

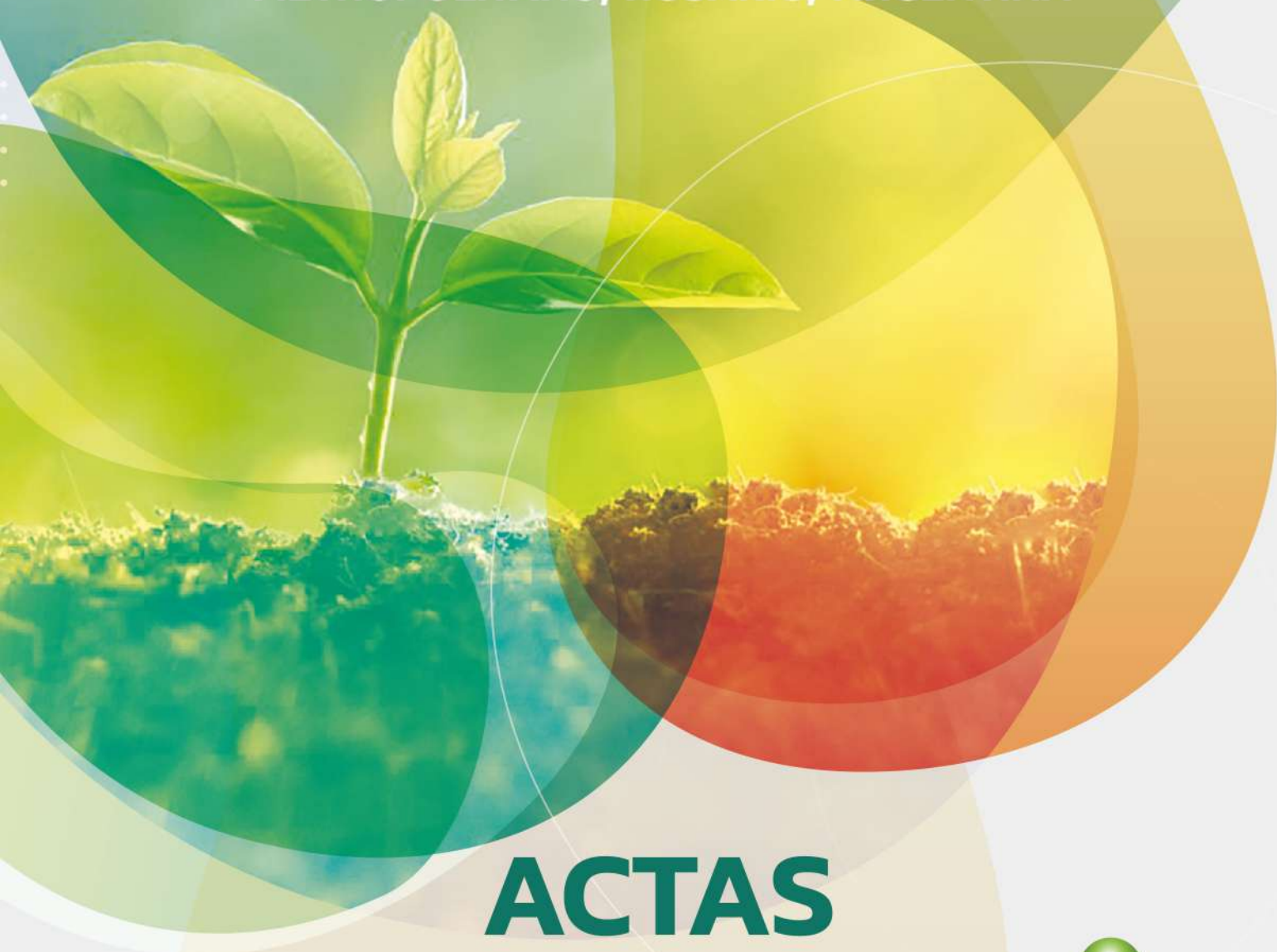


Simposio
Fertilidad 2023

AL GRAN SUELO ARGENTINO ¡SALUD!

10 Y 11 DE MAYO 2023

METROPOLITANO, ROSARIO, ARGENTINA



ACTAS

www.fertilizar.org.ar


FERTILIZAR
ASOCIACION CIVIL

Fertilizantes de eficiencia mejorada y su uso en agroecosistemas

Martín Torres Duggan¹

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

El objetivo del presente escrito es describir y analizar las características principales y los beneficios agronómicos y ambientales del uso de fertilizantes de eficiencia mejorada en sistemas de producción de granos de la Región Pampeana argentina.

1. ¿Qué son y cómo funcionan los fertilizantes de eficiencia mejorada?

Los fertilizantes de eficiencia mejorada (FEM) se denominan a todos aquellos fertilizantes que permiten aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados, mejorando la productividad de los cultivos y la sustentabilidad en el manejo de los nutrientes a través de la reducción de pérdidas de éstos fuera del sistema suelo-cultivo.

