

Tecnologías para mejorar la eficiencia de uso del nitrógeno en Chile

Rodrigo Ortega B.
raortega@puc.cl
Mauricio Molina R.
mamolina@puc.cl
Centro de Agricultura de Precisión
Departamento de Ciencias Vegetales

El Nitrógeno (N) es un elemento que normalmente se encuentra deficiente en la producción agrícola ya que el suelo, a través del proceso de mineralización de la materia orgánica, normalmente, no es capaz de suministrar el total de N requerido por los cultivos para alcanzar altos rendimientos. Este nutriente es fundamental en la mayoría de las explotaciones agrícolas, debido a su estrecha relación con el rendimiento y la calidad de los productos, y porque además representa una importante proporción de los costos de producción. En Chile se ha producido un notable incremento en el consumo de fertilizantes, especialmente, nitrogenados, utilizándose anualmente alrededor de 262.000 ton de N, la mayoría en forma de urea, las que aplicadas a la superficie de suelo utilizada intensivamente (alrededor de 1.700.000 ha) equivalen aproximadamente a 150 kg N·ha⁻¹, en promedio.

En una reciente encuesta hecha a diez productores de maíz de la VI región, se determinó que éstos aplicaban entre 300 y 720 kg N·ha⁻¹, mientras que su eficiencia de recuperación de N en el cultivo variaba entre 35 y 75 %. Estos resultados muestran los dos extremos del manejo de N en Chile: (1) una baja eficiencia de recuperación, que corresponde a la situación más frecuente en el país, y que indica que de cada 100 kg·ha⁻¹ de N aplicado, algunos productores recuperaban sólo 35 kg·ha⁻¹ en el cultivo, per-

diéndose los otros 65 kg·ha⁻¹, principalmente por lixiviación, contribuyendo a la contaminación difusa de las aguas subterráneas y superficiales y (2) una situación ideal, con una eficiencia de recuperación del N mayor al 70 %, que demuestra que bajo las condiciones nacionales y con un adecuado manejo agronómico, es posible obtener las mismas eficiencias obtenidas en países desarrollados.

En Chile, no existe un marco regulatorio respecto a los límites máximos de aplicación de fertilizantes nitrogenados según cultivo y tipo de suelo, existiendo sólo una norma de calidad de agua que establece el límite máximo de nitrógeno nítrico (N-NO₃⁻) en 10 partes por millón (ppm). Sin embargo, la firma de acuerdos de libre comercio, particularmente con Europa y Estados Unidos, seguramente implicará nuevas exigencias en cuanto a producción limpia, que obligada-

mente deberán ser cumplidas si se desea acceder a esos mercados.

Debido a lo anteriormente expuesto, se hace indispensable que los productores agrícolas adopten, en forma voluntaria, herramientas que permitan aumentar la eficiencia de recuperación del nitrógeno, y al mismo tiempo desarrollar una producción agrícola más eficiente, sustentable y amigable con el medio ambiente.

Existen medidas agronómicas y técnicas que permiten aumentar la eficiencia de uso de los fertilizantes nitrogenados, con las que se pueden obtener claros beneficios productivos y de tipo ambiental. En el presente artículo se discuten algunas de estas tecnologías, con énfasis en los nuevos productos fertilizantes disponibles.

