

Alternativas de manejo para mitigar los síntomas de saturación de N en ecosistemas forestales

M.C. Blanes¹, B. Viñegla¹, V.M. Santana² & J.A. Carreira¹

¹*Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología.*

Campus Las Lagunillas, s/n. Universidad de Jaén. E-23071 Jaén (Spain)

²*Fundación de la Generalitat Valenciana Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM). C/ Charles Darwin, 14. Parque Tecnológico, 46980 Paterna, Valencia, (Spain).*

mblanes@ujaen.es

Resumen

Altas tasas de deposición crónica de N pueden derivar en el declive de ecosistemas forestales tras alcanzar un estado de saturación de nitrógeno (N). La pérdida de N por lixiviación, promovida por el incremento en la disponibilidad de N y la disminución de la capacidad de retención de N, son los principales síntomas de los bosques saturados de N. El objetivo de este trabajo ha sido sintetizar la información existente sobre los distintos tipos de manejo que se pueden aplicar para mitigar estos síntomas. Estos tratamientos se basan en incrementar la demanda de N por la vegetación manteniendo un estado de desarrollo inmaduro del bosque con altas tasas de crecimiento. Los fuegos prescritos, los tratamientos de aclareo y la fertilización con nutrientes limitantes, son las opciones de manejo más usadas para incrementar la capacidad de retención de N de los bosques. El resultado de estos trabajos sugiere que el efecto de las diferentes prácticas de manejo depende de su intensidad y de las condiciones iniciales del bosque.

INTRODUCCIÓN

La aparición de ecosistemas saturados por N es el resultado de fenómenos de deposición crónica de N asociados al aumento de emisiones derivadas de la actividad humana. Además de que el N₂O está considerado como gas invernadero, el N controla aspectos claves del ciclo del C (Falkowski et al., 2000; *Science* 290:291-296) así como la producción primaria en la biosfera (Gruber et al., 2008; *Nature* 451:293-296). Un incremento en la disponibilidad de N en bosques limitados por N estimularía inicialmente la tasa de crecimiento, atenuando el incremento atmosférico de CO₂. Sin embargo, la producción primaria se reduciría en los estadios más avanzados de saturación de N, alterando también la composición de las especies y la funcionalidad de las comunidades (Norby, 1998; *New Phytol* 139:189-200; Emmett, 2007; *Water Air Soil Poll* 7:99-109), reduciendo la capacidad de retener N y C por la vegetación y también por el suelo. Así, un incremento excesivo en la disponibilidad de N debilitaría el papel de los bosques como sumideros de C (Nadelhoffer et al., 2008; *Nature* 398:145-148) acelerando los efectos del cambio climático (Gruber et al., 2008; *Nature* 451:293-296) y provocando efectos deletéreos sobre los ecosistemas forestales en las zonas más industrializadas del hemisferio Norte.

La denominada Hipótesis de Saturación de N trata de explicar el conjunto de cambios que se producen en diversos procesos de los ecosistemas como consecuencia del incremento crónico de deposición N, de origen fundamentalmente antrópico, y cómo dichos cambios pueden derivar en el declive de ecosistemas forestales a medio y largo plazo (Aber et al., 1998; *BiosSci* 48:921-934).

En una fase inicial, diversos mecanismos de retención biótica y abiótica del N entrante promoverían un incremento de la productividad forestal a corto plazo, como respuesta al proceso de "fertilización" con N, ya que éste ha sido considerado de forma genérica el primer nutriente limitante en ecosistemas forestales (Vitousek et al., 1991; *Biogeochem* 13:87-115). Si la deposición atmosférica es crónica y de suficiente magnitud el aumento de la disponibilidad de N, impulsada por las altas tasas de mineralización y de nitrificación, puede llevar con el tiempo a que el N disponible supere a la demanda biológica de este nutriente, lo que disminuiría la capacidad de retención de N por los ecosistemas y el aumento de las pérdidas de nitrato por lixiviación (Magill et al., 1996; *For Ecol Manage* 84:29-37), procesos que están especialmente estimulados en ecosistemas mediterráneos por la asincronía temporal que se produce entre los picos de la disponibilidad de N del suelo, el drenaje y la escorrentía de los flujos de agua, y la demanda de N por la vegetación. (Fenn et al., 1998; *Ecol Appl* 8(3):706-733).

