

INHIBIDORES PARA OPTIMIZAR *el uso del nitrógeno en la agricultura*

El uso ineficiente del nitrógeno en la agricultura presenta un desafío ambiental significativo. Este artículo se centra en las pérdidas de nitrógeno en forma gaseosa, destacando cómo los inhibidores enzimáticos pueden mitigar este problema. Además, se explora un estudio de campo que revela la eficacia de un doble inhibidor (de la ureasa y la nitrificación), ofreciendo soluciones para mejorar la sostenibilidad de la agricultura.

MARIO CORROCHANO-MONSALVE¹, ISRAEL CARRASCO², ÁNGEL MARESMA²

¹ Instituto multidisciplinar para el estudio del medio "Ramon Margalef", Universidad de Alicante

² Departamento de I+D de EuroChem Agro Iberia, S.L.

Una parte importante del fertilizante que se aplica en la agricultura no es realmente aprovechada por los cultivos y acaba impactando sobre el medio ambiente. Cuando aplicamos fertilizante, éste es convertido desde su forma química original (ureica, amoniacal o nítrica) a otras moléculas por la acción de diferentes organismos que habitan el suelo. La transformación del nitrógeno en el suelo da lugar a formas nitrogenadas que, por su naturaleza gaseosa (como en el caso de los óxidos de nitrógeno) o su baja adherencia a las partículas del suelo (como en el caso de los nitratos) se pierden al medioambiente.

En el presente artículo se evalúan los procesos de pérdidas por volatilización de amoníaco (NH_3) y por emisión en forma de óxido nitroso (N_2O). En la primera de ellas, la relevancia radica en la magnitud de las pérdidas que se dan por esta vía. En la segunda, en el efecto invernadero que produce la molécula de N_2O .

El nitrógeno del fertilizante es transformado en el suelo por la acción de diversas enzimas

Pérdidas por volatilización de amoníaco (NH_3)

A nivel global, la urea es la forma más extendida de aplicación del nitrógeno en la agricultura, debido a su bajo coste y accesibilidad. Según la FAO, alrededor del 70% del total de nitrógeno aplicado como fertilizante se da en forma de urea. Paradójicamente, la fertilización con urea es altamente ineficiente. Esto es debido a que una gran proporción del nitrógeno se pierde en forma de amoníaco (NH_3),

el cual es volatilizado como consecuencia de la acción de la enzima ureasa, naturalmente presente en el suelo. En general, la volatilización del NH_3 se ve favorecida en zonas con baja precipitación (lo cual ralentiza la infiltración de la urea en el suelo) y en suelos con pH alcalino. Bajo condiciones propensas, las pérdidas por esta vía pueden superar el 30% del nitrógeno aplicado (Silva *et al.*, 2017; Cantarella *et al.*, 2018).

La volatilización del amoníaco no solo tiene importantes repercusiones económicas para el agricultor (por la pérdida de nitrógeno), sino que también produce un coste ambiental y de salud debido a que es un precursor de compuestos contaminantes. Las cifras de este coste se estima que se encuentran entre los 16-106 mil millones de € para el conjunto de la Unión Europea (Van Grinsven *et al.*, 2013).

Pérdidas por emisiones de óxido nitroso (N_2O)

Además de volatilizarse en forma de amoníaco, los fertilizantes con base



ureica o amoniacal también liberan nitrógeno al medio en forma de otros gases nitrogenados. Estos gases nitrogenados son el producto de la actividad de microorganismos del suelo (arqueas, bacterias y hongos) que son los responsables del ciclo del nitrógeno. Primeramente, y gracias a la acción de las arqueas y bacterias nitrificantes, el nitrógeno es convertido desde su forma amoniacal (NH_3) hasta nitrato (NO_3^-) (**Figura 1**). Posteriormente, este nitrato es transformado por bacterias y hongos desnitrificantes hasta diferentes compuestos gaseosos, siendo el producto resultante más relevante el óxido nitroso (N_2O). Es de destacar, además, que el óxido nitroso puede formarse también como subproducto de la nitrificación. Agrosistemas con baja humedad favorecen la acción de la población nitrificante, mientras que suelos húmedos promueven la actividad desnitrificante. Es durante este ciclo cuando el nitrógeno corre el riesgo de escapar al medio. Esta pérdida puede darse en forma de lixiviados de nitratos (cuando éste se ha acumulado en el suelo y se dan riegos o precipitaciones de cierta magnitud) debido a que la carga negativa de la molécula de nitrato (NO_3^-) hace que no se adhiera a las partículas del suelo

(típicamente cargadas también negativamente); o en forma de gases. Si bien la magnitud de estas emisiones gaseosas es mucho menos relevante en cuanto a la cantidad de nitrógeno perdida (si lo comparamos con las pérdidas en forma de amoníaco), la pérdida de nitrógeno en forma de gases como el óxido nitroso tiene graves consecuencias ambientales. La razón de este impacto ambiental se debe a que el óxido nitroso es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento casi 300 veces mayor que el del dióxido de carbono (CO_2).

