sobre la contaminación futura del agua profunda que se obtiene de pozos públicos, como resultado del aumento en las concentraciones de nitrato de los acuíferos profundos, debido al movimiento

Figura 5. Un modelo del US Geological Survey para mantos freáticos poco profundos predice concentraciones de nitrato moderadas (amarillo y naranja) a severas (rojo) en áreas con fuentes de nitrógeno grandes y donde las características geológicas permiten que el nitrato llegue al manto freático. Modificado de USGS Circular 1350 por Dubrovsky et al. (2010).

La presencia de nitrato y nitrito en el agua potable y en la dieta forma compuestos N-nitrosos en el estómago y el colon

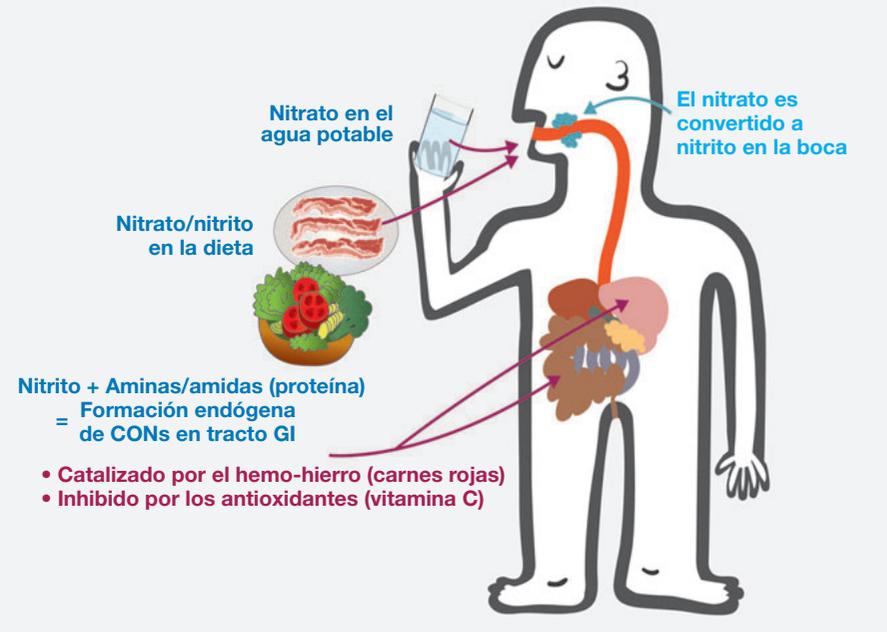


Figura 6. Los compuestos N-nitrosos (CONs) dañan el ADN y causan defectos de nacimiento y cáncer en animales. Se necesitan más estudios bien diseñados en seres humanos para sacar conclusiones más contundentes sobre el riesgo de cáncer debido al consumo de nitrato y nitrito.

hacia abajo de las aguas sub-superficiales. La APA y la Organización Mundial de la Salud (OMS) fijaron estándares en el agua potable para prevenir la aparición de metahe-moglobinemia en infantes, también conocido como “el síndrome del bebé azul”. La metahe-moglobinemia es rara en EUA debido, en parte, al cumplimiento de los estándares en la gran mayoría del territorio. Sin embargo, la ingestión de nitrato ha sido ligada con otros problemas de salud. Cerca del 5% del nitrato ingerido es transformado a nitrito por bacterias en la boca, que después forma varios compuestos con efectos diferentes en el cuerpo. En las condiciones ácidas del estómago, el nitrito forma óxido nítrico, lo que disminuye la presión sanguínea y tiene un efecto benéfico. El nitrito también reacciona con las aminas y las amidas presentes en las proteínas de la dieta o en los medicamentos, para formar N-nitrosaminas y N-nitrosamidas (en conjunto, compuestos N-nitrosos; ver Figura 6). Estos compuestos dañan el ADN y causan defectos de nacimiento y cáncer en los animales.

Debido a que todas las especies animales con las que se ha experimentado han sido suscepti-

Cuadro 2. Resumen de las evidencias que relacionan a los contaminantes nitrogenados del aire con la salud humana.

| Contaminante y Evaluación Científica | Evidencia que Sugiere una Relación Clara | Relación Probable (Se Necesitan más Pruebas) |
|---|---|--|
| <p>NO_x (típicamente medido como NO₂)</p> <p>Evaluación Científica Integral de la APA 2008 (ISA, en inglés)</p> | <p>Enfermedades respiratorias de corto plazo*, incluyendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • incremento en la inflamación de los pulmones y su sensibilidad, particularmente en los asmáticos • incremento en la dificultad para respirar, en la tos y en los síntomas asmáticos • incremento en visitas al hospital para el tratamiento de asma y otros síntomas respiratorios | <p>Incrementos del riesgo de muerte por enfermedades respiratorias y cardíacas en el corto plazo</p> <p>Enfermedades respiratorias de largo plazo*, incluyendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • disminución de la función pulmonar • disminución del crecimiento y función de los pulmones en niños |
| <p>Ozono</p> <p>Documento de Criterios sobre la Calidad del Aire de la APA 2006 (AQCD, en inglés)</p> | <p>Enfermedades respiratorias de corto plazo, incluyendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • aumento en las visitas hospitalarias • aumento en la inflamación de los pulmones y su sensibilidad, particularmente entre los asmáticos • aumento en la dificultad para respirar, en la tos y en los síntomas del asma <p>Aumento en el riesgo de muerte por enfermedades respiratorias y cardíacas en el corto plazo</p> | <p>Enfermedades cardíacas en el corto plazo, incluyendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • incremento en las visitas hospitalarias • disminución en la función cardíaca |
| <p>PM_{2.5}</p> <p>Evaluación Científica Integral de la APA 2009 para MP</p> | <p>Enfermedades respiratorias y cardíacas de corto y largo plazo, incluyendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • aumento en visitas hospitalarias • disminución en las funciones cardíacas y pulmonares <p>Aumento en el riesgo de muerte debido a enfermedades respiratorias y cardíacas en el corto y en el largo plazo</p> | <p>Resultados adversos en la reproducción, tales como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • incremento en el riesgo de nacimientos prematuros • disminución del peso al nacer • incremento en el riesgo de mortalidad infantil <p>Aumento en el riesgo de contraer cáncer en el largo plazo</p> |

* Corto plazo se refiere a un período de días o semanas entre la exposición al contaminante y la aparición de síntomas en la salud. Largo plazo se refiere a un período de meses o años.

bles al cáncer inducido por los compuestos N-nitrosos, es probable que lo mismo suceda en los seres humanos. Sin embargo, son escasos los estudios bien diseñados con seres humanos y que incluyan los factores que afectan la formación de compuestos N-nitrosos en el cuerpo, lo que limita la capacidad para establecer conclusiones definitivas sobre los riesgos de cáncer en la actualidad. No obstante, el grupo de trabajo de expertos de la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer perteneciente a la OMS de las Naciones Unidas concluyó lo siguiente: "La ingesta de nitrato y nitrito que produzca nitrosación endógena es probablemente carcinogénica para los humanos" (la nitrosación endógena se refiere a la formación de compuestos N-nitrosos en el estómago, como se describe arriba).