Ciclo global del nitrógeno

Entender el comportamiento del

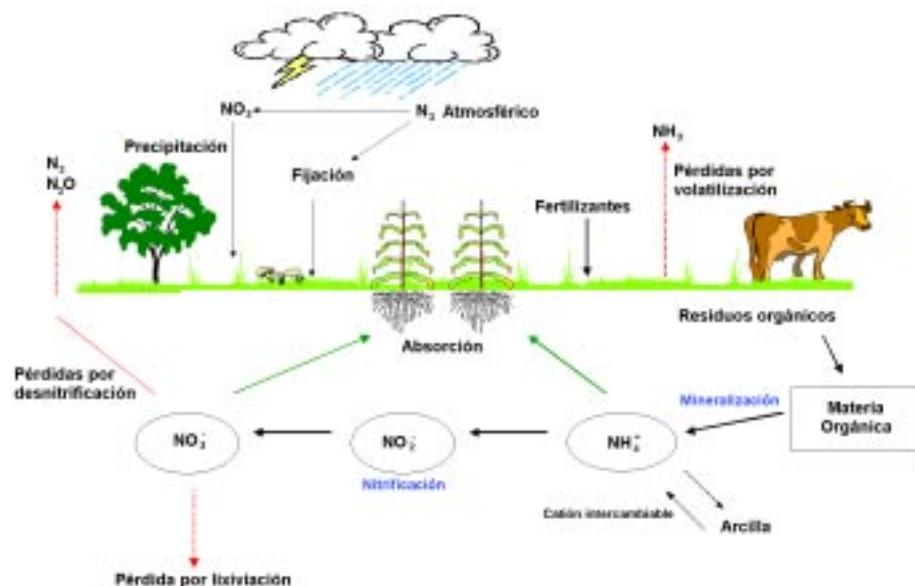


Figura 1. Ciclo del nitrógeno en el sistema suelo-planta-atmósfera

nitrógeno en el suelo es indispensable para maximizar la productividad agrícola y reducir el impacto de la fertilización en el ambiente. El ciclo del nitrógeno en el sistema suelo-planta-atmósfera incluye muchas transformaciones del N entre formas orgánicas e inorgánicas (Figura 1):

1. El N proveniente de los residuos de plantas y animales, y el que deriva de la atmósfera a través de descargas eléctricas y procesos de fijación industrial, ingresa al suelo.

2. El N₂ atmosférico también puede entrar al suelo a través de un proceso de fijación simbiótica (asociación planta-rizobio) y no simbiótica (otros microorganismos del suelo)

3. El N orgánico de los residuos es convertido a NH₄⁺ (amonio) por organismos del suelo. Este proceso se denomina *mineralización* del N. El NH₄⁺ puede quedar retenido por las arcillas del suelo o ser absorbido por las raíces de las plantas. El amonio también puede perderse hacia la atmósfera como NH₃ (amoníaco) a través de un proceso denominado *volatilización*.

4. Gran parte del NH₄⁺ se convierte en NO₂⁻ (nitrito) y rápidamente en NO₃⁻ (nitrato) por bacterias nitrificantes en un proceso llamado *nitrificación*.

5. Las formas de N disponibles corresponden a NH₄⁺ y NO₃⁻, los que son absorbidos por las plantas para la formación de aminoácidos y proteínas, principalmente, con las cuales se alimentan los humanos y animales.

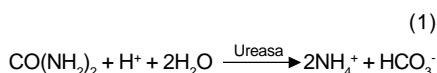
7. El NO₃⁻ (nitrato) es muy soluble en agua y es susceptible a per-

derse por lixiviación en las aguas de percolación, fuera del alcance de las raíces.

8. En condiciones de anaerobiosis (falta de O₂), el NO₃⁻ es convertido por bacterias desnitrificantes a N₂ y óxidos de nitrógeno (N₂O y NO), productos volátiles que se pierden hacia la atmósfera.

Las cantidades de NH₄⁺ y NO₃⁻ disponibles para las plantas dependen principalmente de las dosis de N aplicadas como fertilizante, de la mineralización del N orgánico en el suelo y de las pérdidas a que éstas formas de N están sujetas.

Normalmente, los fertilizantes nitrogenados amoniacales y nítricos están también sometidos a transformaciones por efecto de los organismos presentes en el suelo. Así por ejemplo, la urea cuando es aplicada al suelo es hidrolizada a NH₄⁺ por la enzima *ureasa*, presente en numerosos microorganismos del suelo. La reacción de la urea en el suelo se presenta en la Ecuación 1:



El amonio, ya sea proveniente del fertilizante nitrogenado (urea, sulfato de amonio, etc.) o de la mineralización de la materia orgánica, se oxida a nitrato (NO₃⁻), siendo este el producto final de todas las fuentes de N en el suelo. Algunas fuentes de nitrógeno, como el nitrato de sodio, aportan su nitrógeno directamente como NO₃⁻.

Por problemas de manejo agronómico, el NO₃⁻ puede perderse por escorrentía superficial y lixiviación, pudiendo contaminar las aguas superficiales o subterráneas. Existen evidencias que el consumo de agua con altas concentraciones de nitratos pue-

de producir metahemoglobinemia (síndrome del bebé azul, por falta de oxígeno en la sangre), cánceres gástricos y malformaciones de nacimiento (efectos teratogénicos).