De acuerdo con Reetz (2016), la eficiencia de los fertilizantes se puede mejorar reduciendo o retardando la liberación de los nutrientes; inhibiendo la conversión de nutrientes a formas menos estables en el suelo y aumentando la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Cabe aclarar que el término “eficiencia mejorada” no debería interpretarse como un atributo intrínseco del fertilizante. La “eficiencia mejorada” siempre se debe analizar en el contexto del uso del fertilizante, sobre todo la condición de aplicación, por ejemplo, las características del suelo o meteorológica en el momento de aplicación. Estas condiciones de aplicación son las que se deben evaluar adecuadamente para tener una mirada realista de los beneficios que pueden tener la utilización de los fertilizantes de eficiencia mejorada (FEM) en agroecosistemas. Así en términos muy generales, en algunos tipos de suelos y/o condición del ambiente biofísico (e.g. temperatura), la aplicación de los FEM puede reducir los procesos de inmovilización y/o fijación en el suelo o bien minimizar las pérdidas de los nutrientes fuera del sistema suelo-cultivo. En este tipo de contexto es cuando son esperables mejoras en la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados o en el rendimiento de los cultivos, por

consiguiente, se reduce la vulnerabilidad ambiental de la fertilización.

Los principales desarrollos que se han propuesto para mejorar la eficiencia de los fertilizantes son los siguientes:

- a. Uso de coberturas (*coatings*) semipermeables que por sus características (micromorfología, espesor, porosidad, etc.) reduzcan la tasa de disolución de los nutrientes en el suelo (e.g. ureas recubiertas con polímeros y/o azufre elemental). También se los denomina “fertilizantes de liberación controlada” o “fertilizantes recubiertos”
- b. Sustancias que liberan gradualmente el nutriente (e.g. urea formaldehído; ureas tratadas con zeolitas, etc.)
- c. Estabilizadores de nitrógeno, ya sean inhibidores de la ureasa (IU) o inhibidores de la nitrificación (IN) que aumentan el tiempo de residencia del amonio en el suelo reduciendo parcialmente las pérdidas por volatilización, lixiviación y/o desnitrificación

Dentro de los fertilizantes de los FEM, la mayor parte de la evidencia científica sobre los beneficios agronómicos y ambientales proviene de la evaluación de aditivos y/o formulaciones que mejoran la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN), con variado impacto sobre el rendimiento en grano. Este tipo de aditivos se los denomina actualmente “estabilizadores de nitrógeno” y se refieren a los tradicionalmente conocidos como inhibidores de la ureasa (IU) y de la nitrificación (IN), que se describen en próximos párrafos.

Otros materiales que se utilizan como aditivos para formular FEM son diversos minerales que pueden mejorar la EUN. El más relevante y estudiado es el uso de zeolitas combinadas con fertilizantes nitrogenados inorgánicos u orgánicos. Las zeolitas son tectosilicatos con estructura cristalina muy particular con una red de nanoporos externos e internos intercomunicados que permiten la retención e intercambio reversible de agua, amonio y potasio con las plantas. Así, la incorporación de zeolitas (existen diferentes series mineralógicas), en fertilizantes como urea o estiércol reduce las pérdidas tanto por volatilización de amoníaco como por lixiviación de nitratos, siempre que se presenten condiciones predisponentes. Las zeolitas también se pueden aplicar en forma independiente o como materia prima de producto que se aplican como acondicionadores de suelos que mejoran la conservación de agua del suelo y/o el agua útil para las plantas. La Argentina cuenta con diversos recursos geológicos de rocas y minerales con potencial de uso en el ámbito agropecuario, incluyendo a las rocas portadoras de minerales de zeolitas. Sin embargo, más allá de disponerse de unos pocos trabajos científicos locales (investigación fundamental), es necesario desarrollar investigación aplicada que permita caracterizar y evaluar los recursos zeolíticos para diferentes usos, y generar así una “línea de base” sobre su calidad agronómica y pautas para dosificar en condiciones de campo.

A diferencia del corpus de conocimiento científico que se ha generado para los estabilizadores de N, no se han publicado avances considerables en la literatura académica que demuestren la eficacia de aditivos que mejoran la eficiencia de los fertilizantes fosfatados sólidos tradicionales (i.e. solubles en agua). En cambio, la aplicación de rocas fosfóricas o fosfáticas (RF) reactivas, principalmente las que contienen francolita (carbonato flúor apatita) como principal constituyente mineralógico, ha demostrado una alta eficiencia agronómica principalmente en suelos con tendencia a la fijación y/o inmovilización del P (e.g. suelos ácidos). Existe un renovado interés en el uso de fosforitas y otras fuentes fosfatadas de origen mineral en sistemas de producción tradicional o bajo agricultura orgánica debido al mayor

efecto residual y el menor impacto ambiental de la fertilización fosfatada (e.g. menor escurrimiento de P soluble hacia cuerpos de agua). También se observan interesantes desarrollos tecnológicos de RF micronizada para ser aplicada mediante riego localizado (en suspensión). En igual sentido, el uso de azufre elemental (AE) micronizado incorporado en mezclas químicas formuladas en base a fuentes fosfatadas como MAP o DAP se consideran una innovación tecnológica relevante. La incorporación de AE micronizado en la matriz de los gránulos aumenta la concentración total de S en los gránulos, y mejora la relación P/S en comparación con mezclas químicas o físicas en donde se utilizan fuentes azufradas sulfatadas. La reducción del tamaño de partículas del AE garantiza una rápida oxidación en el suelo, mientras que su incorporación a los gránulos de mezclas químicas minimiza el riesgo del manejo de AE en plantas de fertilizantes (riesgo de detonación en almacenamiento). Es decir, la tendencia es no aplicar AE como fertilizante simple sino incorporado en mezclas químicas.