Los pocos estudios realizados en personas que consumen agua o dietas con altas concentraciones de nitrato y poca ingesta de vitamina C, encontraron un incremento en el riesgo de cáncer de estómago, esófago, colon y riñón. La producción de compuestos N-nitrosos disminuye con el consumo de vitamina C y de otros compuestos contenidos en frutas y vegetales, mientras que aumenta con el consumo de hemo-hierro de las carnes rojas. Esto indica que el riesgo puede ser minimizado con una dieta rica en frutas y verduras y exacerbado con una dieta rica en carnes rojas.

Además de los riesgos de cáncer, la concentración alta de nitrato en el agua potable se ha relacionado con el riesgo de abortos espontáneos, de nacimientos prematuros y un retraso en el crecimiento fetal, aunque no todos los estudios han mostrado dichas asociaciones. En cuatro estudios realizados a la fecha, la aparición de malformaciones del sistema nervioso central se ligó con el nitrato en el agua potable que bebían mujeres embarazadas, con alguna evidencia inclusive a concentraciones de nitrato menores al estándar de la APA. Altas ingestas de nitrato en el agua potable se asociaron con incrementos en la tasa de crecimiento de la tiroides (hipertrofia) y con mal funcionamiento tiroideo (hipotiroidismo). Dados estos resultados, es necesario realizar más investigación para evaluar la gama de efectos de la ingesta de nitrato en la salud humana.

Contaminación del aire y la salud humana

Las pruebas que demuestran que algunos contaminantes nitrogenados del aire tienen impactos negativos en la salud humana con-

tinúan acumulándose (Cuadro 2). El óxido de nitrógeno es un componente importante de la contaminación dentro y fuera de los hogares. Es emitido por los automóviles, las plantas de generación de electricidad y la maquinaria de construcción. Las principales emisiones urbanas provienen de los tubos de escape de los automóviles, mientras que las fuentes naturales como los rayos, las emisiones del suelo y los incendios representan una fracción menor. El óxido de nitrógeno reacciona con otros contaminantes del aire produciendo ozono y reacciona también con varios constituyentes de la materia particulada fina. Esta última es una mezcla de partículas sólidas y líquidas que varían en tamaño y en composición química y comúnmente contienen amonio y/o nitrato. El daño principal es producido por la materia particulada (MP) menor a 2.5 micrómetros de diámetro ($PM_{2.5}$), que penetra y se deposita en los pulmones. Con la información de contaminación del aire de 2005, los analistas de la APA estimaron que la exposición a las partículas $PM_{2.5}$ causó la muerte prematura de 130,000 personas al año en EUA y que la exposición al ozono causó 4,700 más. Se estima que estos contaminantes son responsables de cientos de miles de visitas a hospitales cada año y de síntomas respiratorios que afectan a millones de personas.

En el caso de los contaminantes regulados (Cuadro 2), las poblaciones con mayor riesgo son las que tienen condiciones pre-existentes de problemas cardiovasculares y respiratorios, los fetos en desarrollo, los bebés, los niños y los ancianos. El trabajo en exteriores o el agotamiento físico, el estilo de vida (p. ej. una mala nutrición), una condición socio-económica baja y la predisposición genética también incrementan los riesgos. Adicionalmente, es posible que estos contaminantes puedan interactuar entre sí y con otros y producir otros efectos en la salud; no obstante, las regulaciones y la investigación científica actuales no están dirigidas a los efectos de contaminantes múltiples en la atmósfera.

Efectos sobre la salud humana a través de la fauna silvestre

En contraste con las enfermedades toxicológicas como el síndrome del bebé azul, muchas de las enfermedades infecciosas que afectan a los seres humanos son zoonóticas, es decir, dependen de la fauna silvestre como hospederos, vectores o reservorios. Como consecuencia, el entendimiento de los factores que contribuyen a la transmisión de enfermedades por la fauna silvestre requiere de un enfoque ecológico, que

reconozca las relaciones entre el cambio ambiental, la transmisión de patógenos y los hospederos humanos y no humanos. Los nutrientes en la escorrentía y las concentraciones de nitrógeno, fósforo y materia orgánica, se han ligado con frecuencia a un gran número de infecciones por patógenos, incluyendo enfermedades en los corales, la muerte masiva de aves, enfermedades diarreicas, infecciones por vectores y enfermedades en los peces.

Estudios experimentales han permitido identificar las formas en que el nitrógeno exagera las enfermedades, incluyendo los cambios en la densidad de hospederos o vectores, la distribución de los hospederos, la resistencia a la infección, la virulencia y toxicidad de los patógenos y el aumento de recursos para los

mismos. Por ejemplo, el virus Oeste del Nilo fue introducido en EUA en 1999 y desde entonces se ha dispersado a través de Norte América por medio de aves hospederas y mosquitos. Las especies de mosquitos vectores de dicho virus, incluyendo a las que crecen en pantanos, como *Culex tarsalis*, han incrementado el número de huevos y la tasa de crecimiento de sus larvas, como consecuencia del enriquecimiento con nutrientes. Algunos efectos verosímiles, pero no documentados, del enriquecimiento con nitrógeno de los ecosistemas necesitan ser más estudiados, tales como la mayor toxicidad de los brotes de algas nocivas, el incremento en las alergias producidas por polen de malezas como la ambrosía (ragweed, en inglés) y la existencia de condiciones

Cuadro 3. Prácticas agrícolas que reducen las salidas de N reactivo. Algunas de éstas requerirían cambios en las prácticas de cultivo actuales, algunas podrían provocar otros daños ambientales adicionales, y algunas pueden tener también beneficios colaterales en otros servicios ecosistémicos.

| Estrategia de mitigación | ¿Factible bajo el sistema actual? ¹ | ¿Podría sustituir una pérdida ambiental por otra? ² | Servicios ecosistémicos adicionales |
|--|--|--|-------------------------------------|
| Manejo de fertilizantes | | | |
| Temporalidad (otoño contra primavera; pequeñas aplicaciones frecuentes; uso de ureasa e inhibidores de la nitrificación) | Sí | Sí | No |
| Tasa de uso | Sí | Sí | No |
| Formas de N (liberación lenta o controlada) | Sí | Sí | No |
| Localización | Sí | Sí | No |
| Manejo del estiércol | | | |
| Temporalidad, tasa de uso y localización | Sí | Sí | No |
| Tratamiento del estiércol (químico y físico) | Sí | Sí | No |
| Usos alternativos (bioenergía) | Sí | Sí | Sí |
| Ecológicos | | | |
| Rotaciones complejas | No | No | Sí |
| Cultivos de cobertura | No | No | Sí |
| Legumbres | No | No | Sí |
| Perennes | No | No | Sí |
| Integración de animales en la agricultura | No | No | Sí |
| Orilla de los campos | | | |
| Drenaje controlado | Sí | Sí | No |
| Bioreactores de cerámica | No | Sí, pero poco probable | No |
| Murallas de desnitrificación | No | Sí | No |
| Humedales alimentados por drenajes de cerámica | Sí | Sí, pero poco probable | Sí |
| Paisaje | | | |
| Franjas de amortiguamiento | Sí | Sí | Sí |
| Zonas riparias con árboles | Sí | Sí | Sí |
| Zonas riparias con herbáceas | Sí | Sí | Sí |
| Humedales | Sí | Sí, pero poco probable | Sí |
| Arroyos con meandros | No | Sí | Sí |
| Zanjas de dos etapas | No | Sí | Sí |

¹ "Factible" significa que esta práctica puede realizarse sin cambiar el sistema de subsidios actual para la agricultura.