Eficiencia de uso del nitrógeno

La eficiencia de uso del nitrógeno (EUN), que puede expresarse como la eficiencia de recuperación de N del fertilizante (ERNF), corresponde a la proporción del N aplicado que es recuperada en el cultivo, descontando el aporte de N que hace el suelo. El tipo de fertilizante, las condiciones climáticas, la disponibilidad de agua y la época de aplicación, entre otras variables, afectan la eficiencia de uso del nitrógeno. En Chile, se puede considerar que, en promedio, la ERNF alcanza valores de 40 a 50 %, con un amplio rango de variación que va desde un 30 a un 80% (Cuadro 1).

Tecnologías para mejorar la eficiencia de uso del nitrógeno

Existen numerosos manejos agronómicos y tecnologías de fertilización que permiten aumentar la eficiencia de recuperación de N en los cultivos. Algunos de ellos son tan antiguos como la agronomía, mientras que otros son mucho más recientes e involucran un mayor desarrollo tecnológico. A continuación se presentan algunos de ellos:

Parcialización de la dosis de N

La época de aplicación del fertilizante es uno de los factores que más afecta la eficiencia de uso del N. Aplicaciones de altas dosis de N en períodos en que el cultivo tiene una baja demanda, dejan más N susceptible a pérdidas. La aplicación del fertilizante nitrogenado debe efectuarse en parcialidades, lo más cerca posible al período de utilización por el cultivo, en las dosis requeridas en cada oportunidad. En la Figura 2 queda de manifiesto que, en cereales, al realizar aplicaciones de N parcializadas se mejora la eficiencia de absorción de N y se reduce el N susceptible a lixiviar-

Cuadro 1
Eficiencia de recuperación típica del N aplicado en cultivos

Cultivo	Rendimiento (Ton MS-ha ⁻¹)	N absorbido (Kg-ha ⁻¹)	Dosis de N aplicada (Kg-ha ⁻¹)	ERNF (%)
Trigo de primavera	6	130	200	40
Maíz de ensilaje	23	230	480	27
Remolacha	16	200	240	41

Fuente: Ortega, 2000, no publicado.

