

Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales

Edgar Javier Morales-Morales¹
Martín Rubí-Arriaga²
José Antonio López-Sandoval²
Ángel Roberto Martínez-Campos³
Edgar Jesús Morales-Rosales^{2§}

¹Posgrado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales-Universidad Autónoma del Estado de México-*Campus* Universitario El Cerrillo. Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. CP. 50200. (emoralesm374@gmail.com). ²Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento-*Campus* Universitario El Cerrillo. Piedras Blancas. Toluca, Estado de México. CP 50200. (mrubia@uaemex.mx; jalopezsa@uaemex.mx). ³Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales-*Campus* Universitario El Cerrillo, Piedras Blancas. Toluca, Estado de México. CP. 50200. (amartinezc@uaemex.mx).

§Autor para correspondencia: ejmoralesr@uaemex.mx.

Resumen

Los fertilizantes nitrogenados son necesarios, ya que gracias a ellos se mejora la producción de los cultivos. Después del agua y la temperatura se considera como el tercer factor en importancia en la producción de alimentos de origen vegetal. La urea como fertilizante, presenta la ventaja de proporcionar un alto contenido de nitrógeno (46%), el cual, es esencial en el metabolismo de la planta. La mayor desventaja que tiene es la pérdida de nitrógeno (N) en forma de gas amoníaco (NH₃), proveniente de su descomposición al ser aplicada al suelo. La urea de liberación lenta es utilizada para reducir las pérdidas por volatilización después de la fase de hidrólisis y por lixiviación luego de la nitrificación del amonio. Para reducir las pérdidas por volatilización y mantener una disponibilidad adecuada de N en el suelo, diferentes estrategias de manejo agronómico han sido evaluadas. La triamida N-(n-butil) tiofosfórica (NBPT), inhibidor de la ureasa, impide temporalmente la degradación enzimática de la ureasa y minimiza la pérdida por volatilización de NH₃, aumentando en consecuencia la absorción de N del fertilizante por el cultivo. El estudio se realizó durante 2018. En el documento elaborado se aborda el papel del N en las plantas cultivadas, algunas implicaciones ecológicas, el uso de la urea y especialmente se hace una recopilación de las características de la urea NBPT y de las investigaciones más relevantes sobre el uso de este fertilizante y su incidencia en el incremento del rendimiento en cultivos anuales.

Palabras clave: fertilizantes recubiertos, hidrólisis de urea, ureasa.

Recibido: septiembre de 2019

Aceptado: octubre de 2019

Con el objeto de mantener los niveles de producción agrícola, la demanda mundial de fertilizantes nitrogenados aumentó de 108.2 millones de toneladas (t) en 2011 a 109.9 millones de t en 2012, a una tasa de crecimiento de 1.6%. En 2018 se produjeron 116.0 millones de t, con un crecimiento de 1.3% (Cantarella *et al.*, 2018). Del aumento total de la demanda, de 7 millones de t de nitrógeno entre 2012 y 2018, el 50% sería de Asia, 16% de Estados Unidos de América, 13% de Europa, 7% de África y 1% de Oceanía. En América, se espera que la mayor parte del aumento sea de América Latina (13%), principalmente de Brasil, Argentina, Colombia y México (Félix, 2013). En este sentido, Cantarella *et al.* (2018) indican que del total de fertilizante a base de nitrógeno que se produzca en 2019, 55 % será urea.

El Nitrógeno (N) es el elemento químico que influye directamente en la producción agrícola en forma cuantitativa y cualitativa. Aumenta el área foliar, expansión foliar, grosor de hojas y tasa de fotosíntesis. El suministro de N mejora el proceso fotosintético y en consecuencia, se incrementa la duración del área foliar, tasa de asimilación neta, producción de biomasa y rendimiento (Khanzada *et al.*, 2016). Las deficiencias de este elemento reducen la producción de materia seca porque disminuye la radiación interceptada por el dosel vegetal y la eficiencia de conversión de esta energía en biomasa.