² Esta estrategia puede disminuir las pérdidas de N de una forma o por una vía, pero podría incrementarlas involuntariamente de otra forma o por otra vía.

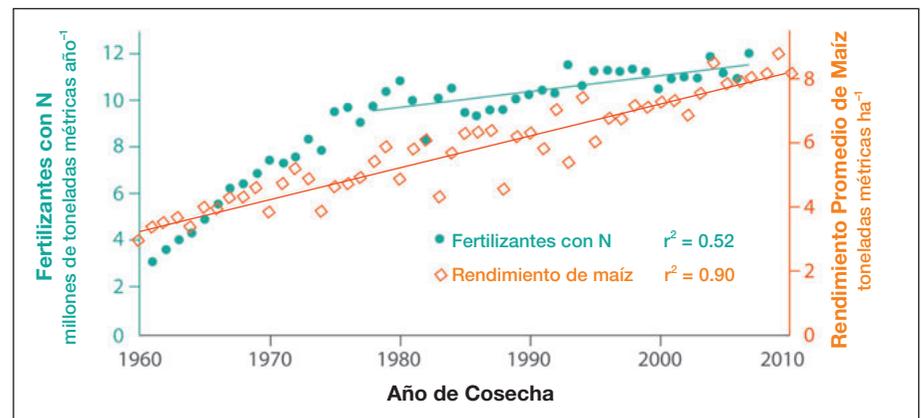
más favorables para los caracoles que albergan trematodos parásitos causantes de la comezón del nadador.

OPORTUNIDADES DE MITIGACIÓN EN LA AGRICULTURA

El reto de brindar suficiente nitrógeno a los cultivos ha sido prominente en el desarrollo de la agricultura. Desde los tiempos de Aristóteles, los agricultores valoraban las leguminosas por su capacidad para restaurar y mantener la fertilidad del suelo, aunque el rol de dichas plantas en la fijación del nitrógeno no se conoció hasta el siglo XIX. En ese tiempo, se utilizaban otras fuentes para suplementar nitrógeno, como el salitre de Chile (nitrato de sodio) y el guano de murciélago. No obstante, la falta de nitrógeno mantuvo con frecuencia un rendimiento agrícola bajo. Fue hasta el desarrollo del proceso de síntesis de Haber-Bosch que pudo superarse la limitación por nitrógeno en la agricultura de la mayor parte del mundo -aunque los fertilizantes químicos no están con frecuencia disponibles ni son costeables en el África al sur del Sahara-. El uso de fertilizantes de nitrógeno sintéticos comenzó en EUA después de la Segunda Guerra Mundial y se incrementó rápidamente en las décadas de 1960 y 1970. Desde entonces, el consumo de fertilizantes nitrogenados se ha incrementado ligeramente cada año, aproximándose a 12 millones de toneladas métricas de nitrógeno anuales (Figura 7).

El incremento en la aplicación de fertilizantes nitrogenados ha aumentado la producción agrícola, aunque otras prácticas como la conservación del suelo, el control de plagas, el manejo adecuado de nutrientes y agua y las variedades de los cultivos, también han contribuido. Estas prácticas han mejorado la eficiencia de uso de los fertilizantes en general. Por ejemplo, los rendimientos del maíz se han incrementado de forma estable en un promedio de 1.9% anual desde 1960 (Figura 7), mientras que la aplicación de fertilizantes nitrogenados a dicho cultivo ha permanecido relativamente constante en 145 kg de nitrógeno por hectárea en los últimos 30 años.

Pese a las mejoras en la producción de cultivos y en la eficiencia de uso de fertilizantes nitrogenados, aún es común que grandes cantidades de nitrógeno reactivo se sigan perdiendo de los sistemas agrícolas, transportado como nitrato al agua subterránea o a la superficial y como emisiones de gases de nitrógeno a



la atmósfera. Estas pérdidas son particularmente comunes en regiones donde los sistemas de drenaje artificiales sub-superficiales remueven el exceso de agua del suelo de granjas establecidas en áreas de humedales naturales. Esta pérdida se debe en parte a un desfase temporal: grandes cantidades de nitrato se concentran en el suelo durante la primavera, cuando aún no hay cultivos sembrados o son demasiado pequeños como para absorber gran parte del nitrógeno del suelo; como consecuencia, el derretimiento de la nieve o las lluvias de primavera lavan mucho del nitrato y lo acarrearán a las aguas profundas y a los arroyos. La liberación de amoníaco, óxido nítrico y óxido nitroso hacia la atmósfera produce pérdidas adicionales.

Una gran parte de la producción agrícola de EUA se utiliza para alimentar al ganado, tanto para producción de carne como de leche. Estos animales sólo utilizan cerca del 30% del nitrógeno contenido en su alimento, el resto se excreta como estiércol (heces y orina). Previo a la agricultura moderna, la mayoría de las granjas tenían animales y diversificaban la rotación de cultivos. De tal manera que el nitrógeno fijado por las leguminosas podía utilizarse al año siguiente para la producción de granos y éstos para alimentar a la gente y a los animales; el estiércol se utilizaba, a su vez, como fertilizante para los cultivos. En contraste, la producción ganadera moderna se realiza de cientos a miles de kilómetros de distancia de las regiones de producción agrícola. Por ejemplo, la producción intensiva de cerdo en Carolina del Norte requiere importación de granos provenientes del Medio Oeste, pero no es económicamente rentable enviar el estiércol de los puercos de regreso para reciclarlo como fertilizante. Cerca del 50% del nitrógeno contenido en el estiércol se pierde durante su colecta, manejo y aplicación, la mayor parte en forma de amoníaco y gases de

Figura 7. La tasa de consumo de fertilizantes nitrogenados en EUA creció rápidamente en las décadas de 1960 y 1970, pero desde 1978 el incremento ha disminuido a 0.6% anual (círculos azules y línea de regresión azul). En contraste, el rendimiento promedio de maíz continúa aumentando a una tasa de 1.9% anual (diamantes rojos y línea de regresión roja), lo que indica una mejoría en la eficiencia de uso del nitrógeno. Datos de la Association of American Plant Food Control Officials, The Fertilizer Institute, y del USDA National Agricultural Statistics Service (NASS).

óxidos de nitrógeno. Conforme los sistemas de producción animal se expanden e intensifican, será necesario un mejor manejo y distribución del estiércol para reducir las pérdidas de nitrógeno.