Estudio de la aplicación en campo de un doble inhibidor

Investigadores de la Universidad del País Vasco, en colaboración con EuroChem, llevaron a cabo un ensayo de campo para determinar la capacidad de un doble inhibidor (ureasa [NBPT] + nitrificación [DMPSA]) para reducir las pérdidas de nitrógeno en comparación con inhibidores individuales y fertilizantes sin inhibidores. El estudio se desarrolló en un ensayo de colza situado en Arkaute (Vitoria). El área experimental se dividió en dos manejos, laboreo convencional

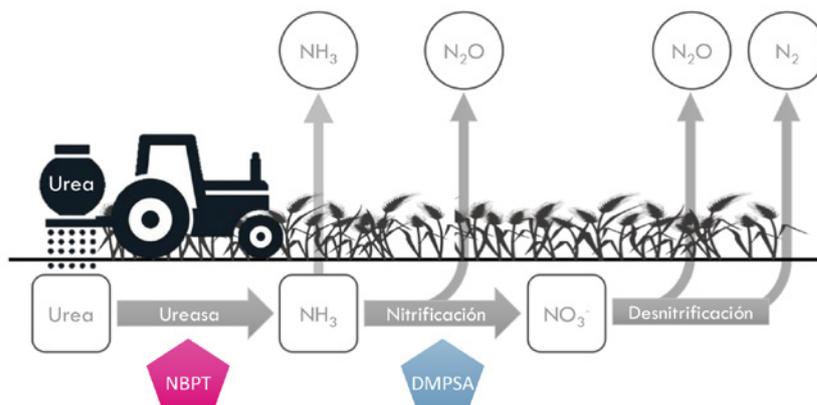


FIGURA 1
Esquema simplificado del ciclo del nitrógeno en un suelo agrícola y emisiones de gases nitrogenados derivados de las reacciones enzimáticas que transforman el nitrógeno. NH_3 : Amoníaco, N_2O : Óxido nitroso, NO_3^- : Nitrato, N_2 : Nitrógeno molecular, NBPT: Inhibidor de la ureasa, DMPSA: Inhibidor de la nitrificación.

y siembra directa, con el fin de ver el efecto de diferentes prácticas en las pérdidas de nitrógeno y la eficiencia de los inhibidores para evitarlas. El fertilizante ureico fue aplicado en dos aportaciones en forma granulada, combinado con el inhibidor de la nitrificación NBPT y con el inhibidor de la nitrificación, DMPSA (Tabla 1). Tras la fertilización, se realizaron mediciones de volatilización de amoníaco (NH₃), emisiones de óxido nitroso (N₂O) y contenidos de nitrógeno mineral en el suelo, entre otros.

Resultados

Las condiciones meteorológicas durante el ensayo con días soleados de gran amplitud térmica (temperaturas alrededor de 0°C durante la noche y superiores a 20°C durante el día), precipitaciones muy escasas (9,5 mm tras la primera fertilización y 23,1 mm tras la segunda) y vientos constantes, favorecieron la volatilización de amoníaco. En el sistema de laboreo convencional, más del 30% del nitrógeno se perdió cuando fue aplicado sin ningún tipo de inhibidor, mientras que la pérdida alcanzó el 36% en el sistema de siembra directa. Esto supuso que, respectivamente, hasta 51 y 55 kg N/ha se volatilizaron a la atmósfera (Figura 2), resultando en contenidos medios de nitrógeno mineral total en el suelo de 52 y 47 kg N/ha en el periodo posterior a las fertilizaciones. La mayor volatilización de urea en el sistema de siembra directa podría explicarse por la mayor compactación del suelo (lo que dificulta la infiltración de la urea) y los residuos vegetales dejados en la superficie tras la campaña anterior (los cuales suelen presentar actividad de enzima ureasa, Malhi *et al.*, 2001). La aplicación del fertilizante junto con inhibidor de la ureasa (NBPT) fue capaz de reducir las pérdidas del 34% al 13% en el laboreo convencional, y del 36% al 18% en el sistema de siembra directa. Es decir, las pérdidas por volatilización de amoníaco se redujeron a menos de la mitad (Figura 2); observándose una mayor eficacia del inhibidor en los periodos en que más urea se estaba

¿CÓMO PUEDEN REDUCIRSE LAS PÉRDIDAS DE NITRÓGENO EN LA AGRICULTURA?