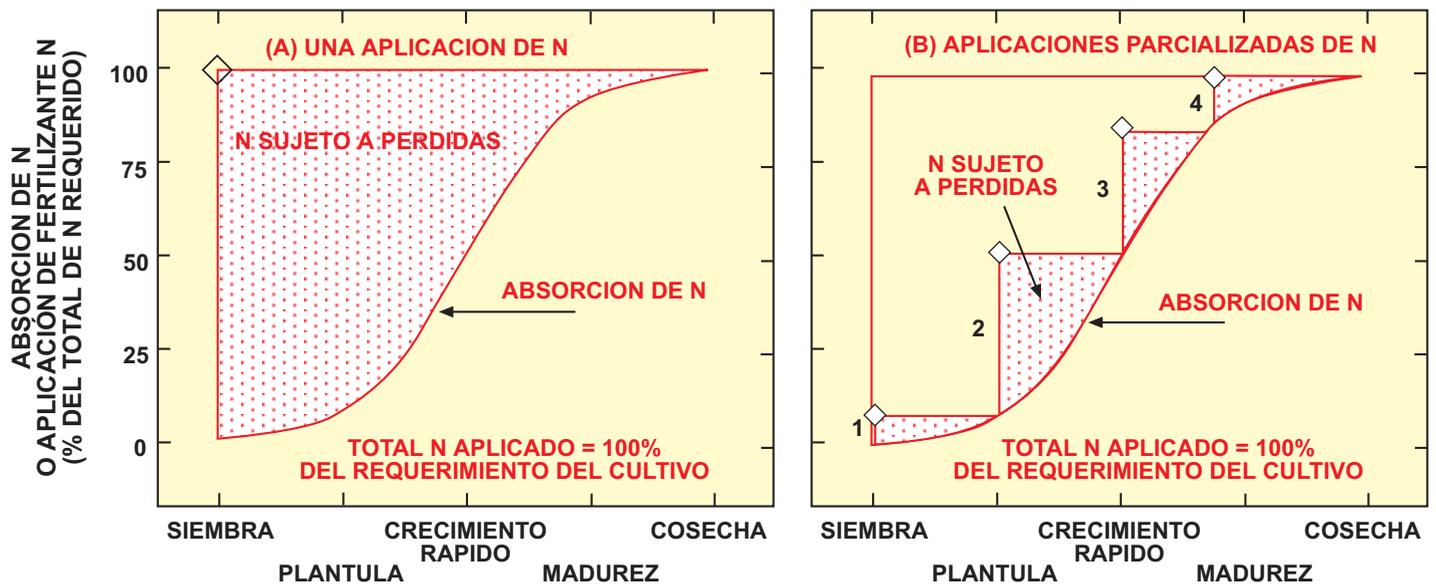


Figura 2. Nitrógeno sujeto a pérdidas bajo dos manejos en cereales: A) una sola aplicación de N al momento de siembra y B) cuatro parcialidades de N (adaptado de Waskon, 1994. Best Management Practices (BMPs) for Nitrogen Fertilization. Colorado State University. Cooperative Extension. 12p.)

ción y otras pérdidas. En general, las aplicaciones de N deben seguir la curva de demanda del cultivo. A modo de ejemplo, en la Figura 3, se presenta las curvas de absorción de N acumulada y diaria en tabaco Burley, en la VI región. En este caso, la curva diaria indica que la máxima demanda de N se alcanza aproximadamente a los 70 días después del trasplante y es de 3,5 kg·ha⁻¹ diarios. Esto significa que en ese período debería existir suficiente nitrógeno en el suelo para satisfacer las necesidades del cultivo. Sin duda, la fertirrigación es la forma más eficiente de parcialización de los fertilizantes. Sin embargo, en el caso

de cultivos anuales extensivos, la aplicación parcializada del N en dos o tres oportunidades durante la temporada, considerando las curvas de demanda de cada especie, son suficientes para mejorar significativamente la EUN.

Forma de aplicación y riego

La forma de aplicación del fertilizante nitrogenado es también un factor que debe manejarse apropiadamente. Las aplicaciones de N incorporadas al suelo están menos sujetas a pérdidas por escurrimiento y volatilización. Así, por ejemplo las aplica-

ciones de N incorporado en banda permiten localizar el fertilizante más cerca de las raíces de las plantas, lográndose una absorción más rápida, minimizando las pérdidas.

En términos generales, la aplicación de fertilizantes en cultivos bajo riego tradicional tienen un alto potencial para causar contaminación de las aguas subterráneas debido a la lixiviación del nitrato provocada por los elevados volúmenes de agua aplicados. Incrementando la eficiencia y uniformidad del riego se reduce la cantidad de agua drenada a través del suelo y se disminuye la cantidad de NO₃⁻ y de otros contaminantes lixiviados. Tal