Nuestro sistema actual de producción de alimentos tiene un dilema. Hemos construido un sistema económicamente eficiente, que produce comida relativamente barata y del gusto de la gente, pero ha sido a costa del medio ambiente, particularmente con respecto al nitrógeno. ¿Cómo podemos reducir las pérdidas de nitrógeno de la agricultura para mantener limpios el agua y el aire, que también la gente desea? Muchas estrategias de mitigación han mostrado su eficiencia para reducir las pérdidas de nitrógeno de las granjas y de los sistemas de producción ganaderos (Cuadro 3), lo que podría generar una reducción potencial de 30 a

50% o más en las pérdidas de dicho elemento en el sistema agrícola actual. Sin embargo, se requiere mejor infraestructura para la aplicación de fertilizantes y el manejo del estiércol, una mejor educación y entrenamiento de los asesores agrícolas y voluntad de los agricultores para adoptar estas prácticas. Con un enfoque ecológicamente intensivo, que integre rotaciones complejas de cultivos, cultivos de cobertura, cultivos perennes y un manejo animal mejorado, las pérdidas de nitrógeno podrían reducirse tanto como 70-90%.

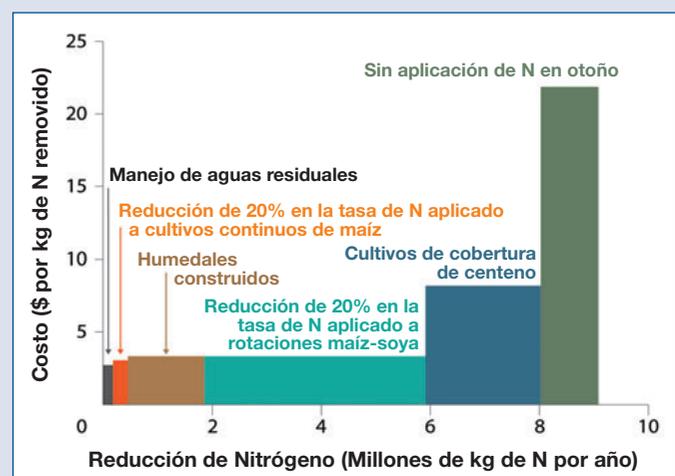
Otra aproximación es tratar al nitrógeno que sale de los campos de cultivo mediante operaciones “a la orilla de campo” tales como bioreactores o mediante la construcción de humedales artificiales. Igualmente, soluciones a la escala del paisaje pueden generar sumideros para capturar el nitrógeno que se pierde

Recuadro 2. ESTUDIOS DE CASO SOBRE EL POTENCIAL PARA LA REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE NITRÓGENO DE LA AGRICULTURA DE EUA

Ejemplo sobre la reglamentación y educación en Nebraska: La contaminación de los mantos freáticos con nitrato ha sido un problema en Nebraska (Figura 5), donde se cultiva maíz con irrigación. En el inicio de 1987, se llevó a cabo un programa de regulación por fases y de educación por parte del *Central Platte Natural Resources District*, que demostró que el incremento en las concentraciones de nitrato podría ser detenido y en algunas áreas revertido. La reglamentación se enfocó en la cantidad y la temporalidad de la aplicación de fertilizantes con nitrógeno (prohibición de la aplicación en otoño o invierno, lo que requirió de aplicaciones separadas en la primavera o del uso de inhibidores de la nitrificación), así como en la contabilización de todas las fuentes de nitrógeno en el cálculo de la cantidad de fertilizante requerido. Las tasas de aplicación de fertilizantes nitrogenados no cambiaron, aun cuando los rendimientos aumentaban. La mejoría en la temporalidad de aplicación produjo que el nitrato en el manto freático disminuyera en 20%, pues se removía más nitrógeno con las cosechas. La conversión de irrigación en zurcos a irrigación por aspersores permitió la aplicación más uniforme del agua con un mejor control de los niveles de nutrientes aplicados. La repartición de costos fue posible para ayudar a los productores a comprar los equipos. Los cambios en la forma de irrigación fueron responsables de cerca de la mitad de la disminución observada en las concentraciones de nitrato del manto freático. Sin embargo, basados en las tasas actuales de descenso del nitrato en el manto freático, podrían pasar décadas antes de que sean menores al estándar de 10 miligramos de nitrógeno-nitrato por litro de agua potable. Más información sobre este caso puede ser consultada en *Exner et al. (2010. The Scientific World Journal 10:286-297)*.

Estudio de caso de Iowa: Éste es un caso hipotético para ejemplificar como se podrían utilizar distintas prácticas de manejo para reducir las cargas de nitrógeno. La cuenca del Río Cedar en el este de Iowa se utiliza para el cultivo de maíz y soya, principalmente, con drenaje de tubos de cerámica en cerca de la mitad de la cuenca. En el 2006, el Departamento de Recursos Naturales de Iowa solicitó una reducción de 35% en la cantidad total de nitrógeno que llegaba de la cuenca y que representaba 25,910 toneladas métricas por año. La Figura 8 muestra como se podría lograr esta reducción adoptando distintas prácticas de manejo disponibles en la actualidad e implementadas durante un período de 20 años. El costo estimado de estas medidas es de \$71 millones de dólares al año o \$7.78 por cada kg de nitrógeno removido por año. En comparación, el gasto total del Programa de Incentivos para la Calidad Ambiental del USDA en Iowa en el 2009 fue de \$25 millones de dólares; el costo de remoción de un kilogramo de nitrógeno en los trabajos hidráulicos en Des Moines fue cerca de \$10; y el precio del fertilizante nitrogenado fue de \$0.72 por kilogramo en 2010.

Figura 8. Varias prácticas en conjunto podrían reducir las cargas de nitrógeno de la cuenca del Río Cedar en un 35%. En este análisis de costos, el ancho de cada barra indica el tamaño de la reducción de nitrógeno que se podría lograr con cada práctica de mitigación. La altura de las barras indica su costo por kilogramo de nitrógeno removido. Las intervenciones más efectivas en términos de costos se encuentran a la izquierda y las más caras a la derecha. La figura se realizó con datos publicados en *Helmets y Barker (2010). Proceedings of the 22nd Annual Integrated Crop Management Conference. p.195.*



de las granjas, tales como franjas amortiguadoras junto a los arroyos (sembradas con pastos o con árboles), de los humedales naturales y de hábitats riparios más complejos. Estas aproximaciones permiten que las prácticas agrícolas continúen como lo vienen haciendo, pero remueven el nitrógeno reactivo a través de la absorción de las plantas y los microbios y por la desnitrificación antes de que ocurran impactos ambientales y sobre la salud humana. Adicionalmente, estas estrategias con frecuencia proveen otros servicios ecológicos, como el control de inundaciones, la captura de carbono, hábitat para la fauna silvestre y servicios recreativos (Cuadro 3).

