

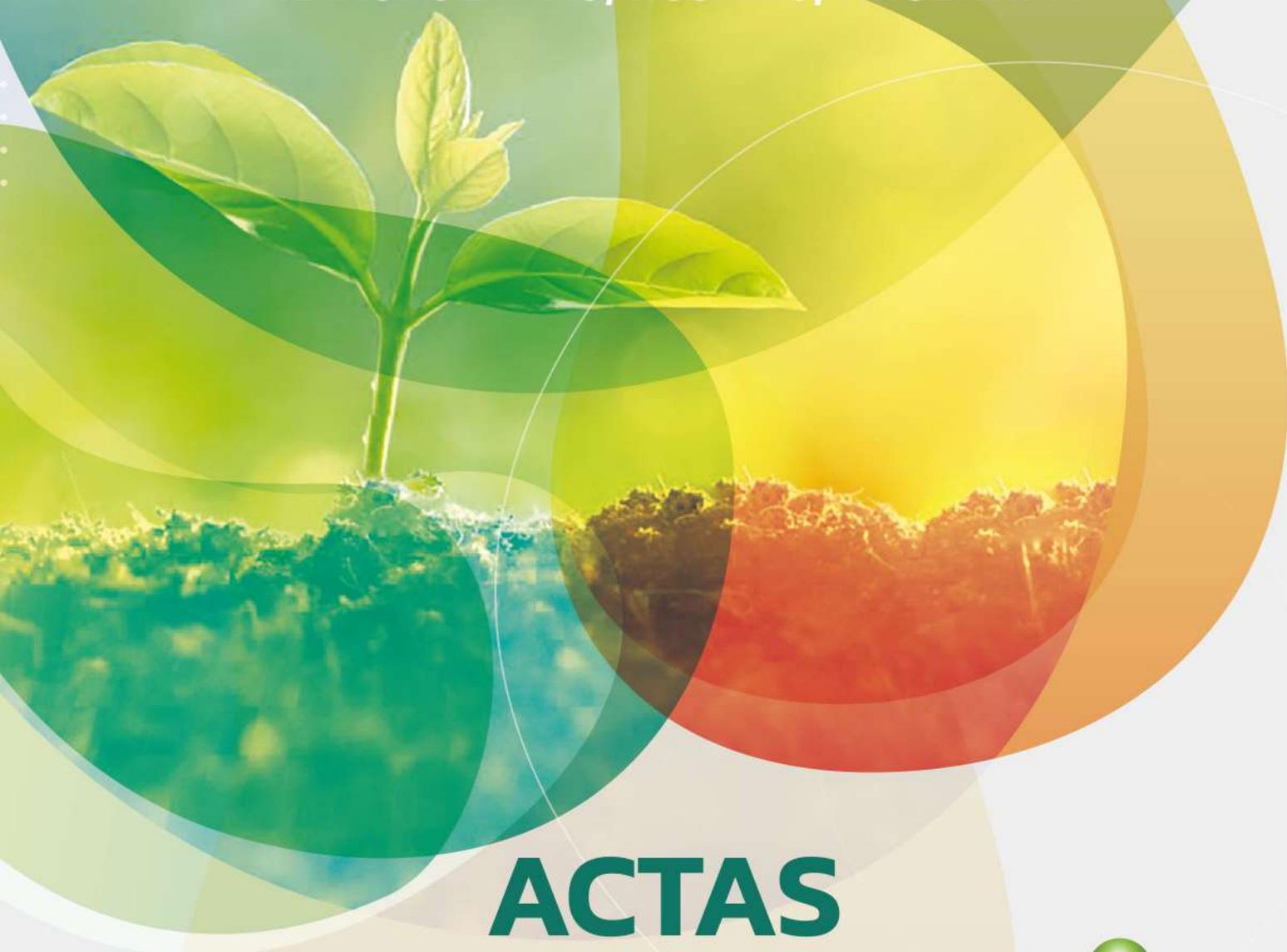


Simposio  
**Fertilidad 2023**

***AL GRAN SUELO ARGENTINO ¡SALUD!***

**10 Y 11 DE MAYO 2023**

**METROPOLITANO, ROSARIO, ARGENTINA**



**ACTAS**

[www.fertilizar.org.ar](http://www.fertilizar.org.ar)

  
**FERTILIZAR**  
ASOCIACION CIVIL

## Estabilizadores de nitrógeno: beneficios agronómicos y ambientales de su utilización en cultivos extensivos

Martín Torres Duggan<sup>1</sup>

(1) Tecnoagro; Girardot 1331 (1427) CABA; email: mjjtorresduggan@gmail.com

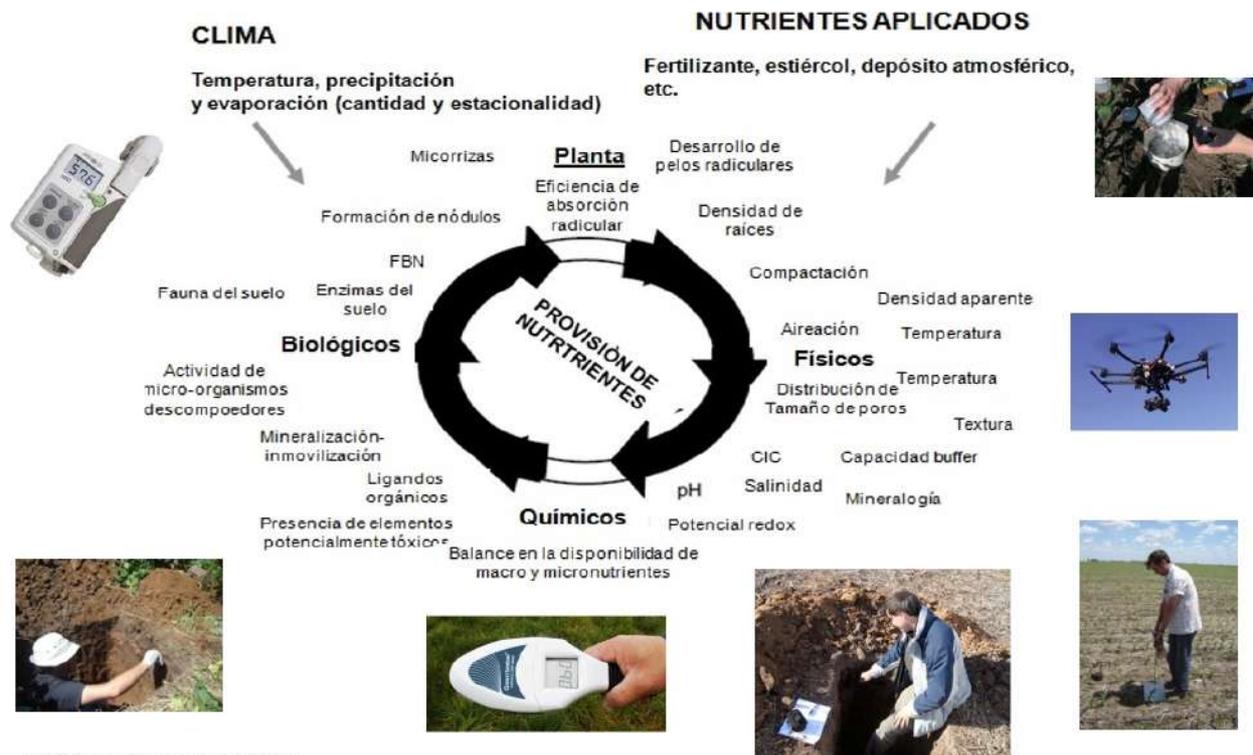
*En contextos difíciles como el actual, con altos precios de los fertilizantes nitrogenados, se debe propender a intensificar el diagnóstico nutricional a través de un correcto muestreo y análisis de suelos como así también considerar todas las innovaciones disponibles que puedan tener optimizar la nutrición de los cultivos. Dentro de estas tecnologías, los estabilizadores de nitrógeno juegan un rol relevante pudiendo mejorar tanto la productividad de los cultivos, como así también mitigar el impacto ambiental de la fertilización nitrogenada. El objetivo de este artículo es caracterizar los principales estabilizadores de nitrógeno y su funcionamiento en el sistema suelo-cultivo. La información presentada en este documento se base en una versión actualizada y ampliada de la conferencia “Nitrogen stabilizers for field crops in Latin America: the use of urease and nitrification inhibidores and market prospects” realizada por el autor en el Fertilizer Latino Americano Conference del 2018 en San Pablo (Brasil).*