El N es absorbido por las plantas principalmente en forma de iones nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). Las plantas utilizan estas dos formas en sus procesos de crecimiento. Casi todo el N que absorben se halla en forma de nitrato. Existen dos razones: la primera, el nitrato es móvil en el suelo y se desplaza en el agua hacia las raíces de las plantas, donde es absorbido. Además, el amonio está ligado a la superficie de las partículas del suelo y no se puede mover hacia las raíces. La segunda, en condiciones adecuadas de temperatura, aireación, humedad y pH del suelo, los microorganismos transforman todas las formas de nitrógeno del suelo en nitrato (Galloway *et al.*, 2004).

Maddonni *et al.* (2004) mencionan que la respuesta de un cultivo a la aplicación de nitrógeno mediante la fertilización involucra tanto la absorción como su utilización para la producción de materia seca. La falta de respuesta de un cultivo a la nutrición nitrogenada puede estar relacionada a problemas en la absorción del nutriente debido al momento, forma de aplicación, tipo de fertilizante, cantidad disponible de nitrógeno inicial en el suelo y el contenido de humedad de este. La pérdida de N por volatilización de amoníaco es la principal causa de la baja eficiencia de la urea y de contaminación ambiental. En los últimos años se han introducido moléculas inhibitoras de hidrólisis de la ureasa, que disminuyen las pérdidas de N por volatilización.

La eficacia de estos inhibidores se sigue evaluando (Trenkel, 2010; Cantarella *et al.*, 2018). El objetivo de este ensayo fue recopilar información para conocer el papel del N en la agricultura, sus implicaciones ecológicas, la utilización de urea, y de urea NBPT como fertilizante de liberación lenta y su incidencia en el incremento de rendimiento en cultivos anuales.

Ciclo del nitrógeno en el suelo

La mayor parte de N en el suelo se encuentra formando parte de la materia orgánica, por lo que no es utilizable para el vegetal. Sólo alrededor 2% de este nitrógeno se hace disponible para las plantas al año. En la Figura 1 se presenta el ciclo del nitrógeno, el N de la materia orgánica se mineraliza por medio de dos procesos microbianos. En el primero, las proteínas y los compuestos relacionados

se descomponen en aminoácidos mediante la reacción denominada aminización. Los organismos del suelo obtienen energía a partir de este proceso y utilizan parte del N de los compuestos aminados en su propia estructura celular.

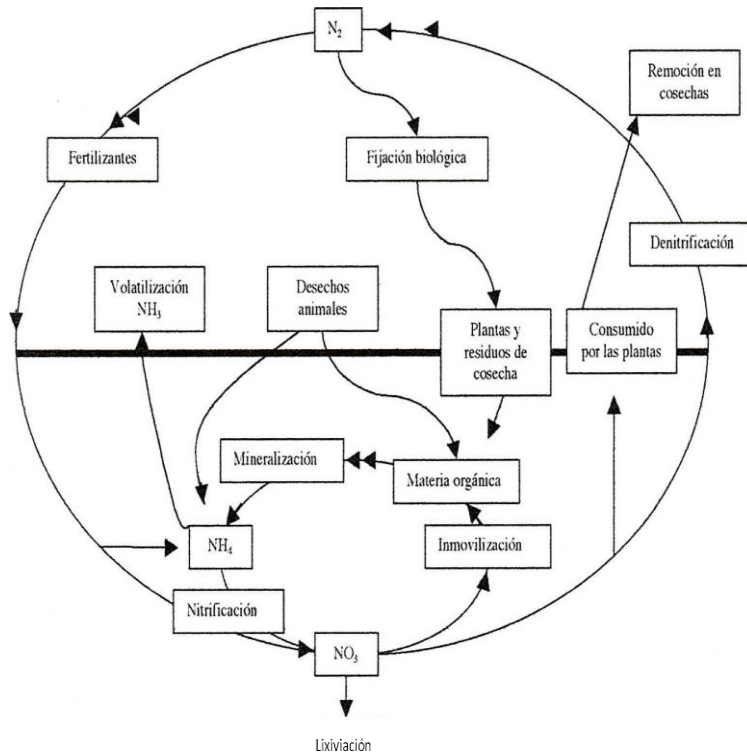
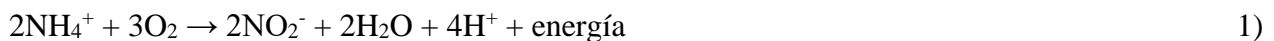


Figura 1. Ciclo del nitrógeno. Adaptado de Beegle (2004) y tomado de Elizondo (2006).