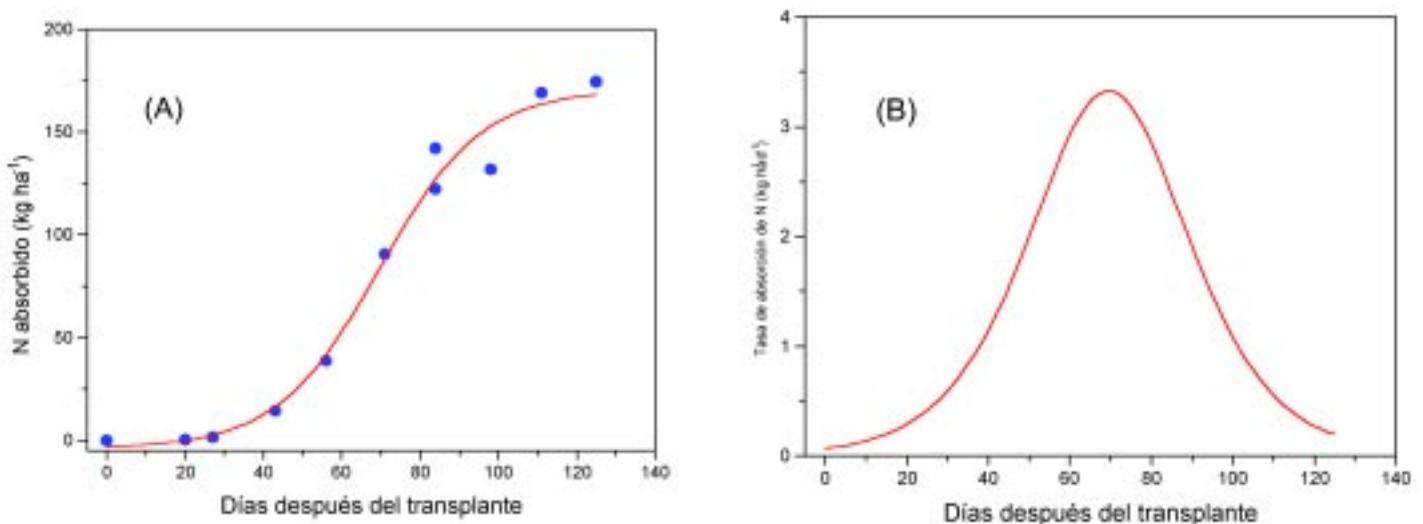


Figura 3. Curva de absorción de nitrógeno en tabaco. A) absorción acumulada y B) absorción diaria. San Fernando, VI región (Ortega y otros, 2002, no publicado).

como se mencionó anteriormente, la forma más eficiente de aplicar nutrientes es a través del fertirriego, con el cual se alcanzan eficiencias de recuperación del N superiores al 80 %.

Herramientas de agricultura de precisión

El manejo sitio-específico de nitrógeno a través de herramientas de agricultura de precisión, permite aumentar la eficiencia de uso del nitrógeno, contribuyendo además a disminuir el impacto ambiental. El suelo es muy variable en términos de su contenido y actividad de materia orgánica, por lo tanto el nitrógeno disponible para las plantas proveniente de la mineralización del N orgánico también muestra una elevada variabilidad. En la Figura 4 se presenta la variabilidad espacial del nitrógeno mineralizado medido entre los meses de Octubre y Diciembre, en un suelo volcánico plano, bajo trigo de primavera, en la provincia de Ñuble. Se observa que dentro del potrero, de dos hectáreas, existen sectores que tienen mayor potencial de mineralización de nitrógeno que otros, por lo que eventualmente requerirían menores dosis de nitrógeno.

En la actualidad, existen numerosas herramientas que permiten tomar decisiones tiempo y sitio específicas en cuanto a las aplicación de fer-

tilizantes nitrogenados, como son los sistemas portátiles para análisis de suelo “in situ”, los medidores de clorofila, sensores remotos, etc. Algunas de estas tecnologías han sido discutidas en detalle en números anteriores de la revista Agronomía y Forestal UC.

Fertilizantes que regulan la disponibilidad del N

El desarrollo fertilizantes nitrogenados que permitan aumentar la ERNF y reducir el impacto ambiental ha sido la ambición de varias compañías desde hace años. Lo ideal sería contar con fuentes que permitan un aporte de N extendido en el tiempo, evitándose la necesidad de hacer aplicaciones repetidas, y que la liberación de N sea en concordancia con las necesidades de las plantas, es decir que coincida con la curva de absorción de N. Con este enfoque se han desarrollado numerosos productos fertilizantes, los cuales se pueden agrupar en:

1. Compuestos de baja solubilidad:

En este grupo se encuentran compuestos químicos de poca solubilidad en agua y/o en la solución del suelo. La tasa de liberación del N hacia la solución del suelo está controlada por la solubilidad, la actividad microbológica y la hidrólisis química que ocurre en el suelo. Los productos más

conocidos son los compuestos del tipo Urea-Formaldehídos. Existen otros productos como Crotoniliden Diurea (CDU) e Isobutiliden Diurea (IBDU), los cuales también contienen una parte de su N insoluble, pero son menos dependientes de la actividad microbiana.

Otras fuentes de nitrógeno son los fertilizantes recubiertos, tal como la urea recubierta con azufre. Este último fertilizante es de liberación controlada y consiste en una partícula de urea envuelta en una cobertura de azufre (S). La tasa de liberación de N se puede ajustar cambiando la cantidad de S usada como cobertura. La cubierta de S debe ser oxidada por los microorganismos del suelo para que la urea quede expuesta y sufra la subsecuente hidrólisis necesaria para hacer disponible el N.

En este grupo, existen fertilizantes de última generación que están conformados por una membrana semipermeable que encapsula el N soluble y otros nutrientes. El agua pasa a través de la membrana aumentando la presión interna, así la molécula se expande y permite la salida de los nutrientes. Según el grosor de la membrana se puede controlar la tasa de entrega de los nutrientes hacia la solución del suelo.