### Lo primero es lo primero: ¡¡más y mejor diagnóstico de fertilidad!!

Si bien el propósito de este artículo es describir el impacto agronómico y los beneficios ambientales del uso de estabilizadores de nitrógeno (N), debemos resaltar que, en cualquier contexto, el primer paso a considerar es realizar un diagnóstico integral de la fertilidad de suelos (Figura 1).

El principal mensaje que pretende transmitir el esquema de la Figura 1 es que, como agrónomos, debemos sacar provecho de todas las herramientas disponibles para evaluar la condición de fertilidad de los lotes y la situación nutricional de los cultivos. Esto incluye herramientas “tradicionales” de alto impacto, bajo costo y alto agregado de valor como la observación del perfil del suelo (el costo es tener tiempo, saber de suelos y tener a mano una pala afilada), el correcto muestreo y análisis de suelos (cuya incidencia es de 2-3 USD/ha), entre otras. Este aspecto no es menor teniendo en cuenta que solo el 20% de los productores de maíz realizan muestreo de suelos frecuentes, en otras palabras, la mayor parte fertiliza sin ningún diagnóstico nutricional.

Dentro del diagnóstico tradicional, se recomienda especialmente evaluar no solo el contenido de nitratos en el suelo en el momento de la siembra (0-60 cm), sino también la posible influencia de los cultivos antecesores (ya sean de cosecha o de servicio), ya sea aportando o inmovilizando N. Asimismo, actualmente se dispone del Nan (N incubado anaeróbico), que se mide en la capa superficial del suelo (0-20 cm) permitiendo estimar el N potencialmente mineralizable durante el ciclo del cultivo. Así, la integración del N asimilable inicial sumado al Nan es posible tener una mucho mejor estimación de la oferta de N que explorará el cultivo, aspecto de gran importancia considerando la elevada variabilidad de la oferta de N entre lotes de un mismo predio o bien entre años en el mismo lote. Partiendo de un profundo conocimiento de la oferta de N disponible en el suelo en el momento de la siembra, del N mineralizable, posteriormente se puede evaluar el estatus de nutrición nitrogenada mediante evaluaciones del canopeo. Estas evaluaciones que se pueden hacer en V7-8 de maíz permiten decidir una eventual refertilización a partir de V10, aspecto especialmente útil en maíces tempranos en donde se dispone de una ventana logística más amplia para realizar fertilizaciones en estadios vegetativos.



Adaptado de Stockdale et al. (2013)

**Figura 1.** Herramientas tradicionales y de precisión que se deben considerar para el diagnóstico integral de las deficiencias nutricionales.

## 1. ¿Qué son los fertilizantes de eficiencia mejorada y los estabilizadores de nitrógeno?

De acuerdo con la definición propuesta por la AAPFCO en EE. UU, se considera como “fertilizante de eficiencia mejorada (FEF acrónimo en español), como aquellos fertilizantes con características que permiten un incremento en la absorción de nutrientes por parte de las plantas y reducen el potencial de pérdidas al ambiente, en comparación con productos de referencia. Asimismo, los inhibidores de la ureasa o de la nitrificación, se los suele denominar como “estabilizadores del N”, ya que permiten mantener el N en forma de urea o de amonio, respectivamente, minimizando las pérdidas de N por volatilización de amoníaco (en el caso de los inhibidores de la ureasa o IU) por lixiviación de nitratos y/o desnitrificación (cuando se aplican inhibidores de la nitrificación o IN).

## 2. ¿Cuáles son los beneficios de los inhibidores de la nitrificación y cuál es su posicionamiento agronómico dentro del manejo nutricional de los cultivos?

### 2.1. Beneficios generales

Los principales beneficios del uso de inhibidores de la nitrificación (IN) derivan de la demora del proceso de nitrificación durante un tiempo variable, que depende del tipo de inhibidor y condiciones ambientales, en especial de la temperatura. La estabilización del N forma amoniacal permite reducir las pérdidas por lixiviación de nitratos y desnitrificación. En condiciones predisponentes para la ocurrencia de estas pérdidas de N, la reducción de las mismas, como así también a posible contribución de otros mecanismos fisiológicos asociados con nutrición amoniacal, explicarían los aumentos en el rendimiento derivados de la aplicación de los IN.

Uno de los desafíos del manejo de los IN deriva del hecho que el proceso de lixiviación de nitratos está regulado por un gran número de factores, siendo difícil de predecir (Figura 2).