Opciones de manejo de ecosistemas saturados por N

Las estrategias que se han presentado para mitigar los síntomas de Saturación de N están basadas en prácticas orientadas a incrementar la capacidad de retención de N y a prevenir las pérdidas de N del ecosistema. Siguiendo estos objetivos, Fenn et al. propusieron las siguientes alternativas de manejo (1998; *Ecol Appl* 8(3):706-733):

a) Mantener el bosque en un estado de desarrollo adecuado

El efecto de la deposición de N sobre la capacidad de retención de N depende de distintos factores incluyendo la respuesta de la producción primaria, cambios en la calidad de la hojarasca asociados a cambios en la composición de especies y alteraciones de las características funcionales de las especies presentes (Emmett, 2007; *Water Air Soil Poll* 7:99-109). Así, un descenso en las especies fijadoras de N₂ podría retrasar el enriquecimiento excesivo de N en ecosistemas sujetos a altas tasas de deposición de N. Este declive de la vegetación, característico de sistemas con baja disponibilidad de N, podría constituir un mecanismo de autorregulación del propio ecosistema. En este sentido, las especies fijadoras de N serían reemplazadas mediante un proceso natural por especies más demandantes de N, incrementando, por tanto, la retención de N (Mc Nulty et al., 1996; *For Ecol Manage* 84:109-121). Sin embargo, entradas excesivas de N pueden causar daños fisiológicos en briófitos y líquenes. Este tipo de vegetación ha sido considerada como un "filtro" de los aportes atmosféricos de N si las tasas de deposición son bajas (Curtis et al., 2005; *J Appl Ecol* 42:507-517; Emmett, 2007; *Water Air Soil Poll* 7:99-109). Por el contrario, si la disponibilidad de N es demasiado alta y el contenido de N foliar alcanza el nivel crítico, la capacidad de retención de N de briófitos y líquenes se reduciría, incrementando las pérdidas de N del ecosistema (Carroll et al., 2000; *J Bryol* 22:83-89). Así, una política adecuada de conservación de este tipo de vegetación, constituiría una buena estrategia para reducir los síntomas de N.

Por otro lado, distintos estudios han encontrado una relación entre el estado de desarrollo del ecosistema y la capacidad de retención de N (Emmett et al., 1993; *Ambio* 22:386-394; Reynolds et al., 1994; *Env Poll* 84:27-33). Ecosistemas muy maduros apenas incrementarían el total de la biomasa y, por tanto, no podrían incorporar los aportes extras de nutrientes, provocando pérdidas mayores de N. Prácticas silviculturales como los aclareos selectivos, las podas, las talas y los fuegos prescritos podrían "rejuvenecer" el bosque, incrementando el crecimiento de la vegetación y la incorporación de N a la biomasa.

b) Fuegos prescritos

Los aportes extra de N pueden incrementar la densidad del bosque, el crecimiento en volumen y el contenido en N de las hojas. Estos procesos afectan a las propiedades químicas del combustible e incrementan la carga del mismo en los ecosistemas, incrementando así la inflamabilidad del bosque y el riesgo de incendios (Gimeno et al., 2009; Management options for mitigating nitrogen losses from N-saturated mixed-conifer forests in California En: *Developments in environmental Science*, Elsevier, pp. 425-455).

Los fuegos prescritos han sido considerados como una posible herramienta para mitigar el enriquecimiento de N en los ecosistemas adaptados al fuego. Los incendios liberan N desde el ecosistema y estimulan al banco de semillas para la regeneración de las plantas germinadoras, induciendo el rebrote de arbustos e incrementando inicialmente el crecimiento de la vegetación (Carter et al., 2004; *For Ecol Manage* 191:93-109), que será un sumidero de N más importante que la vegetación decadente. Sin embargo, el fuego causa inicialmente una gran pérdida de N debido a su volatilización durante el incendio y al incremento de su disponibilidad provocado por las altas tasas de nitrificación después del fuego.

El efecto del fuego sobre el C y el N en el suelo depende de su intensidad y de su recurrencia (Carreira et al., 1994; *Biogeochem* 26:189-209; Johnson et al., 2001; *For Ecol Manage* 140:227-238; Wan et al., 2001; *Ecol Appl* 11:1349-1365; Carter et al., 2004; *For Ecol Manage* 191:93-109). También se han encontrado pérdidas iniciales de nitrato por escorrentía 40 veces más altas en las parcelas quemadas con fuego severo que en las control (Riggan et al., 1994; *Environ Sci Technol* 28:369-375). Otros resultados han mostrado que parcelas quemadas con una intensidad moderada presentaron pérdidas iniciales más bajas, de hasta una séptima parte que las pérdidas encontradas tras una intensidad de fuego severo (Riggan et al., 1994; *Environ Sci Technol* 28:369-375; Romanyà et al., 2001; *For Ecol Manage* 147:39-53).