2. Compuestos solubles que requieren descomposición:

Corresponden a productos de liberación controlada. Su estructura está formada por un anillo muy cerrado y fuertes uniones C-N por lo que la liberación de N es lenta. Se usan predominantemente para aplicaciones foliares, exhibiendo una buena absorción, sin causar toxicidad en los tejidos de la planta. Los compuestos más conocidos dentro de este grupo, corresponden a las Triazonas.

3. Inhibidores de la Ureasa:

Este tipo de compuestos controla la hidrólisis de la urea en el suelo inhibiendo la actividad de la enzima ureasa (Ecuación 1). Para que un compuesto de este tipo sea considerado efectivo, debe reunir las siguientes características:

a) Efectivo a bajas concentraciones

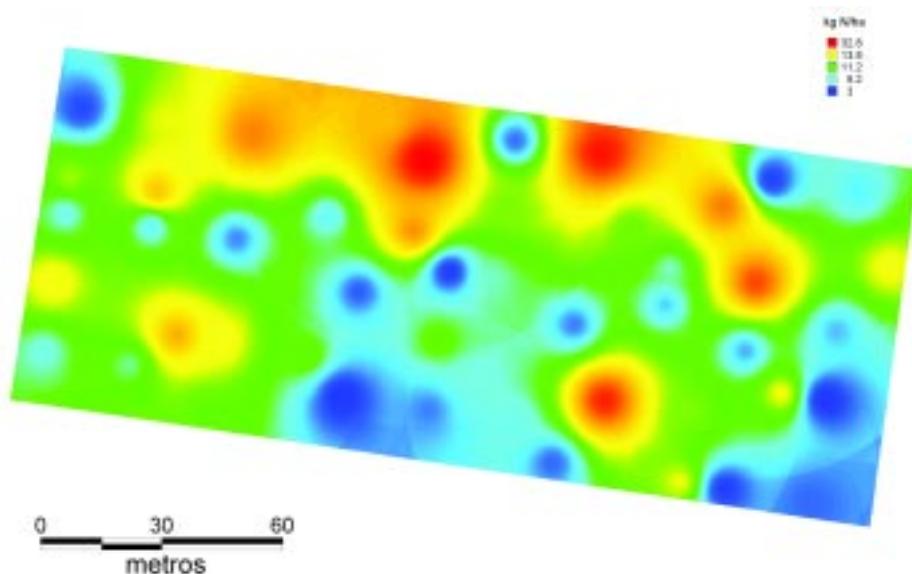


Figura 4. Variabilidad espacial del nitrógeno mineralizado entre Octubre y Diciembre en un suelo volcánico plano, bajo cultivo de trigo de primavera, en la provincia de Ñuble. Fuente: Ortega y Mardonez, 1999. no publicado.

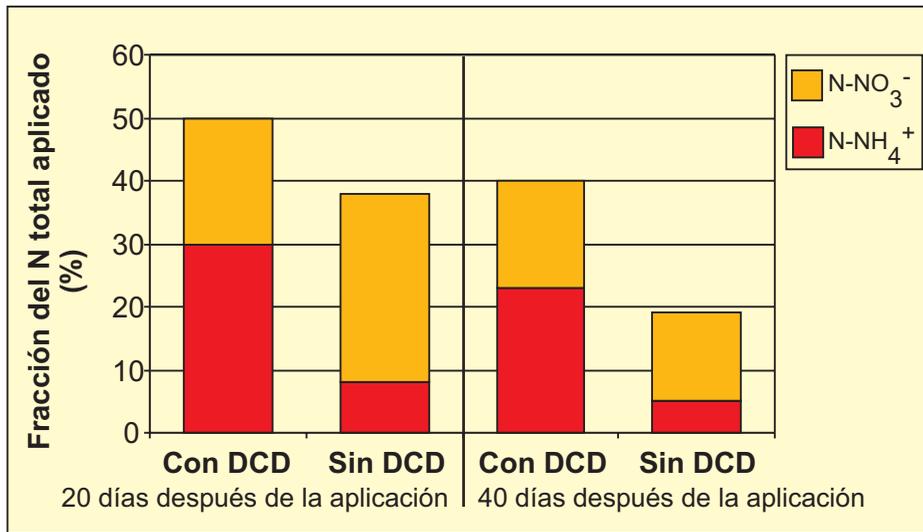


Figura 5. Efecto de la diciandiamida (DCD) sobre el contenido de N en los primeros 15 cm de suelo, expresado como porcentaje del N total aplicado, en dos fechas de evaluación. (Adaptado de Serna et al., 1994. Soil Sci. Soc. Am. J. 58:1817-1827).

b) Relativamente no tóxico para las diferentes formas de vida en el suelo

c) Buena relación beneficio/costo

d) Compatible con la urea

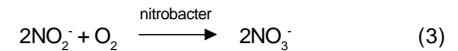
e) Debe ser tan móvil en el suelo como la urea.