Por otro lado, existe evidencia científica sobre la mayor EUP de los fertilizantes fosfatados líquidos en suelos calcáreos y/o con alto contenido de carbonatos en la masa de suelos, independientemente de la forma química del P en las formulaciones (i.e. ortofosfato, polifosfato). Así, la aplicación de starters fosfatados líquidos (en solución) aplicados en el surco sobre la semilla o alrededor de ésta puede mejorar la EUP y el rendimiento en suelos que utilizan esta práctica. La misma se encuentra difundida en EE.UU sobre todo complementando la fertilización de base con P que se suele hacer con fertilizantes fosfatados simples, mezclas físicas o químicas. El uso de starters fosfatados líquidos también está creciendo en Argentina y Uruguay. La razón de la mayor EUP de las fuentes fosfatadas líquidas en suelos con alto contenido de carbonatos o con horizontes cálcicos deriva de la menor formación de complejos P-Ca de baja solubilidad, incrementando la eficiencia de recuperación P aparente del P aplicado.

A modo de sumario, en la Tabla 1 se presentan ejemplos de FEM utilizados en cultivos extensivos.

Tipo de fertilizante	Ejemplos de FEM	Posicionamiento agronómico
Nitrogenado	Inhibidores de la ureasa	Mitigación de pérdidas por volatilización de amoníaco (e.g. NBPT, nPPT, zeolitas de la serie Heulandita-Clinoptilolita)
	Inhibidores de la nitrificación	Mitigación de pérdidas por lixiviación de nitratos y desnitrificación (e.g. Nitrapyrin, DCD, DMPP, zeolitas de la serie Heulandita-Clinoptilolita)
	Fertilizantes de liberación controlada	Dependiendo de la condición edáfica (e.g. forma dominante de N mineral, pH, etc.), y del ambiente (e.g. temperatura), estas tecnologías pueden funcionar estabilizando el N ya sea mediante la mitigación de pérdidas por lixiviación de nitratos, volatilización de amoníaco, etc. (e.g. ureas recubiertas con polímeros o azufre elemental).
	Soluciones de UAN	Por la forma de aplicación (chorreado) y su menor contenido de N amídico, presenta baja tasa de volatilización en comparación con la urea aplicada al voleo en cobertura total cuando hay condiciones predisponentes (temperatura media diaria por encima de 15-20°C).
Fosfatado o fosfatado-azufrado	Fuentes de liberación progresiva	Reducen la liberación inmediata de P, aportando P en forma progresiva a lo largo de las rotaciones o secuencias de cultivo (e.g. fosforitas reactivas, principalmente las constituidas por francolitas como componente principal). También es apta para agricultura orgánica y para fertirriego cuando se la aplica micronizada vía riego por goteo.
	Mezclas químicas NPKS o NPS's	Fuentes fosfatadas en donde se agrega azufre elemental o micronutrientes en la matriz de los gránulos, algunas de ellas se han patentado (e.g. Fusion® de Mosaic).
	Fuentes fosfatadas líquidas	Mejoran la eficiencia de uso debido a que se aplican, en general, como starters (i.e. aplicación localizada), y también incrementan la eficiencia de recuperación de P en suelos con alto contenido de carbonatos (menor formación de complejos Ca-P de baja solubilidad)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Algunos fertilizantes de eficiencia mejorada (FEM) en sentido amplio referidos en la literatura académica.

2. ¿Qué son y cómo funcionan los fertilizantes de liberación controlada?

Los fertilizantes de liberación controlada incluyen a un heterogéneo grupo de productos que contienen coberturas y/o materiales dentro de los gránulos que regulan la tasa de disolución de los mismos en el suelo y consiguientemente la liberación de nutrientes. Algunos ejemplos conocidos son las ureas recubiertas con azufre elemental (AE) que actúa como una membrana semipermeable y va regulando la salida del amonio, y a su vez por la oxidación del AE se mitiga, parcialmente, la posibilidad de generar emisiones de amoníaco. También son conocidas, aunque no extensivamente utilizadas en la Argentina, las ureas

recubiertas con polímeros flexibles biodegradables, entre otros tantos ejemplos que se pueden mencionar.

Si bien se ha publicado literatura científica describiendo las características de los fertilizantes de liberación controlada, la misma enfatiza modelos de acción generales o esquemáticos (Fig. 1). Conceptualmente, la posibilidad de mejorar la sincronía entre la oferta de nutrientes liberados desde el fertilizante con la demanda de éstos por parte del cultivo es conceptualmente atractiva. Actualmente no se dispone en la Argentina de estudios que hayan evaluado en forma cuantitativa y exhaustiva el impacto de este tipo de tecnologías sobre el rendimiento de los cultivos o sobre el ambiente.