El uso de nitrógeno en casi todos los cultivos en hilera está diseñado para asegurar que los rendimientos y las ganancias no disminuyan debido a la falta de dicho elemento. Otro enfoque sería optimizar la eficiencia de uso de nitrógeno (es decir, obteniendo el mayor rendimiento por cantidad de fertilizante aplicado), lo que produciría menores pérdidas de nitrógeno hacia el agua y el aire. Todas las prácticas contenidas en el Cuadro 3, que podrían optimizar la producción agrícola basadas en la eficiencia de uso de nitrógeno, están disponibles para todos los agricultores y ganaderos de EUA y podrían implementarse al momento (ver los estudios de caso de Iowa y Nebraska en el Recuadro 2), pero muchas de ellas no se aplican debido al sistema actual de incentivos voluntarios. Casi todas estas prácticas involucran costos y riesgos adicionales para los agricultores, quienes no estarán dispuestos a adoptarlas sin alguna forma de apoyo, incentivos o regulaciones.

El reporte del Programa de Evaluación de los Efectos de la Conservación (*Conservation Effects Assessment Program*) de la Cuenca Alta del Río Mississippi indicó que el éxito en el control de la erosión y de la escorrentía superficial ha sido más amplio que la reducción de las pérdidas de nitrógeno en la misma región. Se ha estimado que las prácticas implementadas en los programas del USDA (Departamento de Agricultura de los EUA) han reducido la erosión y las pérdidas de fósforo y pesticidas en 69, 49 y 51%, respectivamente, pero sólo en 5% la pérdida sub-superficial de nitrato. Si las prácticas de conservación se centraran en la reducción de nitrato ¿podrían alcanzarse metas similares? Los resultados de modelos han mostrado que si las 14.6 millones de hectáreas de tierras agrícolas de la región fueran tratadas tanto con prácticas de control de erosión como de manejo para la conservación de nutrientes, las pérdidas de nitrógeno podrían reducirse un

43%. Aunque los porcentajes específicos están sujetos a las limitaciones del enfoque de modelación, la inspección mostró claramente que es posible aplicar técnicas de manejo de nutrientes con impactos favorables.

OPORTUNIDADES DE MITIGACIÓN EN LOS SECTORES DEL TRANSPORTE, ENERGÉTICO E INDUSTRIAL

El mayor avance en la reducción de las emisiones de nitrógeno reactivo al medio ambiente en EUA se derivó de la implementación de la Ley para el Aire Limpio (Clean Air Act, en inglés). Las emisiones de óxidos de nitrógeno disminuyeron en un 36% entre 1990 y 2008 (Cuadro 1), donde la mayor reducción provino de las fuentes móviles (p.ej. automóviles, camiones, autobuses y equipo de construcción) y de la generación de electricidad.

Estas fuentes contribuyen de manera diferencial a dichas emisiones dependiendo de la región del país. La preponderancia de las plantas de generación de energía a base de carbón en el este de EUA crea más emisiones de óxidos de nitrógeno que en el oeste. Se espera que la Norma Interestatal sobre la Contaminación del Aire (Cross-State Air Pollution Rule, en inglés) reduzca hacia el 2014 en 50% las emisiones de óxidos de nitrógeno debidas a la generación de electricidad en el este con respecto a los niveles de 2005. Ello ocurriría en la medida en que los estados cumplan con los Estándares Nacionales de Calidad del Aire sobre partículas finas y ozono. Las emisiones de dichos óxidos por parte de las fuentes móviles continuarán disminuyendo en todos lados conforme más automóviles nuevos circulen con estándares más estrictos de emisiones bajo las leyes federales actuales (California es la excepción, pues tiene leyes aún más estrictas). Se predice que las emisiones provenientes de los automóviles disminuirán en un 70% y las de la maquinaria pesada en un 40%, entre el 2002 y el 2018.

Debido a la tendencia general de disminución en las emisiones de óxidos de nitrógeno, la contaminación del aire ha cambiado, con importantes mejorías en lo que respecta a las concentraciones de ozono y partículas finas, así como el depósito de nitrógeno oxidado en muchas regiones:

- Concentraciones de dióxido de N: la concentración promedio anual de este gas disminuyó aproximadamente en un 40% entre 1980 y 2006, y actualmente se encuentra en

Figura 9. Tendencias en la concentración de ozono entre 1999 y 2008 en parques nacionales. Se observa que los programas regionales para el control de óxido de nitrógeno han producido la disminución de ozono en muchas áreas del este. El oeste muestra una menor mejoría. Esta figura está basada en el National Park Service Natural Resource Report, Air Quality in National Parks (NPS/NRPC/ARD/NRR2010/266).