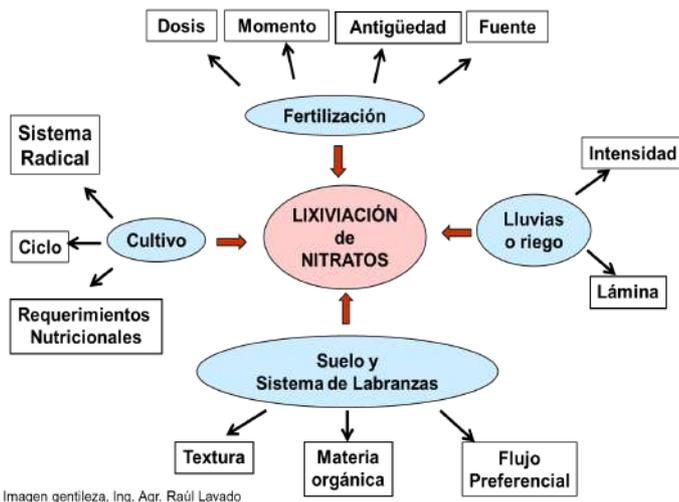


Imagen gentileza, Ing. Agr. Raúl Lavado

**Figura 2.** Factores que inciden en el proceso de lixiviación de nitratos.

La posibilidad de contar con modelos de predicción de excesos hídricos es una herramienta interesante que permitiría ayudar al agricultor en la toma de decisiones en cuanto a la aplicación de IN, este tipo de modelos se utilizan en EE.UU. De lo contrario, los IN se los suele utilizar como “seguros” ante el riesgo de sufrir pérdidas de N por lixiviación, cuya relevancia es mayor cuanto mayor es la dosis de N aplicada (mayor desembolso económico), y mayor es la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de lavado de nitratos y desnitrificación.

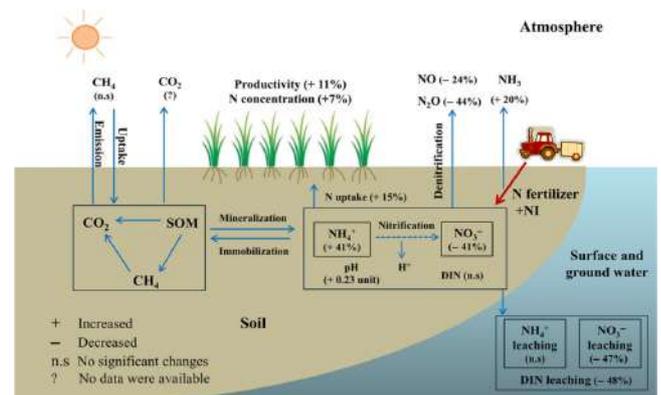
Dentro de los mecanismos fisiológicos que se han descrito para los IN, en algunos trabajos se ha comprobado el beneficio de la nutrición amoniacal a nivel de la absorción radicular debido a la reducción de los costos energéticos derivados de la asimilación del N en forma de amonio, sin el paso metabólico usual que requiere de la reducción de los nitratos a amonio. Por otro lado, cuando las plantas absorben amonio, para mantener el balance electrónico, eliminan iones hidrógeno (protones), acidificando la rizosfera, proceso que aumentaría la biodisponibilidad de P y algunos micronutrientes. A veces estos estudios se realizan en condiciones controladas (e.g. ensayos en maceta) y no siempre han sido validados en condiciones extensivas de producción (i.e. a campo).

## 2.2. Efectos del agregado de inhibidores de la nitrificación sobre el rendimiento y mitigación de gases de efecto invernadero

En los últimos años se han realizado numerosas revisiones y meta-análisis sobre IN en revistas científicas

con referato. Estos estudios muestran que los efectos sobre el rendimiento son poco consistentes y la ocurrencia de aumentos en la productividad (biomasa de grano) depende principalmente de la incidencia de pérdidas de N por lixiviación/desnitrificación. Estos resultados resultan lógicos teniendo en cuenta que el principal mecanismo de acción de los IN es la estabilización del N amoniacal aportado por el fertilizante aplicado.

Por otro lado, la evidencia experimental muestra que, en términos generales, la aplicación de IN luego reduce marcadamente las emisiones de N ( $N_2O$  y de NO) medidas luego de la fertilización nitrogenada, y esto se manifiesta en la mayor parte de los experimentos. La Figura 3 muestra una síntesis de resultados de un meta-análisis realizado a nivel global a partir de 62 artículos científicos con referato con 859 sets de datos alrededor del mundo. Este trabajo incluye además un análisis económico del uso de IN, valorando tanto los efectos sobre el rendimiento, sino también del derivado de la mitigación de las pérdidas de N.



**Figura 3.** Cuantificación de los efectos del agregado de inhibidores de la nitrificación en el sistema suelo-cultivo. Fuente: Qiao et al. (2015)

Como se puede apreciar, el incremento medio de la productividad de diferentes cultivos fue del 11% y reduciendo marcadamente las pérdidas de N por lixiviación de nitratos y desnitrificación. Dentro de los cuatro principales cultivos analizados, la cebada mostró el mayor aumento de la productividad (media=17%, mínimo 7%; máximo=29%), en relación con trigo (media=2%, mínimo=0; máximo 5%), maíz (media=9%, mínimo 3%, máximo 17%) y arroz (media=7%, mínimo 3%, máximo 12%). Asimismo, estos trabajos muestran que el agregado de IN aumenta marcadamente la absorción de N y la eficiencia de recuperación aparente del N (ERN).

En otro meta-análisis publicado por Thapa et al. (2016) donde evaluaron 43 trabajos de investigación (246 observaciones) detectaron un incremento medio del 7,1%

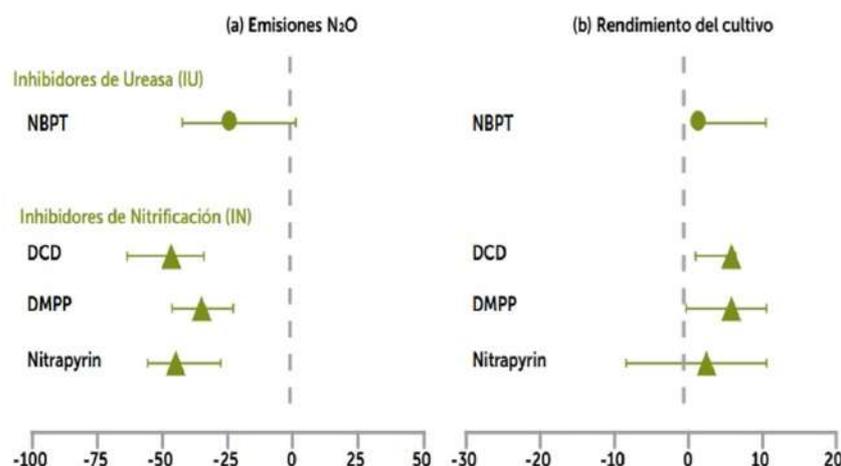
( $IC_{95\%}=4,7-9,5\%$ ) analizando en forma conjunta los datos de los diferentes cereales estudiados (trigo, maíz y arroz). En maíz el aumento del rendimiento no fue significativo, mientras que, para trigo y arroz, los incrementos medios fueron de 7,2 y 5,5%, respectivamente. Sin embargo, la mayor capacidad de mitigación de emisiones de N se detectó en maíz, en donde el agregado de IN redujo el 51% las emisiones de  $N_2O$ , considerablemente mayor a la magnitud observada en trigo o arroz (-30 y -27%, respectivamente). (Figura 4).