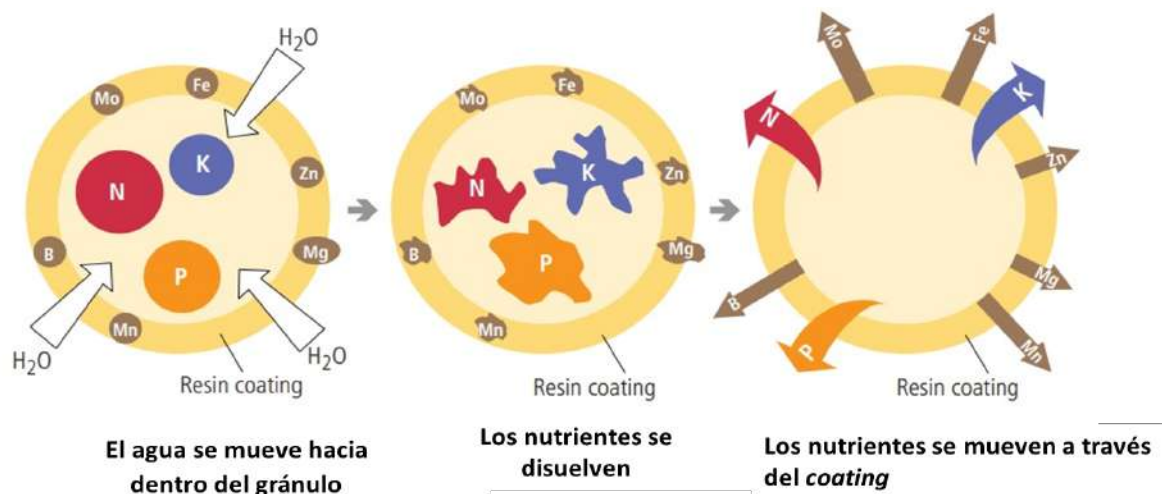


Figura 1. Esquema del modo de acción de un fertilizante de liberación controlada tradicional. Fuente: Adaptado de Trenquel (2010). En: Drechsel et al. (2015)

En los últimos años se han propuesto esquemas que muestran “sistemas inteligentes de entrega de nutrientes” de los fertilizantes de liberación controlada en donde la tasa de disolución de los nutrientes a través de la membrana semipermeable (cobertura del fertilizante) está regulada por la inclusión de sensores de origen químico o biológico que se incorporan en el fertilizante y que se activan ante cambios en variables del entorno del fertilizante (e.g. pH, temperatura, humedad), o bien directamente se propone el encapsulado de microorganismos en el fertilizante que se activan por cambios en la configuración y/o disolución de la membrana semipermeable que rodea al fertilizante (Fig. 2).

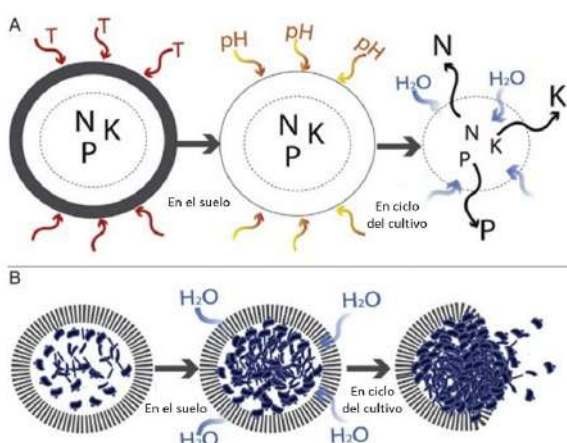


Figura 2. Sistemas avanzados de entrega de nutrientes a partir de fertilizantes de liberación controlada regulados por sensores que captan cambios en el entorno del fertilizante (e.g. temperatura, pH, humedad), o bien basado en el encapsulado de microorganismos(A), Calabi-Foody et al. (2018)

3. ¿Qué son los estabilizadores de nitrógeno y cómo impactan sobre el rendimiento de los cultivos?

Se advierte que en estas mismas actas en donde está presentado este escrito se incluye un trabajo titulado “Estabilizadores de nitrógeno: beneficios agronómicos y ambientales de su utilización en cultivos extensivos” en donde se puede consultar las características y propiedades de los principales productos y/o formulaciones que se utilizan en la Argentina. Por consiguiente, se resumen aspectos generales de su posicionamiento agronómico y los principales beneficios esperados de su aplicación en cultivos extensivos de la Región Pampeana argentina.

3.1. Posicionamiento agronómico de los estabilizadores de nitrógeno

3.1.1 Inhibidores de la ureasa

El principal inhibidor de ureasa (IU) que se ha evaluado en la Argentina ha sido el nBPT, que se incorpora como aditivo de la urea o de soluciones líquidas de N. En los últimos años también se ha evaluado extensivamente la combinación del nBPT con el nPPT (Limus® tecnología patentada).

El uso de IU ha sido extensamente evaluado en la Región Pampeana de Argentina, especialmente en el cultivo de maíz, aunque también se han realizado ensayos en trigo. Las

respuestas observadas en maíz 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 limitan 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).

3.1.2 Inhibidores de la nitrificación

A diferencia de otras regiones del mundo en donde se realiza producción extensiva de granos en secano o bajo

riego, la utilización de inhibidores de la nitrificación (IN) no es una práctica frecuente en la Región Pampeana a pesar de existir claras condiciones predisponentes para su utilización, sobre todo un sistema climático con alta variabilidad y con alta frecuencia de eventos extremos, incluyendo años con excesos hídricos.

En la Tabla 2 se presentan los principales IN que se utilizan en el mundo, indicando el tipo de componente o ingrediente activo y el modo de aplicación.

De los IN presentados, el DCD y DMPP se lo utiliza en Argentina, algunos fertilizantes destinados a cultivos intensivos, sobre todo en cultivos bajo riego. En cultivos extensivos, si bien varias empresas han evaluado pre-comercialmente diferentes formulaciones, la industria local no ha fomentado demasiado el uso de este tipo de tecnologías. Esta situación difiere de otros países con sistemas de producción extensiva comparables con la Argentina, en donde se evidencia una creciente adopción de estabilizadores de N, sobre todo la combinación de IU e IN agregados a fertilizantes nitrogenados sólidos o líquidos.