Existen varios tipos de inhibidores de la ureasa, que pueden clasificarse según su modo de acción: Estos incluyen, iones metálicos, quinonas, ureas sustituidas, etc. Otros compuestos, de más reciente desarrollo son la n-butil triamida tiosfórica y el tiosul-

fato de amonio (ATS). Lamentablemente, los resultados de campo con este tipo de compuestos han sido inconsistentes.

4. Inhibidores de la nitrificación:

Como se mencionó anteriormente, parte del NH_4^+ del suelo se convierte a NO_3^- en un proceso llamado nitrificación. Este es un proceso aeróbico que ocurre en dos pasos, debido a la actividad de dos grupos de bacterias autotróficas presentes en el suelo y que en conjunto se denominan bacterias nitrificantes: a) *Nitrosomonas*, que transforman el amonio a nitrito, y b) *Nitrobacter*, que transforman el nitrito a nitrato (Ecuaciones 2 y 3).



En la mayoría de los suelos bien drenados la tasa de conversión de NO_2^- a NO_3^- es mayor que la conversión de NH_4^+ a NO_2^- . Como resultado, el NO_2^- generalmente no se acumula en el suelo. Cabe señalar que el NO_2^- es tóxico para las plantas.

Existen ciertas sustancias que son tóxicas para las bacterias nitrificantes que, cuando son agregadas al suelo, inhiben temporalmente la nitrificación. En los últimos 30 años, se han evaluado numerosos compuestos en términos de su capacidad para inhibir este proceso y los beneficios que pueden ofrecer en la eficiencia de uso del N, al mantener el NH_4^+ proveniente del fertilizante por más tiempo en el suelo y disminuir las pérdidas de NO_3^- por lixiviación. Idealmente un inhibidor de la nitrificación (IN) debería cumplir con los siguientes requisitos:

a) No ser tóxico para las plantas y otros organismos.

b) Bloquear la conversión de NH_4^+ en NO_2^- inhibiendo específicamente la actividad o el crecimiento de *Nitrosomonas*.

c) No interferir en la conversión del NO_2^- a NO_3^- por *Nitrobacter*.

d) Moverse junto con el fertilizante para que se pueda distribuir uniformemente en el suelo.

e) Mantener su acción inhibitoria por períodos prolongados de tiempo (semanas a meses).

f) Ser relativamente económico.

Entre los IN más conocidos se encuentran el 2-cloro-6-(triclorometil) piridina (Nitrapirina), la diciandiamida (DCD), la 2-etinilpiridina y el etridiazol. Estos compuestos deben mezclarse en bajas cantidades con las fuentes fertilizantes amoniacales antes de su aplicación en el campo. Otros compuestos, como el 3,4-dimetilpirazolfosfato (DMPP) son de más reciente desarrollo, existiendo en la actualidad fertilizantes que contienen el IN en su formulación, listos para su aplicación en el campo.

Numerosos trabajos han demos-

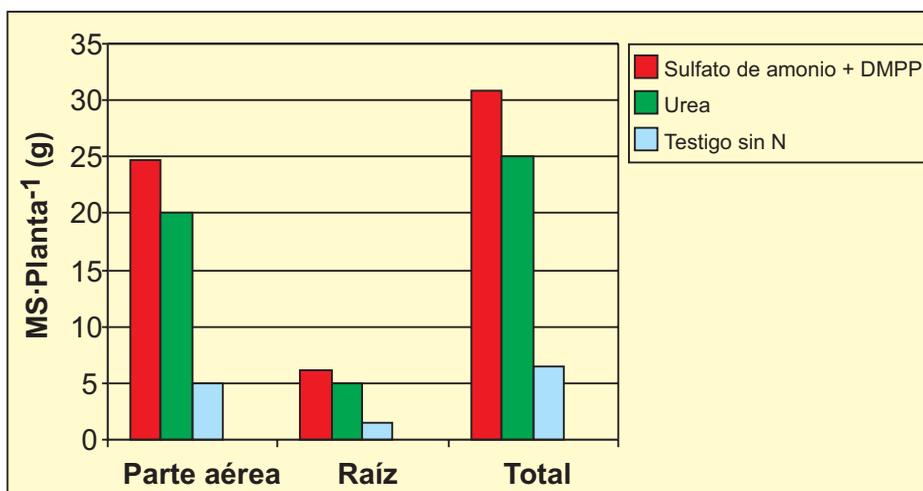


Figura 6. Efecto del 3,4-dimetilpirazolfosfato (DMPP) en la producción de materia seca (MS) de plantas de brócoli cultivadas en invernadero.