En el segundo proceso, llamado amonificación los compuestos aminados se transforman en amoníaco (NH₃) y amonio (NH₄⁺). Los dos procesos, aminización y amonificación, se conocen como mineralización (Cantarella *et al.*, 2018). El amonio es convertido en nitrato principalmente por dos grupos de bacterias. Las del género *Nitrosomonas* convierten el amonio en nitrito.



Luego, nitrobacter convierte el nitrito en nitrato.



Este proceso de dos etapas, se le llama nitrificación. La tasa de nitrificación en los suelos es fuertemente dependiente de la temperatura, el contenido de agua y el pH del suelo. La temperatura óptima para la nitrificación varía dependiendo de la ubicación geográfica y la profundidad del suelo. Esta variación es aparentemente causada por la adaptación de las bacterias al ambiente. Consecuentemente, suelos de áreas frías tienen una temperatura óptima menor para la nitrificación que suelos de áreas más cálidas. Similarmente, suelos con horizontes profundos, los cuales son usualmente expuestos a bajas temperaturas, poseen temperaturas óptimas menores para la nitrificación que los horizontes superficiales.

Los nitrificadores necesitan agua y oxígeno para llevar a cabo la oxidación del amonio y nitrato. Las condiciones óptimas para la oxidación se han encontrado cuando el suelo está a capacidad de campo. El pH del suelo tiene un efecto fuerte en la tasa de nitrificación. En general, la nitrificación se detiene una vez que los valores de pH caen debajo de 4.5 o se incrementan por arriba de 9. La inhibición observada a bajos valores de pH puede ser causada por elevados niveles tóxicos de aluminio o altas concentraciones de ácido nitroso. En contraste, la inhibición observada con valores de pH elevados es generalmente causada por altos niveles de amonio en la solución del suelo (Cabrera, 2007).

Pérdidas de nitrógeno y su efecto ambiental

Las mayores pérdidas de nitrógeno del suelo se deben a la remoción por cosechas, a la volatilización y a la lixiviación. En caso de un exceso de humedad, el nitrógeno mineral (NO_3^-) puede lixiviarse más allá del alcance de los cultivos de raíces comestibles. La lixiviación se define como el movimiento hacia abajo del NO_3^- ; a través, del suelo por infiltración y flujo del agua. Adicionalmente, bajo ciertas condiciones, algunas formas inorgánicas de nitrógeno se pueden convertir a gases y perderse hacia la atmósfera. Las principales rutas son la denitrificación y la volatilización (Galloway *et al.*, 2004).

Denitrificación

La denitrificación es el proceso opuesto a la fijación biológica en la cual los óxidos de nitrógeno (NO_3^- y NO_2^-) son reducidos paso a paso por la enzima reductasa a óxido nítrico (NO) y óxido nitroso (N_2O), que finalmente se transforma en nitrógeno gaseoso (N_2), lo que implica pérdida de N del suelo a la atmósfera y polución ambiental. (Trenkel, 2010). Cuando se proporciona un abundante suministro de nitrógeno, la denitrificación da como resultado una importante pérdida de nitrógeno, que podía haberse utilizado por los cultivos (Loomis y Connor, 2002; Galloway *et al.*, 2004).