Nombre	Solubilidad en agua (g L ⁻¹)	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 (2015). (*). 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 2. Principales características de los principales inhibidores de la nitrificación utilizados a escala comercial en el cultivo de maíz.

Recientemente la empresa Corteva Agriscience lanzó en la Argentina una formulación comercial de Nitrapyrin (Instinct NXTGEN®), molécula ampliamente estudiada y conocida a nivel académico internacional. Los ensayos realizados en maíz la Región Pampeana en el período 2012-

2022 en una gran cantidad de sitios experimentales muestran un 74% de casos con respuesta positiva en rendimiento de grano, con incrementos de 650 kg/ha (7% de mejora) (Fig.3).

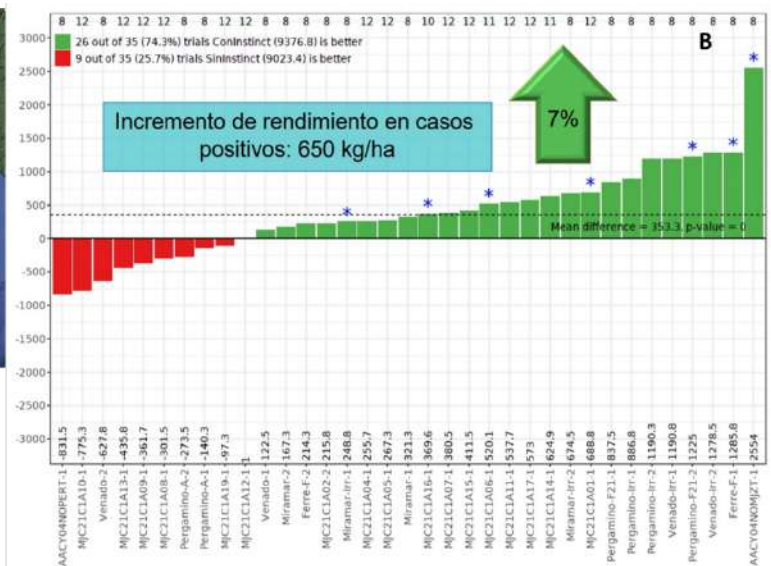
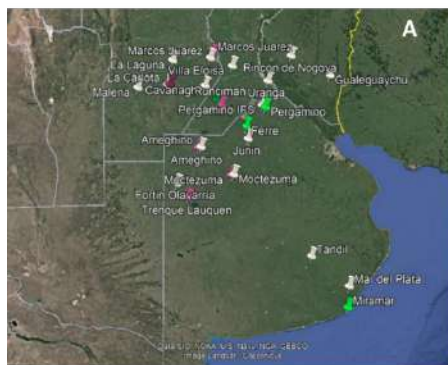


Figura 3. Distribución geográfica (A) y resultados de ensayos (B) de la aplicación de Nitrapyrin en la Región Pampeana de Argentina. Fuente: Corteva Agriscience.

Las respuestas a la aplicación del Nitrapyrin se asociaron con las lluvias ocurridas en los estadios tempranos del cultivo o con el uso del riego (Fig. 4).

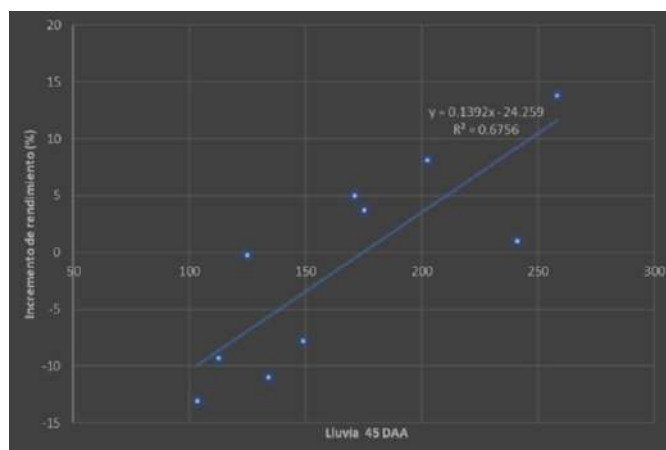


Figura 4. Relación entre la respuesta al agregado de Nitrapyrin (Instinct NXTGEN®) y las precipitaciones acumuladas a los 45 días posteriores a la aplicación.

4. Perspectiva ambiental de fertilizantes de eficiencia mejorada

Si bien el productor agropecuario pondera principalmente la respuesta de la tecnología en términos de aumento de

rendimiento o bien el beneficio económico marginal de su aplicación, los beneficios ambientales derivados de la mitigación de GEI, como así también la posibilidad de incrementar el secuestro de carbono son aspectos cada vez más considerados. Esto se debe a que en los últimos tiempos se observa un desarrollo creciente de “programas de sustentabilidad” o “proyectos de carbono” ofrecidos por empresas proveedoras de insumos y con aval de diferentes empresas certificadoras internacionales, que permiten, mediante variados esquemas, monetizar el uso de innovaciones que mejoran la calidad del suelo o la sustentabilidad del agroecosistema.

De acuerdo con una red de 90 experimentos a campo conducidos por Profertil durante 12 años (campañas 2008/09-2019/20) en 47 localidades, el aumento medio de rendimiento por agregado de inhibidores de la ureasa agregado a la urea determinó efectos positivos en el 67% de los casos, con una respuesta media de 640 kg/ha. Asimismo, se reportó una reducción de 21, y 30% en las emisiones totales y netas, respectivamente (Fig. 5).