Por otro lado, el tipo de ecosistema afecta al tiempo de recuperación de la capacidad de retención de N tras el incendio. Un estudio sobre el bosque mixto de coníferas en Sequoia National Park (EE.UU.) mostró que el contenido de nitrato en el agua de escorrentía disminuyó respecto a los niveles anteriores al fuego, sólo 3 años después de dicha perturbación (Williams et al., 1997; *Biogeochem* 39:225-253). Un trabajo similar en la cuenca del lago Tahoe mostró un corto periodo de recuperación tras el fuego en lo que se refiere al N encontrado en el agua de escorrentía (Stephens et al., 2004; *Int J Wildland Fire* 13(1):27-35). Otros autores mostraron que la fase de recuperación tras el incendio prescrito en un chaparral, sujeto a un clima semiárido, se prolonga más que en ecosistemas más húmedos, indicando que su capacidad de retención de N inicial se mantiene baja durante más tiempo (Meixner et al., 2006; *Environ Sci Technol* 49:2887-2894). Además, aunque las pérdidas de N se redujeron modestamente tras un largo periodo de tiempo (7-10 años), el ecosistema continuó en una fase de saturación de N, indicando que los síntomas de saturación de N no se revirtieron tras el incendio. Sin embargo, tras realizar un estudio de simulación para un bosque mixto de coníferas, concluyeron que el tratamiento combinado de incendios prescritos con un intervalo de 15 años junto con una reducción del 50-75% de las emisiones de N sería la mejor opción para reducir las pérdidas de N desde el ecosistema (Gimeno et al., 2009; Management options for mitigating nitrogen losses from N-saturated mixed-conifer forests in California. En: *Developments in environmental Science*, Elsevier, pp. 425-455).

Estas diferencias con respecto al efecto del fuego sobre la capacidad de retención de N sobre los distintos tipos de ecosistemas pueden ser debidas a que los fuegos prescritos en bosques de coníferas generalmente sólo consiguen el reemplazamiento del matorral y los arbustos existentes, mientras que en el

chaparral toda la vegetación existe se renueva completamente (Meixner et al., 2006; *Environ Sci Technol* 49:2887–2894).

Sin embargo, existe una limitación de esta estrategia que consiste en que, mientras que el fuego elimina una cantidad importante del N de la capa más superficial y orgánica del suelo forestal, elimina sólo una pequeña fracción de la gran reserva del N mineral del suelo, aumentando al mismo tiempo la disponibilidad de N a corto plazo después del fuego (Johnson et al., 2009; *Fire Effects on Carbon and Nitrogen Cycling in Forests of The Sierra Nevada En: Developments in environmental Science*, Elsevier, pp. 425-455). Además, la principal desventaja de esta práctica es que sólo sería apta para ecosistemas adaptados al fuego, quedando excluida para el manejo de ecosistemas con baja resiliencia, donde prime su conservación.

c) Aclareos y entresacas

Existe controversia en relación a cuál es el efecto del aclareo y de las entresacas sobre la pérdida de N en los bosques. Inicialmente se produciría una pérdida de N por lixiviación debido al incremento de las tasas de mineralización y nitrificación, acrecentada por el aumento de la temperatura alcanzada en los espacios sin cubierta vegetal (**Tabla 1**). Por otro lado se incrementaría la regeneración natural y el crecimiento de los árboles, aumentando la demanda de N (Lundborg, 1997; *Ambio* 26:387-393). La evapotranspiración también se vería incrementada, reduciendo así las pérdidas de N por lixiviación y escorrentía. Pero el efecto depende del tipo de aclareo o entresaca. Así, distintos trabajos han mostrado menores pérdidas de nitrato por lixiviación en los aclareos, donde se retiraban todos los residuos de la tala, que en los manejos tradicionales, donde se dejaban sobre el suelo (Hendrickson et al., 1989; *Can Journal For Res* 19:725-735; Stevens et al., 1990; *Biogeochem* 10:53-65, Lundborg, 1997; *Ambio* 26:387-393).

Tabla 1. Efecto de cada opción de manejo sobre la pérdida inicial de N justo después de la aplicación del tratamiento, tiempo de recuperación o activación del tratamiento e incremento en la retención de N en suelos forestales transcurrido el tiempo de recuperación.