Independientemente de la influencia que tienen factores edáficos como la textura o la reacción del suelo sobre la performance agronómica de los IN, en general los efectos que se observan sobre el rendimiento en grano son moderados, con respuestas medias máximas del 10%.

En otro estudio realizado por Wolt (2004) analizando un gran número de resultados experimentales de utilización de Nitrapyrin en el Medio Oeste de EE. UU, aproximadamente en el 25% de los casos no se han detectado efectos significativos sobre el rendimiento, existiendo así un 75% de

probabilidad de obtener aumentos del rendimiento del 7% por el agregado de Nitrapyrin. Otros resultados promisorios fueron el aumento en la retención de N en biomasa (+28%), reducción de pérdidas por lixiviación de nitratos (-16%), disminución de emisiones de N (-51%).

En otra investigación llevada a cabo por Burzaco et al. (2014), donde se comparó la efectividad del Nitrapyrin (Instinct®) en aplicaciones conjuntas con UAN y/o N anhidro en maíz en Indiana y Nebraska (EE. UU) tanto en experimentos a campo como a través de un meta-análisis, observaron impactos significativos en la eficiencia de utilización de N del maíz. Así, los autores reportaron mejoras en la eficiencia de uso del N (EUN) y en la eficiencia de recuperación aparente de N (ERN) de ~17 y ~25%, respectivamente, cuando el IN se aplicó en primavera. Sin embargo, no se detectaron efectos significativos del IN sobre la biomasa de grano de maíz en los experimentos a campo, mientras que en el meta-análisis observaron un leve aumento en el rendimiento (+ 116 kg ha<sup>-1</sup>; p=0,09).



**Figura 4.** Influencia del agregado de inhibidores de ureasa y de la nitrificación sobre las emisiones de óxido nitroso (a) y el rendimiento de distintos cultivos (b). Fuente: Thapa et al. (2016). Nota: se utilizó la versión en español de la figura que fue incluida en el Boletín N° 29 elaborado por el área de I&D de Profertil (agosto de 2020).

### 2.3. ¿Cómo puede impactar la lixiviación de nitratos sobre la dinámica de utilización de N de los cultivos y la respuesta al agregado de inhibidores de la nitrificación?

En la porción húmeda de la Región Pampeana y en maíces de siembra temprana, la mayor incidencia de la lixiviación de nitratos se presenta cuando el N es aplicado en el momento de siembra o pre-siembra, debido a que el N queda en el suelo

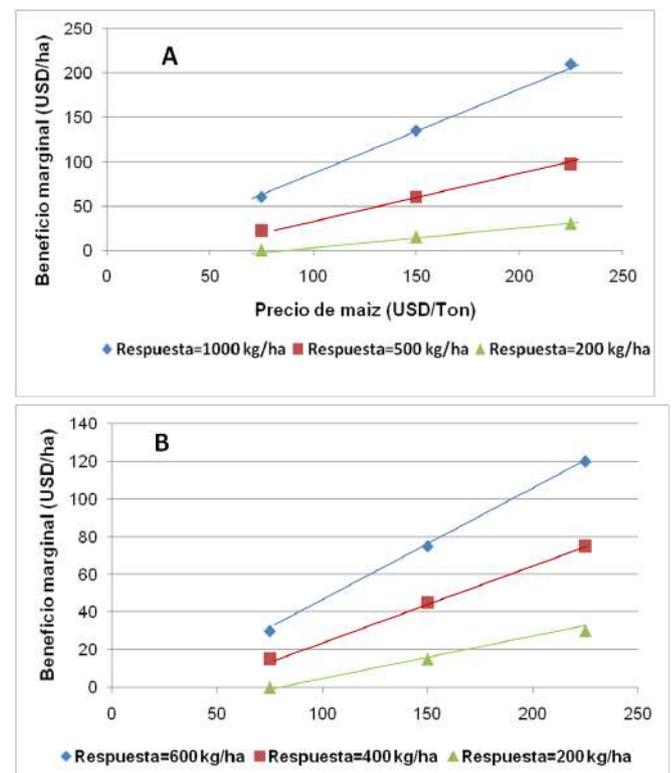
susceptible a ser lixiviado, existiendo por consiguiente un desfase entre la oferta y demanda de N. Por ello, en maíces de siembra temprana, la eficiencia de la fertilización nitrogenada a la siembra suele ser menor que la realizada en post-emergencia (e.g. V4-6), sobre todo cuando se presentan lluvias intensas y balances hidrológicos positivos durante los estadios tempranos del ciclo de maíz.

Considerando que, en términos generales, los productores prefieren fertilizar con N en el momento de pre-siembra o en la siembra del cultivo, aun sabiendo que se logran mayores EUN en aplicaciones en post-emergencia o divididas entre el momento de siembra y post-emergencia, el agregado de IN junto con la fertilización a la siembra, permitiría incrementar la EUN (mitigando las pérdidas por lixiviación). Esto produce un beneficio económico debido al incremento del rendimiento asociado a una mayor disponibilidad de N asimilable. Haciendo una analogía con las preferencias de los productores del Medio Oeste de EE. UU por la aplicación del N en el otoño en relación a la primavera o hacerlo en el momento de la siembra en vez de en post-emergencia (side-dress) en aquellos agricultores que fertilizan con N en la primavera; se puede plantear este análisis para la Región Pampeana argentina. Así, se debería considerar las ventajas logísticas y agronómicas principalmente (pero no exclusivamente) que pueden generar el uso de IN en planteos de siembra temprana de maíz, donde existen mayores probabilidades de ocurrencia de pérdidas de N por lixiviación. En estas condiciones, los beneficios pueden venir del ahorro en una segunda aplicación de N, en una mayor EUN o bien en una combinación de efectos.