La forma más sencilla de reducir la volatilización del amoníaco es mediante la incorporación de la urea al suelo, pero las condiciones del cultivo lo imposibilitan en muchas ocasiones. Como alternativa, es posible reducir la volatilización aplicando compuestos denominados inhibidores de la ureasa (compuestos que ralentizan la transformación a nitrógeno amoniacal). Sin embargo, esta práctica no evita la posible lixiviación de nitratos, ni las emisiones de óxido nitroso, ya que los microorganismos nitrificantes y desnitrificantes no se ven directamente afectados, por lo que pueden seguir transformando el nitrógeno en sus diferentes formas.

Existen otros compuestos que sí son capaces de reducir el riesgo de pérdidas por lixiviación y la emisión de óxido nitroso: son los llamados inhibidores de la nitrificación. Estos compuestos son capaces de ralentizar la conversión del nitrógeno amoniacal a nitrato en el suelo, aumentando la probabilidad de que el cultivo absorba el nitrógeno en vez de perderse al medio. Al contrario de lo que ocurría en el caso anterior, estos compuestos no evitan la volatilización en forma de amoníaco.

Aunque la efectividad de estas moléculas inhibitoras puede variar dependiendo de las condiciones edafoclimáticas; análisis previos indican que los inhibidores de la ureasa son capaces de reducir la pérdida de amoníaco incluso a la mitad (Abalos *et al.*, 2012; Lam *et al.*, 2019). En el caso de los inhibidores de la nitrificación, estos pueden llegar a evitar por completo el incremento de emisiones de óxido nitroso derivadas de la aplicación del fertilizante (Corrochano-Monsalve *et al.*, 2020; Recio *et al.*, 2020). Para intentar lograr un efecto conjunto y minimizar el riesgo de fugas de nitrógeno, que conlleva importantes consecuencias económicas, ambientales y de salud, se han desarrollado inhibidores dobles, que combinan ambos tipos de inhibidores (de la ureasa y de la nitrificación).

volatilizando (lo cual sugiere que la eficiencia del inhibidor de la ureasa se incrementa cuantas más propenso sea el sistema a perder nitrógeno). Tal y como se esperaba, este inhibidor, sin embargo, no tuvo ningún efecto en las pérdidas en forma de óxido nitroso. Por el contrario, la aplicación de fertilizante con inhibidor de la ni-

trificación, no redujo las pérdidas por volatilización de amoníaco, pero sí fue capaz de reducir las emisiones de N₂O en un 36% y 47% en los sistemas de laboreo convencional y de siembra directa, respectivamente. Por tanto, la aplicación del fertilizante con un solo tipo de inhibidor fue capaz de atajar parte del problema de la

TABLA 1

Tratamientos aplicados, dosis de fertilizante y momento de aplicación. Los tratamientos fueron aplicados tanto en condiciones de laboreo convencional como de siembra directa

TRATAMIENTO	DOSIS (kg N /ha)	
	Inicio ahijado	Inflorescencias secundarias
No fertilizado	0	0
Urea	100	50
Urea + NBTP + DMPSA	100	50
Urea + NBTP	100	50
Urea + DMPSA	100	50

NBTP: Inhibidor de la ureasa; DMPSA: Inhibidor de la nitrificación.

Las pérdidas de nitrógeno afectan negativamente al medioambiente, a la economía y a la salud

pérdida del nitrógeno, pero no completamente. El inhibidor de la ureasa (NBPT) fue altamente eficaz para reducir la volatilización de amoníaco, pero no para evitar la emisión de óxido nitroso. Por el contrario, el inhibidor de la nitrificación (DMPSA) fue capaz de reducir la emisión de óxido nitroso, pero no evitó las pérdidas por volatilización de amoníaco. Sin embargo, la aplicación de un doble inhibidor (NBPT + DMPSA) sí se mostró como una herramienta eficaz para conseguir una reducción de las pérdidas de nitrógeno de la fertilización más completa, tanto en forma de amoníaco como de óxido nitroso. El doble inhibidor (NBPT + DMPSA) redujo las pérdidas de nitrógeno a menos de la mitad en ambos sistemas de manejo del suelo, y disminuyó la emisión de N_2O entre un 22% y un 45%.