A partir de la misma base de datos experimentales se pudo demostrar una mejora del 40% en la eficiencia de las emisiones de GEI (Fig. 6).

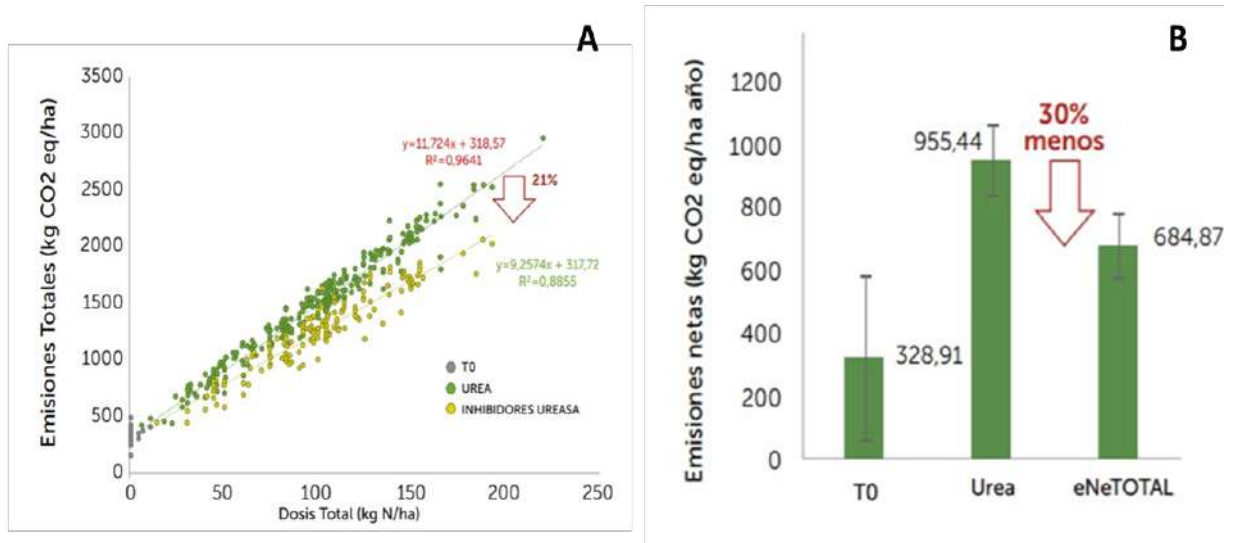


Figura 5. Emisiones totales (kg de CO₂ eq/ha) (A) y netas (B) de la fertilización con urea y urea tratada con inhibidores de la ureasa. Fuente: Profertil 2020.

Eficiencia en términos de Kg de grano/Kg CO₂ eq, emitido

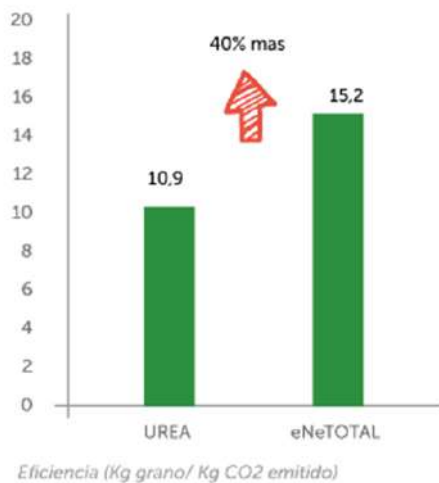


Figura 6 Emisiones expresadas en términos de eficiencia (kg de grano de maíz/kg de CO₂ eq. Emitido). Fuente: Profertil 2020.

Por otro lado, a partir de una revisión de 118 ensayos a campo en maíz llevados a cabo durante 16 años (campañas 2005/06 al 2019/20) en 62 localidades de la Región Pampeana se puede estudiar el impacto del tipo de FEM en las emisiones totales de GEI. Así, se observó una reducción del 24, 21 y 9% asociado al uso de inhibidor de la nitrificación (DMPP), inhibidor de la ureasa (nBPT) y urea de

liberación controlada (urea recubierta con polímero flexible), respectivamente (Fig. 7).

Resultados similares de mitigación de GEI (i.e. reducción de emisiones en rangos de 50-60%) se han observado no solo con el DMPP, sino también con la mayoría de los IN, esto incluye al DCD y el Nitrapyrin. Un detalle de este tema se puede consultar en estas mismas actas en el trabajo titulado “Estabilizadores de nitrógeno: beneficios agronómicos y ambientales de su utilización en cultivos extensivos”.

5. Consideraciones finales

Los fertilizantes de eficiencia mejorada (FEM), en sentido amplio del término, incluyen fuentes de nutrientes o fertilizantes con agregado de aditivos y/o ingredientes que, aplicados bajo determinadas condiciones predisponentes, mejoran la eficiencia de la fertilización, pudiendo así aumentar el rendimiento en grano y mitigar parcialmente las pérdidas de los nutrientes fuera del suelo-cultivo. Bajo esta perspectiva, los beneficios agronómicos y/o ambientales del uso de los FEM se deben analizar en el contexto del sistema de producción. Así, en sistemas productivos en donde se utiliza urea o fuentes que contienen urea (e.g. UAN) bajo condiciones de cultivo predisponentes a las pérdidas por volatilización (e.g. alta temperatura en el momento de aplicación del fertilizante) el uso de inhibidores de la ureasa es una tecnología efectiva para mejorar la EUN y el rendimiento en grano.