Para las condiciones de la Región Pampeana, y de acuerdo con ensayos exploratorios de evaluación agronómica del Nitrapyrin (Instinct HL®; Corteva Agriscience; datos no publicados) realizados por investigadores de INTA, Universidades y/o consultores referentes, se observaron efectos variables de la aplicación del IN sobre el rendimiento de maíz dependiendo de la fecha de siembra (temprana o tardía), y condiciones de sitio (e.g. oferta de N y condición hidrológica). Las respuestas detectadas fueron mayores en maíces tempranos que tardíos y variables según la condición del sitio. La mayor respuesta en fechas de siembra temprana se relaciona con la mayor incidencia de pérdidas de N por lixiviación de nitratos en estadios tempranos del ciclo de maíz, como así también en la menor disponibilidad de N inicial en el suelo en el momento de la siembra. Por el contrario, en siembras tardías, el contenido de N asimilable en el momento de la siembra y el N mineralizable es mayor (i.e. mayor oferta relativa de N), como así también es mayor la sincronía entre la oferta de N y la demanda del cultivo. Asimismo, en maíces de fecha de siembra tardía de la Pampa Ondulada suele ser menor la incidencia de fenómenos de lixiviación. Esto se debe a que el cultivo progresa muy rápido en su desarrollo fenológico, determinando un rápido acceso al agua disponible en el suelo, generando frentes de secado alrededor de las raíces. Por consiguiente, aun

ocurriendo precipitaciones intensas, debido a la mayor demanda atmosférica y al frente de secado que ocurre en el ambiente radicular y que progresa en profundidad, mantiene el suelo con niveles de humedad por debajo de capacidad de campo, reduciendo la probabilidad que se generen balances hídricos positivos y consecuentemente lixiviación de nitratos.

A los fines de modelizar los antecedentes experimentales mencionados previamente de evaluación agronómica del Nitrapyrin (Instinct HL®) en maíz en la Región Pampeana, se presenta en la Figura 5 el beneficio marginal derivado de la aplicación de este IN en un ejemplo de aplicación de UAN según diferentes escenarios de fecha de siembra y respuestas.



**Figura 5.** Beneficio marginal (Ingreso marginal-costo marginal) de la aplicación de UAN con Instinct HL® en función del precio del maíz y diferentes escenarios de respuesta en maíces tempranos (A) y tardíos (B). Costo del IN~15 USD ha<sup>-1</sup>. Datos basados en información provista por Corteva Agriscience.

Como se puede apreciar en la Figura 5, cuanto mayor es el precio del maíz y/o mayor la respuesta esperada al agregado del IN, mayor es el beneficio marginal, asumiendo en este caso que no hay gastos adicionales por la aplicación

del IN ya que éste de lo agregó junto al UAN en la misma operación de fertilización.

Los escenarios planteados en la Figura 5 se basan en los siguientes supuestos:

1. Dosis de aplicación de N moderadas en el rango de 70-100 kg de N ha<sup>-1</sup> en maíces tempranos y una oferta de N en el suelo a la siembra de ~60 kg ha<sup>-1</sup>
2. Dosis de aplicación de N moderadas en el rango de 70-90 kg de N ha<sup>-1</sup> en maíces tardíos y una disponibilidad de N de ~80 kg ha<sup>-1</sup>.
3. Los contenidos de N en el suelo en el momento de la siembra indicados para maíces tardíos y/o tempranos representan valores medios esperables en los suelos de la porción húmeda de la Región Pampeana

Cabe resaltar que los escenarios planteados son conservadores. En el actual contexto de precios internacionales elevados de los fertilizantes nitrogenados (noviembre de 2021), la incidencia del costo de los estabilizadores de N en el total de gastos directos de la fertilización es considerablemente menor. Por otro lado, este modelo conceptual general de beneficio marginal no consideró eventuales reducciones de dosis de N derivados del uso de IN. Este tipo de decisiones podrían ser viables principalmente en planteos de fertilización con alta dosis de N (e.g. maíz bajo riego o en secano de alta productividad). Tampoco se consideró ningún beneficio económico derivado de la mitigación ambiental (e.g. reducción de emisiones de GEI, secuestro de C, etc.).

Un caso interesante a considerar en términos del beneficio del uso de IN son los sistemas de producción de maíz en la Región Semiárida Pampeana, donde predominan suelos muy arenosos (e.g. San Luis, La Pampa, algunas zonas de Córdoba), que presentan consiguientemente mayor riesgo de lixiviación de nitratos. Así, se ha observado bajo riego la fertilización nitrogenada realizada en el momento de la siembra es menos eficiente que la aplicada en post-emergencia, con pérdidas de hasta el 50% del N aplicado en el momento de la siembra (Juan Cruz Colazo, INTA San Luis, comunicación personal). Esta magnitud de pérdida también se podría esperar en planteos de secano cuando se presentan años húmedos (i.e. El Niño) o eventos de precipitación intensa.

#### 2.4. ¿Cómo puede incidir la desnitrificación asociada a excesos hídricos?

Las pérdidas de N por desnitrificación se manifiestan cuando ocurren condiciones de saturación en los agregados

del suelo (más del 60% del volumen de poros saturado), donde bacterias anaeróbicas facultativas utilizan los nitratos como aceptor final de electrones, y el carbono de la MO como fuente de energía.

La tasa de pérdida de N<sub>2</sub>O (óxido nitroso) depende principalmente de la concentración de nitratos (por ello es mayor cuanto mayor es el contenido de N mineral en el suelo o la dosis de N aplicada) y de la condición de saturación, aunque también está regulado por la temperatura como todo proceso bioquímico. En maíz temprano se puede considerar que máximo de pérdida se puede alcanzar 5% del N aplicado (Álvarez et al. 2015). Sin embargo, hay muy pocos estudios regionales y/o subregionales al respecto, y la mayor parte de ellos se enmarcan en proyectos de GEI (gases de efecto invernadero), atendiendo principalmente a problemáticas ambientales.