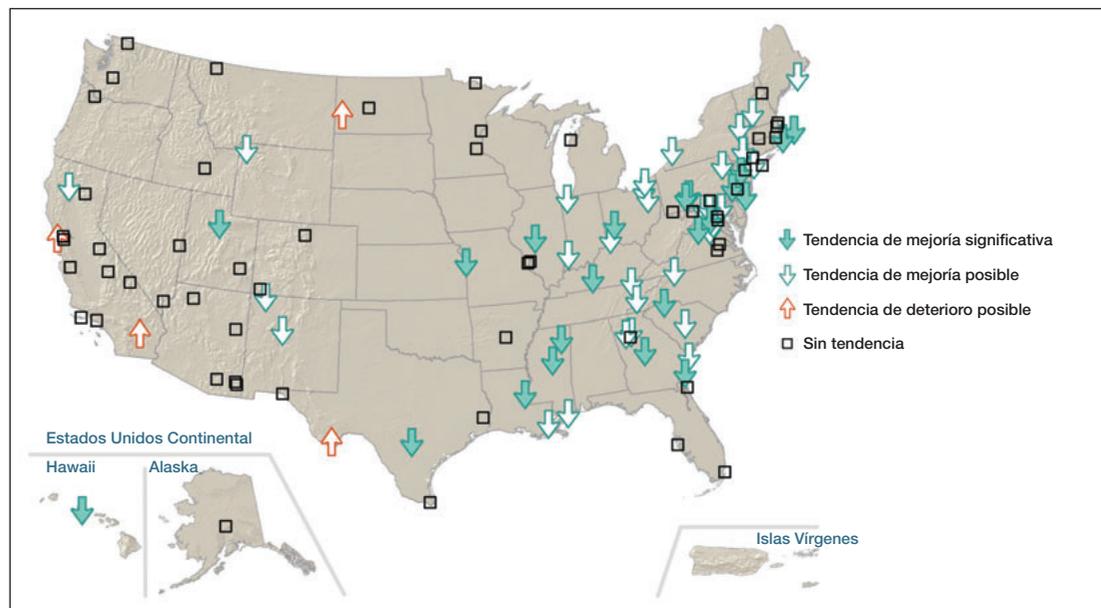


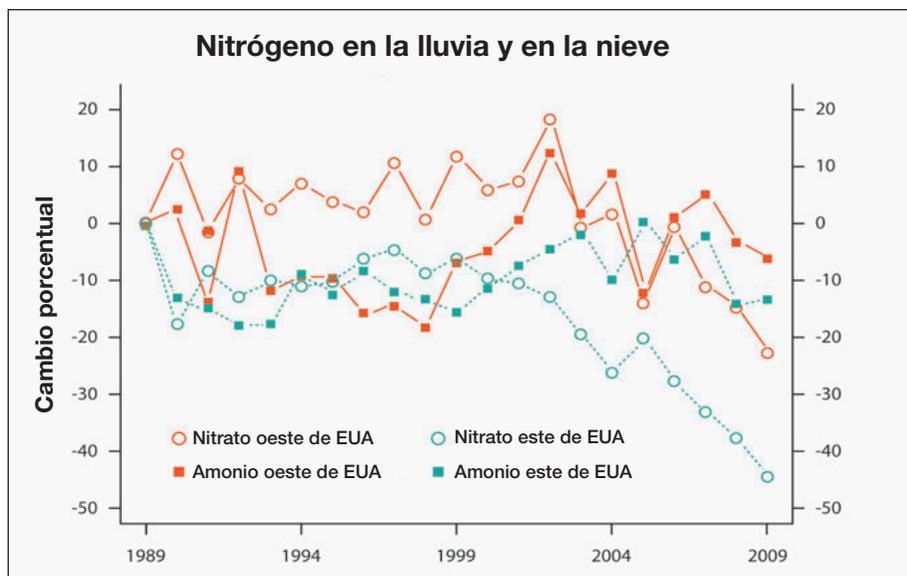
Figura 10. Las concentraciones de nitrato en la lluvia y en la nieve en el este de EUA (círculos azules) han disminuido debido a la implementación de regulaciones sobre la contaminación del aire por automóviles, plantas de generación de electricidad e industria, y a la innovación tecnológica. Un menor progreso ocurre en el oeste de EUA (círculos rojos). El amonio, proveniente de la agricultura, permanece sin regulación y no se han medido cambios consistentes (cuadrados rojos y azules).

20 partes por billón (ppb). Sin embargo, las mediciones realizadas cerca de caminos transitados y dentro de vehículos muestran concentraciones sustancialmente mayores (de 40 a más de 100 ppb).

- Concentraciones de ozono: a nivel nacional, las concentraciones de ozono al nivel del suelo fueron 10% más bajas en 2008 que en 2001. Sin embargo, como lo muestra la Figura 9, esta mejoría se concentra predominantemente en el este, mientras que no se aprecia una tendencia consistente en el oeste. Más de 100 millones de estadounidenses viven en áreas con niveles de ozono superiores aún a los estándares de la APA.
- Partículas finas: a nivel nacional, las concen-

traciones anuales de partículas finas ($PM_{2.5}$) han disminuido en un 17% entre 2001 y 2008. En la mayor parte de EUA las concentraciones son menores a los niveles regulatorios de la APA, pero 70 millones de personas viven en donde los niveles de las $PM_{2.5}$ están por arriba de los estándares de la misma.

- Depósito de nitrógeno: las concentraciones de nitrato y amonio en la lluvia y en la nieve disminuyeron de 10 a 20% entre 1989 y 1991 y entre 2006 y 2008. Las concentraciones de nitrato reflejan la reducción significativa de emisiones de óxidos de nitrógeno en el este del país, con disminuciones menores en el oeste (Figura 10). No parece haber un cambio consistente en las concentraciones de amonio.



Las emisiones de amoníaco se deben principalmente a las prácticas agrícolas, incluyendo el uso de fertilizantes y las operaciones con ganado estabulado. La agricultura contribuyó con más del 80% de las emisiones de amoníaco en 2008. Menos del 10% del amoníaco a nivel nacional se emite como subproducto de las tecnologías utilizadas para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno derivadas de servicios eléctricos y de automóviles. En contraste con la disminución esperada en las emisiones de óxidos de nitrógeno, se espera un incremento significativo en las de amoníaco en el centro y en el este de EUA —permaneciendo estables en el oeste— entre 2002 y 2018. La contribución creciente de las emisiones de amoníaco al depósito de nitrógeno y a la formación de partículas finas es preocupante. Conforme las emisiones de óxido de nitrógeno disminuyen, la fracción atribuible

al amoníaco aumentará y llegará a representar el 60% para el 2020. Mientras que la mayoría de las emisiones de óxidos de nitrógeno se encuentran dentro de los límites establecidos por la APA con respecto a la contaminación del aire, las emisiones de amoníaco de la agricultura permanecen en su mayoría sin regulación. Sin ella será difícil lograr estándares más estrictos sobre las partículas finas en relación con la salud humana y reducir el depósito de nitrógeno en los ecosistemas.

CONCLUSIONES

El incremento en la demanda por alimento, fibras y combustibles asegura que la sociedad enfrentará un reto creciente para cubrir tales demandas y a la vez minimizar los impactos no intencionales en el medio ambiente y en la salud humana. Las normas sobre la contaminación del aire en EUA han demostrado que la reducciones de las emisiones de óxidos de nitrógeno han sido tecnológica, social y económicamente viables y han producido mejoras medibles en la calidad del aire y en la salud ambiental y humana. En general, la saga del nitrógeno en la contaminación del aire es, por lo menos, una historia parcial de éxito de la política ambiental en EUA y se esperan más reducciones y mejoras. Sin embargo, la historia aún no ha terminado, pues existen áreas con una calidad pobre del aire y con depósitos altos como consecuencia de las emisiones de óxidos de nitrógeno y de amoníaco. Aunque existe la tecnología para reducir significativamente las emisiones de nitrógeno reactivo provenientes de la agricultura, todavía hay barreras culturales y económicas por superar. La atención sobre la disyuntiva entre los efectos positivos de una buena nutrición humana y las consecuencias negativas del uso ineficiente del nitrógeno en la producción de alimentos aumentará, seguramente, con la acumulación creciente de pruebas sobre los impactos de la ingestión de nitrato, de la inhalación de dióxido de nitrógeno, del ozono y de las partículas finas en la salud humana, así como del efecto del nitrógeno reactivo sobre los vectores de enfermedades en el ser humano. Debido a que este elemento es de vital importancia en casi todos los procesos biológicos, las pruebas sobre sus impactos ambientales se están acumulando, como lo son el cambio climático, la biodiversidad, la dispersión de especies invasoras, los riesgos de fuego, el manejo de pesquerías y la salud de los ecosistemas.

Nuestra habilidad para cuantificar las trans-

ferencias de nitrógeno entre la superficie terrestre, el agua y el aire ha aumentado desde la primera publicación de esta serie. Pero más importante aún es el creciente reconocimiento sobre la necesidad de integración de las ciencias naturales y sociales para abordar las consecuencias del aumento del nitrógeno reactivo en el medio ambiente. Agrónomos, edafólogos, ingenieros, químicos atmosféricos, meteorólogos, ecólogos terrestres y acuáticos, biogeoquímicos, economistas y epidemiólogos se encuentran ahora trabajando en conjunto en obras como la presente publicación y en evaluaciones planeadas para establecer las consecuencias y las opciones de mitigación desde múltiples perspectivas. En muchos casos, ya se tiene suficiente conocimiento científico y la tecnología apropiada disponible para reducir los impactos indeseables de las emisiones de nitrógeno al medio ambiente. Sin embargo, consideraciones socio-económicas y políticas presentan aún serios impedimentos, en parte debido a la falta de claridad sobre las disyuntivas complejas entre la salud humana, la salud ecosistémica y los costos económicos y sus beneficios. La colaboración entre sectores y entre disciplinas será necesaria para generar soluciones eficaces, debido a que estas cuestiones del nitrógeno reactivo no caben claramente en el marco de una sola agencia gubernamental o disciplina científica, tal como la ambiental, la agrícola, la energética o la de la salud.