Tratamiento	Pérdida inicial de N	Tiempo de recuperación o activación	Incremento retención N
Fuegos prescritos	Muy alto	7-10 años (ecosistemas semiáridos)	Bajo
	Alto	2-3 años (ecosistemas mésicos)	Medio
Aclareos y entresacas	Alto	3-5 años	Medio
Fertilización y enmienda cálcica	Muy bajo	0-2 años	Medio

Sin embargo, el meta-análisis realizado por Johnson et al. (2001) sugiere que los aclareos donde se retiraban los residuos causaban una ligera reducción del C y el N en el horizonte A, mientras que en los bosques donde se dejaban los restos se producía un incremento del 18% comparado con los controles. Esta falta de consistencia en los resultados puede depender del tiempo que lleven los restos vegetales en el suelo y, por tanto, de su relación C/N. La relación C/N del suelo se ha considerado como un buen predictor de la pérdida de N por lixiviación (Gundersen et al., 1998; *Env Poll* 102:403-407). Así, inicialmente, residuos con un alto ratio C/N se incorporarían al suelo reequilibrando los bajos niveles de C y

permitiendo una retención mayor de N a corto plazo. Por otra parte, retirar el material de la poda podría agravar los síntomas de saturación de N en las zonas donde otros nutrientes son limitantes, requiriendo una fertilización con estos nutrientes.

d) Fertilización y enmienda cálcica

El incremento de la disponibilidad de N puede inducir un incremento de la demanda de otros nutrientes por los árboles (Carreira et al., 2000; *Soil Biol Biochem* 32:1857-1865) que, acompañado por la acidificación del suelo y la pérdida de cationes de base por lixiviación, pueden agotar la mayor parte de las reservas disponibles de otros nutrientes como el P. Consecuentemente, el N dejaría de ser limitante y el siguiente nutriente más demandado empezaría a serlo (Gress et al., 2007; *Ecology* 88:119-130). En este sentido, una fertilización con el nutriente limitante podría incrementar la retención de N.

Un estudio donde P y K fueron añadidos a bosques de *Picea* sp. (Stevens et al., 1993; *For Ecol Manage* 58:233-247) mostró un aumento de la retención de N y disminuyó la concentración de nitrato en la solución del agua del suelo. También se encontró una reducción significativa de la concentración de NO_3^- en el suelo bajo *Deschampsia flexuosa* tras la adición de P (Nielsen et al., 2009; *Appl Soil Eco* 42:279-287). Otros estudios también han demostrado que una fertilización con P en bosques con altas tasas de deposición de N alivia la limitación por P, incrementando la concentración de N foliar y el crecimiento de los árboles (Blanes et al., 2008; *Actas de la II Reunión sobre Suelos Forestales* 87-92; Gradowski et al., 2008; *Tree Physiol* 28:173-185; Prietzel et al., 2008; *Europ J For Res* 127:43-61), lo que implica un aumento en su capacidad para retener N. Sin embargo, los resultados de algunos estudios han sugerido que la enmienda cálcica puede incrementar las tasas netas de nitrificación y así la lixiviación de nitrato debido a una mejora en el pH (Marschner et al., 1989; *Water Air Soil Poll* 48:45-57; Deboer et al., 1993; *Biol Fert Soils* 15:120-126; Brahmer, 1994; *For Ecol Manage* 68:47-60; Gundersen et al., 2006; *Environ Rev* 14(1):1-57).

CONCLUSIONES

El resultado de todos estos trabajos sugiere que el efecto de las diferentes prácticas de manejo depende de su intensidad y de las condiciones iniciales del bosque. Así, para un ecosistema méxico adaptado al fuego y sujeto a altas tasas de deposición de N, incendios periódicos prescritos de baja intensidad podrían mantener una carga de N constante a largo plazo. En ecosistemas forestales maduros con una alta densidad de árboles y con una baja tasa de regeneración y de crecimiento, un aclareo podría incrementar la retención de N por la vegetación tras el periodo de recuperación de la perturbación. Por último, en bosques donde el incremento de la disponibilidad de N induce una limitación por otros nutrientes como el P, una fertilización con estos nutrientes aumentaría la productividad y así la retención de N por la vegetación. Además esta práctica sería la menos agresiva sobre los ecosistemas forestales. Todas estas estrategias están centradas en incrementar la adsorción de N por la vegetación. Sin embargo, el suelo es el principal receptor de las entradas de N añadidas en los bosques templados. Por tanto, las futuras estrategias de manejo de ecosistemas saturados por N deberían ir encaminadas a incrementar también la inmovilización de N en el suelo. Además se debería de considerar si el incremento inicial de la lixiviación de nitrato tras el aclareo o tras los incendios prescritos, o la lixiviación de otros nutrientes tras la fertilización, podrían causar problemas de eutrofización y toxicidad en ecosistemas acuáticos.