En términos de impacto ambiental del agrosistema, medido a través del índice de Potencial de Calentamiento Global (índice basado en la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos) la elección del manejo del suelo y del tipo de fertilizante fueron factores diferenciales. De esta manera, la opción menos sostenible fue la realización de una siembra directa con la aplicación de urea sin inhibidores. Por el contrario, la opción más sostenible, basada en los resultados de este trabajo, fue la combinación de un sistema de laboreo convencional junto con la aplicación de un doble inhibidor. A través de esta estrategia, se consiguió incluso mantener unos índices de Potencial de Calentamiento Global no superiores a los de los tratamientos sin fertilizar.

PÉRDIDAS POR VOLATILIZACIÓN DE AMONIACO (kg NH_3 -N/ha)

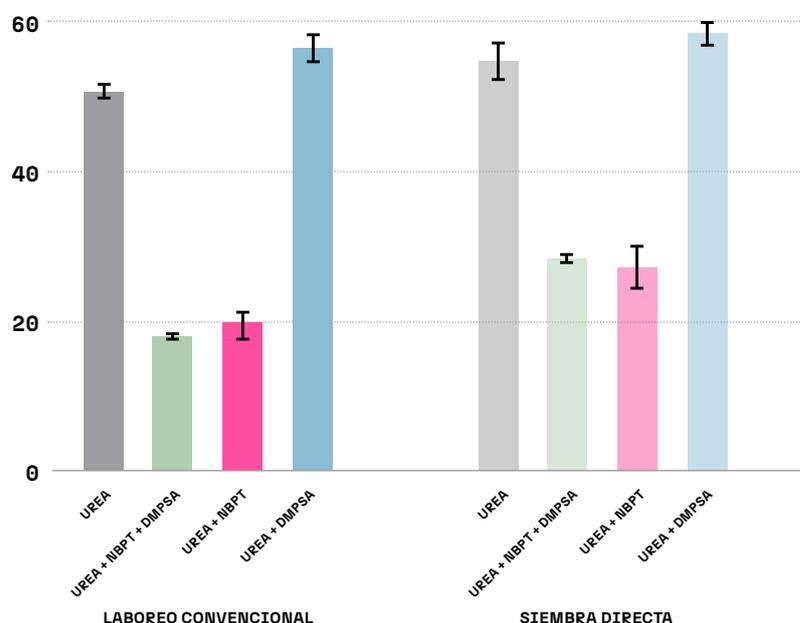


FIGURA 2

Pérdidas totales de nitrógeno por volatilización de amoníaco (NH_3). NBPT: Inhibidor de la ureasa; DMPSA: Inhibidor de la nitrificación.

Conclusiones

La fertilización con urea puede dar lugar a pérdidas de nitrógeno muy elevadas, que implican importantes daños ambientales, de salud y económicos. En este ensayo, más del 30% del nitrógeno se perdió en forma de amoníaco (NH_3) volatilizado y por emisiones de óxido nitroso (N_2O). La aplicación de inhibidores de ureasa (NBPT) o de la nitrificación (DMPSA) de forma individual solo evitó parte del problema. Sin embargo, la utilización de un doble inhibidor (NBPT + DMPSA) fue capaz de alcanzar una mitigación más completa, ralentizando la actividad ureasa y la nitrificación, y presentándose como una solución de futuro para avanzar hacia una fertilización nitrogenada más eficiente. Si bien debe tenerse en cuenta que estos resultados se dieron en las condiciones específicas de este ensayo y deben ser testados en rangos diversos, este tratamiento consiguió

mejorar notablemente la sostenibilidad del sistema.

Para más información, puede consultarse el artículo científico publicado por Corrochano-Monsalve et al. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125701>

Agradecimientos

Al Ministerio de Ciencia e Innovación por la ayuda Juan de la Cierva (JDC2022-048845-I) concedida al Dr. Mario Corrochano-Monsalve, financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR, y la ayuda Torres de Quevedo PTQ2020-011271/AEI/10.13039/501100011033 recibida por el Dr. Ángel Maresma.

Bibliografía

Queda a disposición del lector interesado en el correo electrónico: redaccion@editorialagricola.com