Bibliografía adicional sugerida

- Compton, J.E., J.A. Harrison, R.L. Dennis, T.L. Greaver, B.H. Hill, S.J. Jordan, H. Walker, and H.V. Campbell. 2011. Ecosystem services altered by human changes in the nitrogen cycle: A new perspective for US decision making. *Ecology Letters*. 14(8): 804–815.
- David, M.B., L.E. Drinkwater, and G.F. McIsaac. 2010. Sources of nitrate yields in the Mississippi River basin. *Journal of Environmental Quality*. 39: 1657–1667.
- U.S. Environmental Protection Agency Science Advisory Board. 2011. Reactive Nitrogen in the United States: An Analysis of Inputs, Flows, Consequences, and Management Options - A Report of the EPA Science Advisory Board (August 2011). EPA-SAB-11-013. Washington, DC.
- Galloway, J.N., J.D. Aber, J.W. Erisman, S.P. Seitzinger, R.W. Howarth, E.B. Cowling, and B. J. Cosby. 2003. The nitrogen cascade. *BioScience*. 53(4): 341.

GLOSARIO. CONOCE TU NITRÓGENO

| | |
|-----------------------------------|--|
| N₂ | Nitrógeno atmosférico, también llamado dinitrógeno, formado por dos átomos de dicho elemento. Es un gas inerte, inocuo e inutilizable para la mayoría de las formas de vida. Constituye el 78% de la atmósfera. |
| Nr | Nitrógeno reactivo. Todas las formas de N que no son N ₂ . Es un nutriente esencial para la vida y es también reactivo en la atmósfera. Se produce naturalmente por la fijación biológica de N (ver definición abajo) y por los rayos. Los seres humanos lo producen en la industria de los fertilizantes y de las municiones y por la quema de combustibles fósiles. |
| N₂O | Óxido nitroso. Un potente gas de efecto invernadero y reactivo que destruye el ozono estratosférico. Producido en su mayoría por bacterias en los suelos, los sedimentos y los cuerpos de agua, pero también debido a incendios y en la producción industrial de nylon. |
| NH_x | Nitrógeno reducido. Cualquier forma de N que tenga un estado de oxidación menor al N ₂ (p.ej. NH ₃ , NH ₄ ⁺ , urea, aminoácidos). |
| NH₃ | Amoníaco. Gas emitido desde el suelo y del estiércol y como un componente menor del humo del escape de los automóviles. También se utiliza como fertilizante. Contribuye a la formación de smog y neblina y a las adiciones inadvertidas de nutrientes en ecosistemas viento abajo. |
| NH₄⁺ | Amonio. Una forma soluble del amoníaco que se encuentra en fertilizantes, suelos, cuerpos de agua y en la atmósfera. Puede contribuir a la proliferación de algas y a la acidificación del suelo. |
| NO | Óxido nítrico. Un precursor de la formación de ozono. Gas que se genera principalmente por los incendios y la quema de combustibles fósiles, aunque se emite también del suelo. |
| NO₂ | Dióxido de nitrógeno. Gas que participa en reacciones fotoquímicas complejas que involucran la formación y destrucción de ozono. Se produce cuando el NO se oxida en la atmósfera y por la quema de combustibles fósiles y los incendios. Es un contaminante regulado que se le relaciona con enfermedades respiratorias. |
| NO_x | Óxidos de nitrógeno. Una manera abreviada de referirse al NO + NO ₂ ⁻ . Se generan mayormente por la quema de combustibles fósiles, pero también se emiten del suelo. |
| NO_y | Nitrógeno oxidado. Cualquiera de los óxidos de N (p.ej. NO, NO ₂ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻). |
| NO₂⁻ | Nitrito. Forma soluble que se encuentra usualmente en bajas concentraciones en suelos y cuerpos de agua, así como en el cuerpo humano. Es tóxico en general para la mayoría de los organismos si se presenta en concentraciones altas. |
| NO₃⁻ | Nitrato. Forma soluble que se encuentra en fertilizantes, suelos, cuerpos de agua y la atmósfera. Es un contaminante regulado del agua potable y puede causar proliferaciones de algas. |
| CNOs | Compuestos N-nitrosos tales como las N-nitrosaminas y N-nitrosamidas que se producen en el intestino de los animales (y los humanos) a partir del NO ₂ ⁻ y son potencialmente carcinogénicos. |
| Depósito de N | Nitrógeno reactivo, mayormente como NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ y NOD, que llega al agua y a la tierra desde la atmósfera, transportado ya sea por la lluvia, la nieve, o los aerosoles. |
| FBN | Fijación biológica de N. Proceso por medio del cual bacterias, hongos y algas verde-azules convierten el nitrógeno atmosférico (N ₂) en sus formas reactivas, utilizables por las plantas y los animales, incluidos los humanos. |
| Nitrificación | Importante proceso de dos pasos que involucra la oxidación de NH ₄ ⁺ a NO ₂ ⁻ y finalmente a NO ₃ ⁻ . Es llevado a cabo por microorganismos en el suelo y en los cuerpos de agua. |
| Desnitrificación | Proceso con múltiples pasos que convierte el NO ₃ ⁻ reactivo a NO ₂ ⁻ , NO, N ₂ O y finalmente a N ₂ (no reactivo). Es llevado a cabo por bacterias en suelos, sedimentos y cuerpos de agua. Típicamente sucede en condiciones bajas de oxígeno. |
| NOD | Nitrógeno orgánico disuelto. Formas orgánicas solubles de N que ocurren en suelos, agua subterránea y cuerpos de agua. Puede causar proliferaciones de algas. |
| N inorgánico | Se refiere generalmente al NH ₄ ⁺ y al NO ₃ ⁻ , pero también incluye cualquier forma de Nr que no esté ligada al carbono en una molécula orgánica. |
| MP | Materia particulada. Partículas finas, incluyendo aerosoles, encontradas en la atmósfera y que contienen con frecuencia NH ₄ ⁺ y/o NO ₃ ⁻ . La materia particulada muy fina de sólo 2.5 micrómetros de diámetro, conocida como PM _{2.5} , es un contaminante regulado porque puede albergarse en los pulmones y ocasionar enfermedades respiratorias. |
| N sintético | N reactivo creado industrialmente por el proceso Haber-Bosch mediante la reducción de N ₂ a NH ₃ bajo condiciones de temperatura y presión altas. Incluye el N en los fertilizantes, en explosivos y con otros usos industriales. |
| Urea | Forma común de fertilizante nitrogenado sintético. Usualmente, se transforma rápidamente en el suelo a amonio o amoníaco. La orina animal (incluida la humana) contiene un compuesto similar llamado ácido úrico. Puede contribuir a la proliferación de algas. |