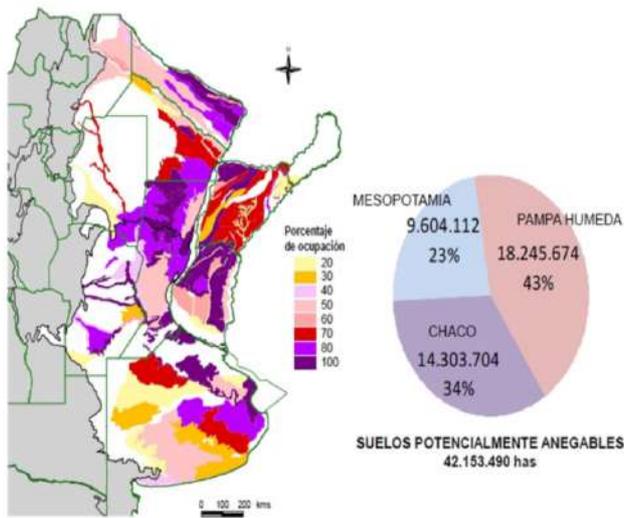
Un aspecto a destacar es que las pérdidas por desnitrificación son mayores en siembra directa que en sistemas con labranza, aumentando también en suelos compactados. Las dos condiciones son prevalentes en la Región Pampeana: la mayor parte de la superficie de maíz se hace en siembra directa y la compactación se ha convertido en una problemática extendida en gran parte de la Pampa Ondulada y Plana tanto en áreas de secano como bajo riego (Torres Duggan et al. 2017; Álvarez et al. 2021). En esta región se cultiva una parte significativa del maíz de secano y regado en forma complementaria de la Región Pampeana.

#### 2.5. Los excesos hídricos en suelos de la Región Chaco-Pampeana en contextos de cambio climático

En las últimas décadas se viene observando un aumento significativo en la frecuencia de ocurrencia de eventos climáticos extremos (Grimm et al. 2000; Podesta et al. 2009), principalmente un aumento de la frecuencia e intensidad de eventos de precipitación intensa (Magrin et al. 2014). Desde la perspectiva del uso de FEF en general y del uso de IN en particular, el incremento de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos de precipitación, como así también del riesgo de anegamiento, representa una oportunidad para posicionar este tipo de tecnologías. En la Figura 6 se muestra la distribución de suelos con riesgo potencial de anegamiento.

A los factores geomorfológicos y edafoclimáticos que inciden sobre el riesgo de anegamientos, se suma en los últimos años, el ascenso de la profundidad

freática en gran parte de la Región Pampeana, aumentando tanto el riesgo de anegamiento, como de inundaciones. La aplicación de IN en el cultivo de maíz en ambientes vulnerables de ser afectados por fenómenos de anegamiento en estadios tempranos del ciclo podría servir como “seguro” para minimizar las pérdidas de N por lixiviación y desnitrificación.



**Figura 6.** Distribución de suelos con riesgo potencial de anegamiento. Fuente: INTA Castelar. Gentileza Miguel A. Taboada.

## 2.6. ¿Qué inhibidores de la nitrificación se utilizan en el mercado local, regional e internacional?

En la actualidad no se disponen de estadísticas de consumo públicas y confiables en este segmento de productos, en parte debido al limitado número de productores de estos estabilizadores de N a escala global. Los IN más importantes en términos de volumen y también en términos de historia de uso son el DCD (desarrollado por Showa Denko y con licencias en diversas empresas y formulaciones en EE. UU, Canadá, Europa y Asia) y el Nitrapyrin (patentado por Dow AgroSciences en 1974 y comercializado desde entonces con la marca N-Serve®. Más del 90% del Nitrapyrin se aplica en maíz, aunque el producto está registrado también para otros cultivos de grano como trigo o sorgo.

En el 2010 Dow AgroSciences (actualmente Corteva Agriscience) lanzó al mercado una nueva formulación microgranulada de Nitrapyrin comercializada con diferentes marcas tanto en EE. UU y Canadá (Instinct®), como así también en otras regiones como Unión Europea, Australia y China (N-Lock®; eNTrench®). Esta nueva formulación (suspensión concentrada), actualmente comercializada por Corteva Agriscience, tiene varias ventajas en relación a la clásica formulación líquida (N-Serve®), como la menor volatilidad del ingrediente activo luego de la aplicación en el suelo, la mayor miscibilidad con fertilizantes líquidos, como así también la posibilidad utilizar el IN en tratamientos de impregnación de fertilizantes granulados (Tabla 1).

Nombre	Solubilidad en agua (g L <sup>-1</sup> )	Volatilidad relativa	Modo de aplicación
Nitrapyrin (N-Serve)	0,04 (20°C)	Alta	Adecuado para su aplicación junto con N anhidro
Nitrapyrin (Instinct HL)	Miscible	Variable (*)	Apto para mezcla con fertilizantes nitrogenados líquidos y sólidos (**) e impregnación de fertilizantes granulados
DCD	23,0 (13°C)	Baja	Apto para su mezcla con urea u otros fertilizantes nitrogenados
DMPP	-	Baja	Apto para su mezcla con urea u otros fertilizantes nitrogenados

Fuente: Ampliado y adaptado de Trenkel (2010) y Webber y McCann (2016). (\*). Protección contra la volatilización del ingrediente activo durante 10 días post-aplicación (luego se requiere incorporación por 10-15 mm de lluvia o riego o mezclado mecánico). (\*\*). Se puede requerir el agregado de compuestos para mejorar su miscibilidad.

**Tabla 1.** Principales características de los principales inhibidores utilizados a escala comercial en el cultivo de maíz.

En cuanto a nuevos desarrollos de IN, se destaca el DMPP (BASF) lanzado al mercado hace algunos años. Se evidencia cierto “optimismo” en relación a este nuevo lanzamiento y se lo está evaluando extensivamente a nivel

de investigación, tanto desde el punto de vista agronómico, como así también de sus posibles riesgos ecotoxicológicos. Hasta la fecha no se han detectado problemas en este último sentido, aunque tampoco se dispone de información

que permita asegurar su superioridad respecto a los otros inhibidores de amplio uso como el DCD o Nitrapyrin. Posiblemente el mayor “optimismo” en relación al DCD provenga del hecho que éste último fue prohibido recientemente en Nueva Zelanda por haberse detectado residuos en la leche, que habrían derivado de la aplicación del inhibidor en pasturas (Thapa et al. 2016).

Por otro lado, en los últimos años (2020 y 2021), Koch Agronomic Services lanzó a nivel global una nueva generación de IU (ingrediente activo Duromide) e IN (ingrediente activo Pronitridine) que fueron patentados y muestran una eficiencia agronómica relativa superior a los inhibidores clásicos utilizados como referencia (e.g. nBPT, DCD). Las nuevas moléculas utilizadas en estas innovaciones, en general, aumentan la estabilidad de la formulación tanto en condiciones de almacenamiento y/o en el suelo (i.e. menor degradación), aumentando la ventana de protección en relación a los inhibidores de referencia.