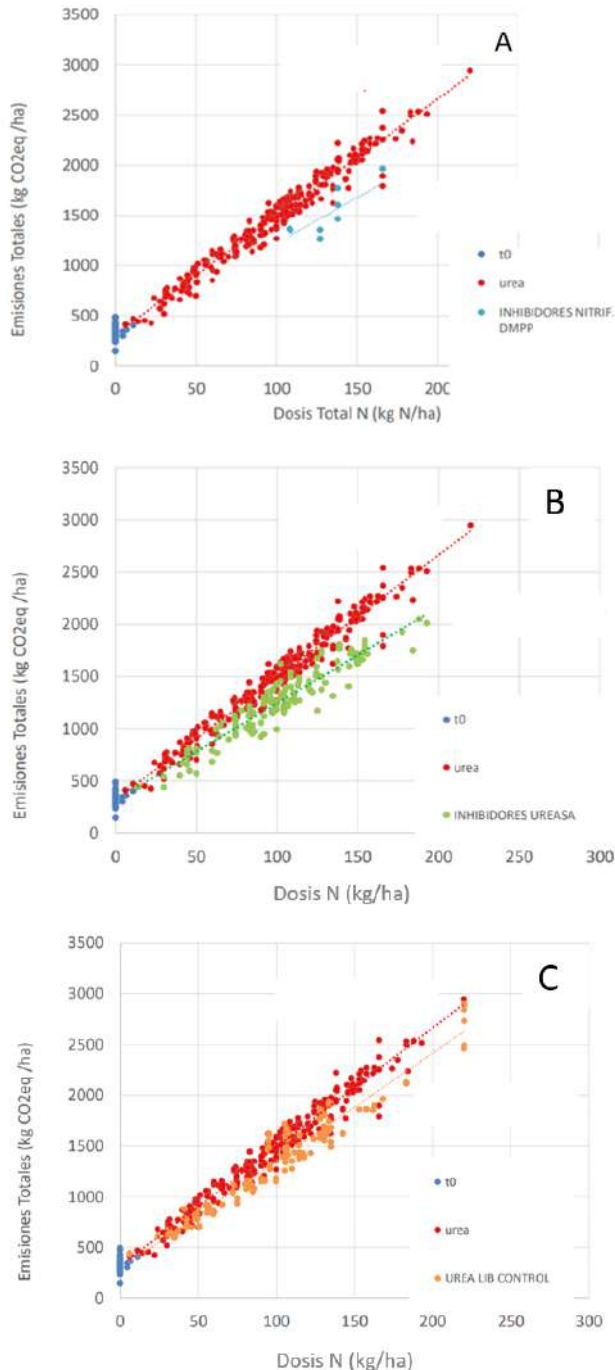


Figura 7. Emisiones totales de GEI de la urea granulada en comparación con inhibidores de la nitrificación (DMPP)(A); Inhibidores de la ureasa (nBPT o mezclas con nPPT) (B), y ureas de liberación controlada (C). Fuente: Profertil 2020.

Por otro lado, y a diferencia de lo mencionado antes para los inhibidores de la volatilización, en donde es posible predecir, hasta cierto punto, la efectividad de su aplicación conociendo la temperatura del suelo o del aire en el sitio de uso, predecir la respuesta al agregado de inhibidores de la nitrificación es un gran desafío. Esto se debe a que los eventos de excesos hídricos conducentes a pérdidas de N por desnitrificación o lixiviación de nitratos presentan un patrón mucho más variable y multifactorial. Factores como tipo y textura de suelo, concentración de nitratos, magnitud e intensidad de las lluvias, tipo de cultivo y profundidad de las raíces, método y momento de aplicación de N, entre otros factores, inciden en los fenómenos de lixiviación de nitratos.

Si bien existe cierta moda a hablar de “fertilizantes inteligentes” para referirse a la “nueva generación” de desarrollos de fertilizantes, y hay innovaciones relevantes que se pueden citar, quizás se debería enfatizar más la idea de la “fertilización inteligente” que va mucho más allá del tipo de fuente e incluye en sentido amplio el modelo conceptual de los 4 requisitos del manejo sustentable de nutrientes (4R). Es decir, definir adecuadamente la dosis del nutriente (diagnóstico), la fuente, el momento y la forma de aplicación. Desde este punto de vista, se puede capturar una gran parte de la eficiencia de la fertilización partiendo de un adecuado diagnóstico nutricional y ajustando los métodos y momentos de aplicación de los fertilizantes tradicionales, mientras que los FEM nos aportan nuevas opciones para ir más allá y seguir ganando en eficiencia de uso de los nutrientes y en la mitigación de pérdidas hacia el ambiente (e.g. aguas subterráneas o superficiales, atmósfera).

El mayor agregado de valor de cualquier innovación en nutrición vegetal, incluyendo a los FEM, se logra integrando el uso de las mismas al manejo integrado de nutrientes. Esto implica optimizar el diagnóstico de deficiencias nutricionales y la tecnología de la fertilización en sentido amplio, integrando diversas fuentes de nutrientes, incluyendo el uso de fertilizantes convencionales y también no convencionales como los residuos y efluentes pecuarios estabilizados y/o compostados, enmiendas minerales, aporte de nutrientes de cultivos de servicio, entre otros.