- Howarth, R.W., G. Billen, F. Chan, D. Conley, S.C. Doney, J. Garnier, and R. Marino. 2011. Coupled biogeochemical cycles: Eutrophication and hypoxia in coastal marine ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 9: 18–26.
- Johnson, P.T., A.R. Townsend, C.C. Cleveland, P.M. Glibert, R.W. Howarth, V.J. McKenzie, E. Rejmankova, and M.H. Ward. 2010. Linking environmental nutrient enrichment and disease emergence in humans and wildlife. *Ecological Applications*. 20: 16–29.
- Pardo, L.H., M.E. Fenn, C.L. Goodale, L.H. Geiser, C.T. Driscoll, E.B. Allen, J.S. Baron, R. Bobbink, W.D. Bowman, C.M. Clark, B.A. Emmett, F.S. Gilliam, T.L. Greaver, S.J. Hall, E.A. Lilleskov, L. Liu, J.A. Lynch, K.J. Nadelhoffer, S.S. Perakis, M.J. Robbin-Abbott, J.L. Stoddard, K.C. Weathers, and R.L. Dennis. 2011. Effects of nitrogen deposition and empirical nitrogen critical loads for ecoregions of the United States. *Ecological Applications*. DOI 10.1890/10-2341.1
- Smil, V. 2001. *Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch and the transformation of world food production*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Snyder, C.S., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen, and P.E. Fixen. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 133: 247–266
- Sutton, M.A., C.M. Howard, J.W. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven, and B. Grizzetti. 2011. *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 612 pp. <http://www.nine-esf.org/ENA-Book>
- Townsend, A. and R. W. Howarth. 2010. Human acceleration of the global nitrogen cycle. *Scientific American*. 302: 32–39
- Vitousek, P.M., J. D. Aber, R.W. Howarth, G.E. Likens, P.A. Matson, D.W. Schindler, W.H. Schlesinger, and D.G. Tilman. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*. 7(3): 737–750.
- Ward, M.H., T.M. de Kok, P. Levallois, J. Brender, G. Gulis, B.T. Nolan, and J. VanDerslice. 2005. Workgroup report: Drinking-water nitrate and health: Recent findings and research needs. *Environmental Health Perspectives*. 113: 1607–1614.
- WHRC and UNEP. 2007. *Reactive Nitrogen in the Environment: Too Much or Too Little of a Good Thing*. Eric A. Davidson, Charles Arden-Clarke, and Elizabeth Braun (eds.). The United Nations Environment Programme. Paris, France. Available at: <http://www.whrc.org/resources/publications/pdf/UNEPetal.2007.pdf>

Agradecimientos

Este trabajo es el resultado de un taller financiado por la NSF Research Coordination Network, asignaciones DEB-0443439 y DEB-1049744. El apoyo económico para MW provino del programa de investigación intramuros del National Cancer Institute (Instituto Nacional contra el Cáncer). Agradecemos a Jenny Au, de Resource Media, por su ayuda con las gráficas y a Emma Suddick, del Woods Hole Research Center, por su ayuda en la corrección de pruebas. Este artículo no ha sido sometido a la APA (EPA) para revisión por pares o administrativa; por lo mismo, las conclusiones y opiniones contenidas aquí son solamente atribuibles a los autores y no reflejan los puntos de vista de la APA.

Sobre los Científicos

Eric A. Davidson, The Woods Hole Research Center, Falmouth, MA 02540-1644.

Mark B. David, University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Natural Resources and Environmental Sciences, Urbana, IL 61801

James N. Galloway, Environmental Sciences Department, University of Virginia, Charlottesville, VA 22904

Christine L. Goodale, Cornell University, Department of Ecology & Evolutionary Biology, Ithaca, NY 14853

Richard Haeuber, Assessment and Communications Branch, Clean Air Markets Division, Office of Air and Radiation, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460

John A. Harrison, Washington State University, School of Earth and Environmental Sciences, Vancouver, WA 98686

Robert W. Howarth, Cornell University, Department of Ecology & Evolutionary Biology, Ithaca, NY 14853

Dan B. Jaynes, National Laboratory for Agriculture and the Environment, USDA-ARS, Ames, IA 50011-3120

R. Richard Lowrance, USDA-ARS, Southeast Watershed Research, Tifton, GA 31793

B. Thomas Nolan, U.S. Geological Survey National Water Quality Assessment Program, Reston, VA 20192

Jennifer L. Peel, Colorado State University, Department of Environmental and Radiological Health Sciences, Fort Collins, CO 80523

Robert W. Pinder, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711

Ellen Porter, National Park Service Air Resources Division, Lakewood, CO 80228

Clifford S. Snyder, International Plant Nutrition Institute, Conway, AR 72034

Alan R. Townsend, INSTAAR, Dept of Ecology and Evolutionary Biology & Environmental Studies Program, University of Colorado, Boulder, CO 80303

Mary H. Ward, Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, National Institutes of Health, Bethesda, MD 20892

Redacción Científica y Estructura del Manuscrito

Penelope Whitney, Science writer

Bernie Taylor, Design and layout

Sobre los Tópicos en Ecología

Los Tópicos en Ecología reportan el consenso de un grupo de científicos expertos sobre temas relacionados con el medio ambiente en un lenguaje comprensible. El contenido técnico del texto de cada número de Tópicos en Ecología es revisado por pares expertos externos y todos deben ser aprobados por el Editor en Jefe previo a su publicación. Este reporte es una publicación de la *Ecological Society of America*. Los editores y la editorial no asumen responsabilidad alguna por las opiniones vertidas por los autores en las publicaciones de la ESA.

Jill S. Baron, Editor en Jefe,
U.S. Geological Survey and Colorado State University, jill.baron@colostate.edu

Consejo Asesor de Tópicos en Ecología

Charlene D'Avanzo, Hampshire College
Robert A. Goldstein, Electric Power Research Institute

Noel P. Gurwick, Union of Concerned Scientists

Rachel Muir, U.S. Geological Survey

Christine Negra, the H. John Heinz III Center for Science, Economics, and the Environment

Louis Pitelka, University of Maryland - Center for Environmental Science

Sandy Tartowski, USDA - Agricultural Research Service, Jornada Experimental Range

David S. Wilcove, Princeton University

Kerry Woods, Bennington College

Asesores Ex-Officio

Jayne Belnap, U.S. Geological Survey

Clifford S. Duke, Ecological Society of America

Deborah Goldberg, University of Michigan

Richard Pouyat, USDA Forest Service

Traducción al Español

Guillermo N. Murray-Tortarolo^{1,2}
(gmurrayt@gmail.com) y Víctor J. Jaramillo¹
(luque@oikos.unam.mx)

¹Universidad Nacional Autónoma de México
²Estudiante de Doctorado, Universidad de Exeter, Reino Unido

Personal de la ESA

Clifford S. Duke, Director of Science Programs

Jennifer Riem, Science Programs Coordinator

Copias adicionales

Este reporte y los números previos de Tópicos en Ecología están disponibles electrónicamente de manera gratuita en

www.esa.org/issues.

Pueden solicitarse copias impresas en línea o contactando a la ESA:

Ecological Society of America
1990 M Street NW, Suite 700
Washington, DC 20036
(202) 833-8773, esahq@esa.org