En los últimos años en Brasil se ha evaluado activamente a nivel experimental el DCD y existe un marcado interés comercial en posicionar el DMPP. Sin embargo, debido a que en ese país los productores usualmente realizan aplicaciones divididas de N, logran sostener adecuados niveles de EUN aun utilizando fuentes de N convencionales, limitando las posibilidades comerciales para el desarrollo de estabilizadores de N.

En Uruguay se han observado respuestas muy atractivas al uso de inhibidores de la nitrificación en trigo aplicados mediante formulaciones líquidas en el cultivo de trigo en la región del Litoral asociadas a la reducción de pérdidas de lixiviación de nitratos y el subsiguiente incremento en la recuperación y EUN. Asimismo, algunas empresas proveedoras de fertilizantes líquidos que operan en este país están comenzando a ofrecer formulaciones que incluyen estabilizadores de N.

### **3. ¿Cuáles son los beneficios de los inhibidores de la ureasa y cuál es su posicionamiento agronómico dentro del manejo nutricional de los cultivos?**

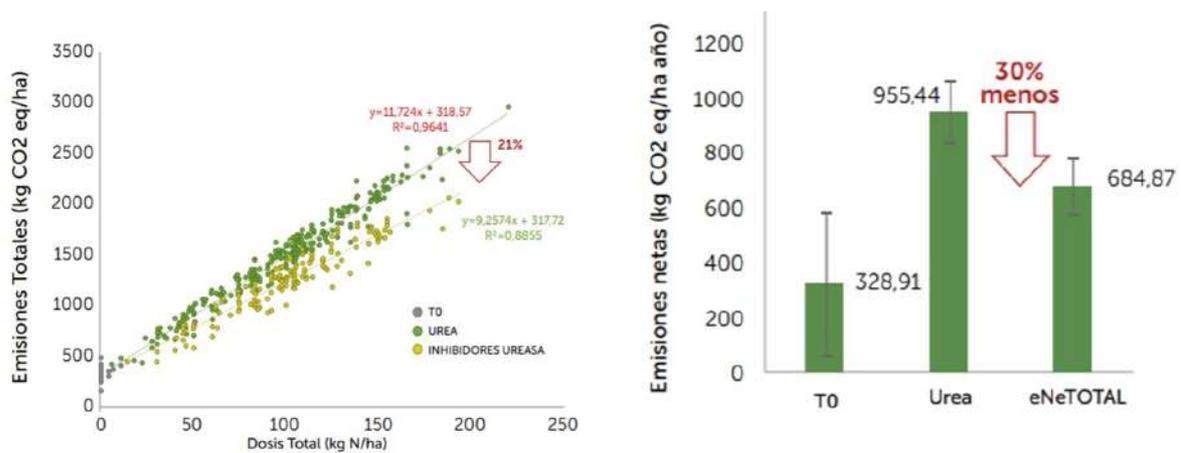
#### **3.1. Impacto sobre el rendimiento**

El uso de IU ha sido extensamente evaluado en la Argentina y en Uruguay, especialmente en el cultivo de maíz. Las respuestas observadas variaron entre 300 y 1500 kg/ha (mediana de 500-600 kg/ha). Las mayores respuestas se suelen dar, en términos generales, cuando las pérdidas de N por volatilización determinan una reducción de la oferta de N al cultivo. Las respuestas medias suelen ser consistentes en un amplio rango de condiciones edafoclimáticas.

La magnitud de las pérdidas por volatilización de amoníaco suele estar muy asociadas con las temperaturas del suelo (o del aire) imperantes durante la fertilización, y eso permite, predecir en qué condiciones productivas (e.g. latitud y longitud) se puede esperar una mayor o menor capacidad de reducción de las emisiones de amoníaco cuando se aplica urea al voleo. Así, estudios experimentales realizados en la Región Pampeana muestran que las pérdidas de N por volatilización de amoníaco pueden ser muy variables, desde 0 hasta 30% del N aplicado en planteos de siembras temprana de maíz (i.e. septiembre-octubre en Zona Núcleo) y hasta 40% del N aplicado se aplica urea al voleo en fertilizaciones de maíz tardío (i.e. diciembre).

#### **3.2. Mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y secuestro de carbono**

La capacidad que tienen los IU de aumentar los rendimientos de los cultivos y reducir las emisiones de amoníaco presentan no solo un beneficio agronómico directo (mayor rendimiento y rentabilidad) sino también implicancias ambientales muy relevantes en términos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Un ejemplo de esos efectos surge de un estudio realizado por el área de I&R a través de 90 experimentos de campo en maíz durante 12 años (campañas 200/09 al 2019/20) en 47 localidades de la Argentina (Figura 7).



**Figura 7.** Emisiones de GEI totales (izquierda) y netas (derecha) en kg CO<sub>2</sub> eq./ha año con urea sin tratar y tratadas con IU. diferentes fuentes de N Fuente: Boletín n°30 del área de I&D de Profertil (junio de 2021).

En estos ensayos, en donde se observó una respuesta positiva en el 67% de los ensayos y un aumento de rendimiento promedio de 640 kg/ha, se redujo en 21% y 30% las emisiones totales y netas de GEI, expresadas en términos de eq. CO<sub>2</sub>/ha año. Asimismo, en base al uso de modelos como el Roth C y el AMG se pudo simular que los tratamientos que incluyeron el IU, debido a las mejoras en los rendimientos, aumentaron el secuestro de C del suelo. Debido a la relevancia creciente que tiene el secuestro de C como estrategia de mitigación del cambio climático, la utilización de estabilizadores de N se los debe considerar no solo como tecnologías que mejoran o pueden mejorar la productividad (“tecnologías de insumo”), sino también como ecoinnovaciones, es decir como herramientas para mejorar los stocks de C del suelo. Posiblemente en el futuro cercano estas tecnologías tengan mayor adopción a medida que se vayan considerando en las certificaciones ambientales internacionales para otorgar créditos de C asociadas con el

manejo de sistemas productivos en el marco de una agricultura intensificada sustentable.

### 3.3. ¿Qué inhibidores de la ureasa se utilizan a nivel nacional e internacional?

El principal inhibidor de la ureasa (IU) utilizado en cultivos extensivos como maíz y trigo, es el nBPT (Agrotain®, Koch Agronomic Services). Este estabilizador se comercializa licenciado por varias empresas de fertilizantes alrededor del mundo, tanto en forma individual, como en combinación con el inhibidor de la nitrificación DCD (e.g. Agrotain Plus®) (Synder, 2016; Trenkel, 2010). En Argentina el nBPT se lo utiliza como tratamiento de “estabilización” de urea granulada, y hay varias empresas que lo comercializan bajo diferentes formulaciones y marcas (e.g. Limus® tecnología patentada) (Tabla 2).