Los FEM son tecnologías que agregan valor para mejorar la productividad de los cultivos y sobre todo mejorar la sustentabilidad en el manejo del agroecosistema, por su capacidad de reducir significativamente las pérdidas de nutrientes fuera del sistema suelo-cultivo, aspecto que se debería considerarse y evaluarse en la gestión económica y ambiental de las empresas agropecuarias.

6. Bibliografía citada y recomendada

- Burzaco, J.P.; I. A. Ciampitti & T. J. Vyn. 2014. Nitrapyrin impacts on maize yield and nitrogen use efficiency with spring-applied nitrogen: field studies vs. meta-analysis comparison. *Agronomy Journal* 106 (2): 753-760.
- Calabi-Floody, J. Medina, C. Rumpel; L.M. Condrón, M. Hernández, M. Dumont & M. de la Luz Mora. 2018. *Advances in Agronomy*. Vol. 147. Chapter 3. p 119-157.
- Chien S.H., L.I. Prochnow and H. Cantarella. 2009. Recent Developments of Fertilizer Production and Use to Improve Nutrient Efficiency and Minimize Environmental Impacts. *Advances in Agronomy*, Vol 2, 102. Chapter 8 (268-322 p) Elsevier INC.
- Chien, S.H, Edmeades, D; R, McBride & K.L. Sahrawat. 2014. Review of maleic-itaconic acid copolymer purposed as urease inhibitor and phosphorus enhancer in soils. *Agronomy Journal*. Vol 106. Issue 2. p 423-430.
- Drechsel, P; P. Heffer; H. Magen, R. Mikkelsen & D. Wichelns. 2015. Managing water and fertilizers for sustainable agricultural intensification. International Fertilizer Industry Association (IFA). 270 p.
- Herrmann, C. y M. Torres Duggan. 2016. Fertilizantes y enmiendas de origen mineral: caracterización y uso en la Argentina. En: Suelos y Geología Argentina. 2016. Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios. Pereyra, F.X, Torres Duggan (editores). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS). Asociación Geológica Argentina (AGA). Universidad Nacional de Avellaneda (UNDAV). p 329-355.
- Profertil, 2020. departamento de I&D. Boletines técnicos N° 29 (<https://www.profertil.com.ar/index.php/cereales/maiz-cereales/bt-29-fertilizantes-estabilizados>) y N° 30 (<https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2021/06/BT-30-ETP-en-maiz.pdf>)
- Prystupa, P; Torres Duggan, M.; Ferraris, G. 2012. Tecnología de aplicación de micronutrientes en la Región Pampeana argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (IAH) N°5. Marzo. 19 p.
- Reetz, H. 2016. Fertilizers and their efficient use. International Fertilizer Industry Association (IFA). 114 p.
- Rodríguez, M.B; M Torres Duggan, I. de Igarzábal & E. Stingl. 2020. *Agronomía & Ambiente*. Revista de la Facultad de Agronomía de la UBA. 40 (2): 122-135
- Rodríguez, M.B. y M. Torres Duggan. 2021. Caracterización de los fertilizantes, enmiendas, abonos y su calidad agronómica. En: Fertilización de Cultivos y Fertilización en la Región Pampeana. R. Álvarez (Editor). Editorial Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (EFA). Capítulo 19 (391-425 p).
- Thapa, R.; Chatterjee, A.; Awale, R.; McGranahan, D. & A. Daigh. 2016. Effect of enhanced efficiency fertilizers on nitrous oxide emissions and crop yields: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal* 80: 1121-1134.
- Trenkel, M.E. 2010. Slow and controlled release and stabilized fertilizers. An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. IFA. Paris. 160 pp.
- Torres Duggan, M., Rodríguez, M.B; Lavado, R.S; Melgar, R. 2010. Eficiencia agronómica del azufre elemental relativa a una fuente azufrada soluble en trigo en la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo*. 28 (1). 67-77.
- Torres Duggan, M.; Melgar, R.; Rodríguez, M.B.; Lavado, R.S.; Ciampitti, I.A. 2012. Sulfur fertilization in the Argentine Pampas region: a review. *Agronomía & Ambiente*, 32 (1-2) 61-73.
- Torres Duggan, M., M. Tysko; C. Quinteros, M.A. Zamero y M.R. Befani. 2022. Aptitud agronómica de la roca fosfórica de Bahía Inglesa (Chile) en suelos argentinos. En actas digitales del XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (CACS). Ciudad de Buenos Aires (Argentina).
- Torres Duggan, M. y M. Tysko. 2022. Fertilización con roca fosfórica de Bahía Inglesa (Chile), en el cultivo de soja en la Pampa Ondulada. En actas digitales del XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (CACS). Ciudad de Buenos Aires (Argentina).
- Melgar, R & Torres Duggan, M. 2014. Manual de Fertilizantes Fluidos. Fluid Fertilizer Foundation (FFF). ISBN 978-987-33-5271-3. 184 pp
- Webber, C. & L. McCann. 2015. Adoption of nitrogen-efficiency technologies by U.S. corn farmers. *Journal of Environmental Quality* 44: 391-401.
- Wolt, J. D. 2004. A meta-analysis of nitrapyrin agronomic and environmental effectiveness with emphasis on corn production in the Midwestern USA. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 69: 23-41.
- Zapata, F & RN Roy (Eds). 2004. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. FAO. 127 p.



FERTILIZAR

ASOCIACION CIVIL

FERTILIZAR.ORG.AR