trado que si el suelo y las condiciones ambientales son favorables para la pérdida de N por lixiviación y desnitrificación, el uso de los IN produce un aumento en la EUN, al mantenerse el NH_4^+ por más tiempo en el suelo (Figura 5). En general, los suelos de textura gruesa (arenosos) y de baja materia orgánica son los que mejor responden a la aplicación de los IN.

Además de los beneficios en la conservación de N en el suelo, los IN han demostrado tener un efecto positivo en los rendimientos de algunos cultivos como avena, trigo, maíz, arroz y remolacha. En la Figura 6 se muestran los resultados de un estudio de invernadero realizado en brócoli, en el Departamento de Ciencias Vegetales de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile. En él se compararon dos fuentes nitrogenadas, aplicadas en una dosis de $150 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$: 1) urea aplicada en dos parcialidades, y 2) sulfato de amonio + DMPP aplicado en una parcialidad al momento del trasplante. En este caso, en un

suelo de drenaje rápido, el fertilizante con IN produjo el mayor rendimiento en materia seca, tanto de hojas y tallos, raíces y total en comparación con la urea. Este resultado se puede explicar debido a una mayor disponibilidad de N en el suelo, en el período de máxima demanda, cosa que no fue posible lograr completamente con la parcialización del N, especialmente en un cultivo de ciclo corto como es el brócoli. La ERNF obtenida en ambos tratamientos fue estadísticamente similar, al igual que las pérdidas de N por lixiviación. Los resultados de este estudio son de carácter preliminar y deben ser validados a nivel de campo. La gran ventaja que ofrecería la aplicación de un fertilizante nitrogenado con IN, tal como DMPP, repercute en el manejo, el cual se reduciría a sólo una aplicación de N. Sin embargo, los mayores beneficios ambientales, se lograrían claramente utilizando una fuente con inhibidor de la nitrificación, aplicada en varias parcialidades durante la temporada de crecimiento.

Comentarios finales

Un aumento en la eficiencia de uso del nitrógeno lleva consigo a mejoras en la productividad y reduce el posible impacto ambiental causado por los fertilizantes nitrogenados. Existen varios manejos agronómicos que se pueden implementar para mejorar la EUN. La mayoría de estos manejos tienen como objetivo disminuir al mínimo las pérdidas del N por lixiviación y mantener el mayor tiempo el N disponible en el suelo para que sea absorbido por las plantas. Muchas de las formas de aumentar la EUN no son nuevas y son de fácil implementación a nivel productivo. Otras medidas requieren de mayor inversión y tecnología, pero estos costos se pueden solventar debido al aumento de rentabilidad asociada a una mayor EUN.

La elección de las herramientas necesarias para mejorar la eficiencia, y la combinación de ellas, dependerá del cultivo y de las condiciones agroecológicas presentes. **FAF**

No más pérdidas de nitrógeno en siembras otoñales e invernales

ENTEC de **COMPO** le asegura una disponibilidad continua y estable de Nitrógeno por 2 meses sin importar cuanto riegue o llueva.



Precisión
Alemana
en Nutrición
Vegetal

ENTEC

es la línea de fertilizantes Nitrogenados **COMPO** con inhibidor de la Nitrificación que reduce la lixiviación por lluvias o riego. Está especialmente recomendado en trigos invernales, remolachas de otoño, hortalizas de invierno.

Su amigo **COMPO**

Consultas Técnicas
en regiones:
III y IV región: 934 20555
V y RM: 934 45246
VI a VIII Norte: 932 88780
VIII Sur a X: 944 04920

ENTEC es marca registrada
COMPO ALEMANIA,
COMPO AGRO CHILE Ltda.
Carrascal 3851 Quinta Normal
Santiago Fono: 640 7245
Fax: 640 7248

www.compo.cl