Nombre	Usos y características
<b>INHIBIDORES DE LA UREASA</b>	
<b>Agrotain® (NBPT)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Producido por Koch Agronomic Services (USA) quien comercializa el inhibidor bajo licencia a todo el mundo</li> <li>✓ Protegen de las pérdidas por volatilización en un rango de 10-15 días desde la aplicación, dependiendo de las condiciones edafoclimáticas (luego requiere incorporación por lluvia o riego mayor a 10-15 mm)</li> <li>✓ Respuestas en rendimiento entre 300 y 1500 kg/ha según condición ambiental y de manejo</li> </ul>
<b>Limus®</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Combina a dos inhibidores de la ureasa (NBPT+NPPT), tiene similar comportamiento agronómico aunque un mejor comportamiento y estabilidad en el almacenamiento</li> </ul>

**Tabla 2.** Principales tipos de inhibidores de la ureasa (IU) utilizados en Argentina.

Por otro lado, como se mencionó antes, Koch Agronomic Services lanzó en el 202 y 2021 a nivel internacional una nueva generación de IU (ingrediente activo Duromide) que presenta mayor estabilidad y eficacia que el nBPT, como así también amplía la ventana de protección tanto en urea como UAN (Ruffo, 2020, Fertilizer Latino Americano Conference). Debido a lo reciente de estas tecnologías patentadas, es aún limitada la información científica (artículos con referato) disponibles. Tampoco se dispone de información pública de evaluaciones en la Argentina. Sin embargo, esto es habitual, cuando se patentan innovaciones como estas, lleva varios años su evaluación experimental independiente. Hasta la fecha se ha publicado un artículo científico con revisión de pares (Revista Brasileira de Ciencia do Solo). En esta investigación se observó mayor eficiencia en reducir las emisiones de amoníaco del Duromide (IV) en relación al nBPT en el cultivo de maíz. Se comparte el link para acceder a la publicación: <https://www.rbcjournal.org/pt-br/article/duromide-increase-nbpt-efficiency-in-reducing-ammonia-volatilization-loss-from-urea/>

#### 4. Conclusiones y prospectiva tecnológica relacionada con el uso de estabilizadores de nitrógeno

Los estabilizadores de N, al igual que cualquier innovación tecnológica con impacto en la nutrición nitrogenada de los cultivos debe ser analizada en el contexto del sistema de producción (i.e. agroecosistema). Ello implica partir de un diagnóstico integral de la condición de fertilidad, considerando herramientas “tradicionales” con alto valor agregado y mínimo costo (e.g. muestreo y análisis de suelos, observación de la estructura y morfología del perfil, entre otros) y “nuevas herramientas” como son el sensoramiento remoto y proximal para evaluar el estatus nutricional de los cultivos (e.g. imágenes satelitales).

El posicionamiento agronómico varía según el tipo de estabilizador de N considerado. Así, ya modo de corolario de la información presentada en este artículo, los inhibidores de la nitrificación (IN), son tecnologías que permiten mitigar las pérdidas de N por lixiviación de nitratos y las emisiones de GEI (sobre todo de óxido nitroso). Por ello los IN se los debería considerar en situaciones en donde existen mayores probabilidades de ocurrencia de fenómenos de excesos hídricos, que suelen tener prevalencia en planteos de maíz de fecha temprana, aunque no exclusivamente. Los efectos del agregado de los IN suelen ser consistentes en términos de la reducción de las emisiones de GEI, y presentan un efecto variable sobre el rendimiento, que tiende a ser en general más bien moderado o nulo, dependiendo de la dinámica del N en el sistema suelo-cultivo y la condición hidrológica.

Por otro lado, los inhibidores de la ureasa (IU), mitigan significativamente las emisiones de amoníaco, con eficacias variables según el tipo de IU utilizado y la condición de sitio, sobre todo temperatura y características de fertilidad del suelo (e.g. pH, textura, MO, entre otros). La extensa información experimental disponible en maíz en la Región Pampeana indica que son esperables aumentos significativos y rentables derivados de la aplicación de IU (e.g. nBPT) con respuestas medias de 640 kg/ha y una frecuencia de respuesta positiva del 67% (I & D, Profertil). Asimismo, el costo de este tipo de tecnologías (~14 USD/ha para una dosis de 200 kg/ha de urea) tiene muy baja incidencia en el presupuesto de fertilización nitrogenada y permite capturar una elevada respuesta con impacto directo en el beneficio económico del cultivo.

En Argentina si bien la industria local de fertilizantes viene priorizando el posicionamiento de IU por sobre los IN en el segmento de cultivos extensivos, esta tendencia contrasta con mercados de países desarrollados como EE. UU, Australia, UK, entre otros, en donde, en general, desde hace años se dispone de una amplia oferta de estabilizadores de N en formulaciones con fertilizantes sólidos y fluidos.

Los ambientes de producción de cultivos extensivos de la Región Pampeana, debido al tipo de suelos y características climáticas, presentan características que los hace vulnerables a las pérdidas de N tanto por volatilización de amoníaco como por lixiviación de nitratos. Consiguientemente, potencialmente el uso de estabilizadores de N tendría “nichos de mercado” significativos que deberán ser desarrollados en base a la evidencia científica local e internacional propendiendo a un uso adecuado de estas tecnologías.

La tendencia en innovación en relación a los estabilizadores de N se enmarca dentro del concepto de “apilar” diferentes tecnologías, combinando diferentes moléculas e ingredientes activos (IU+IN) para ser utilizadas en la fertilización de los cultivos, tanto a través de fertilizantes sólidos (e.g. urea) como fluidos (N anhidro, UAN, etc.). Asimismo, en los últimos años, distintas empresas a escala global también vienen evaluando la efectividad agronómica de la aplicación de fuentes de N combinadas con distintos estabilizadores de N y bioestimulantes. Este proceso de “innovaciones nutricionales apiladas” ha mostrado resultados muy promisorios, aportando al “cierre de brechas de rendimiento” en el cultivo de maíz y en otros cultivos extensivos, particularmente en contexto de alta variabilidad climática. En estas condiciones, los cultivos están sometidos tanto a pérdidas de N como así también a estreses abióticos (e.g. sequías, golpes de calor, anegamiento, salinidad, etc.) y los estabilizadores de N son parte de las soluciones que dispone el agricultor para optimizar la productividad de los cultivos minimizando el impacto ambiental de la fertilización.



**FERTILIZAR**

ASOCIACION CIVIL



**FERTILIZAR.ORG.AR**