Los organismos más activos en la denitrificación, son las bacterias de los grupos de la *Alcaligenes*, *Bacillus* y *Pseudomonas* abundantes en el suelo. La característica principal de su metabolismo es que bajo condiciones anaerobias usan más nitrato que oxígeno como aceptor de electrones para la actividad respiratoria. Este proceso puede ocurrir en suelos de texturas finas con mal drenaje o en suelos bien drenados durante periodos breves de saturación. El N aplicado a los cultivos como fertilizante no es recuperado completamente por éstos. Los gases emitidos es N_2O , compuesto que incrementa el efecto invernadero en concentraciones de $0.6\text{-}0.9 \mu\text{L m}^{-3} \text{año}^{-1}$ y contribuye al delgazamiento de la capa de ozono (Maddonni *et al.*, 2004; Mora *et al.*, 2007; Grisell *et al.*, 2007).

Volatilización

El NH_3 es un gas volátil y se dispersa a la atmósfera desde las soluciones acuosas. En el agua:



Este equilibrio depende del pH de la solución del suelo, por encima de un pH de 5 las pérdidas gaseosas aumentan. Es por ello que la volatilización ocasiona mermas significativas en suelos secos, ácidos y calcáreos (Loomis y Connor, 2002; Maddonni *et al.*, 2004). La pérdida de N por

volatilización de NH_3 puede ser la principal causa de la baja eficiencia de algunos fertilizantes amoniacales. La gasificación de amoníaco es una importante vía de dispersión de N en fertilizantes nitrogenados que poseen urea en su formulación y son aplicados sobre la superficie del suelo.

La magnitud de las mermas en ‘siembra directa’ es afectada por factores ambientales (humedad, temperatura y viento), de suelo (pH, capacidad buffer, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica) y de cultivo (cantidad y tipo de residuos de cosecha), fuente y dosis de N. A su vez, una rápida hidrólisis de la urea resulta en mayores pérdidas de NH_3 , debido a que su velocidad depende de la actividad ureásica (Barbieri *et al.*, 2010).

Lixiviación

La lixiviación de nitratos (NO_3^-) es inevitable a pesar de la implementación de mejores prácticas agrícolas, tales como el manejo del recurso hídrico y la adecuada fertilización nitrogenada. El nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se encuentra en la naturaleza, en la actualidad es reconocido como un contaminante de las aguas para consumo humano (Baeta, 2016). Las pérdidas de nitratos varían de acuerdo con las fases fenológicas de las plantas, siendo mayor en las etapas de germinación, crecimiento y desarrollo, disminuyendo en la etapa de cosecha; igualmente es independiente de la fuente de fertilizante (Reyes *et al.*, 2012).

En síntesis, la denitrificación, volatilización y lixiviación, disminuyen la eficiencia del uso del nitrógeno que se adiciona, se estima que únicamente la mitad de N en forma de fertilizante aplicado a los cultivos es incorporada en la biomasa de éstos, mientras que la otra mitad se pierde en forma gaseosa a la atmósfera o se lixivia desde el suelo hacia cuerpos de agua (Galloway *et al.*, 2003; Vivian *et al.*, 2018). El N al pasar por otros ecosistemas terrestres, reduce la biodiversidad, contamina el aire, el agua y agrava el calentamiento global (Schlesinger, 2009; Baeta *et al.*, 2016).

Urea

La urea es la principal fuente de fertilización nitrogenada en el mundo, especialmente en países en desarrollo; las ventajas de este fertilizante con relación a otros son: mayor contenido de N se puede incorporar al suelo previo a la siembra y al ser un fertilizante de reacción ácida, se puede utilizar en suelos neutros o ligeramente alcalinos, además de su bajo costo de transporte por unidad de N y un manejo más seguro (Trenkel, 2010; Cantarella *et al.*, 2018). Para producirla, se hacen reaccionar amoníaco y dióxido de carbono en presencia de un catalizador, en un recipiente especial a temperaturas entre 170 y 210 °C y presiones que oscilan entre 170 a 400 atmósferas. Las reacciones son las siguientes (Galloway *et al.*, 2004).



El líquido concentrado proveniente de estas reacciones contiene cerca de 80% de urea. Este producto puede diluirse para emplearlo en forma de soluciones o bien puede concentrarse aún más y perlarse o granularse para obtener urea sólida (Galloway *et al.*, 2004). Debido a su alta solubilidad, se puede disolver y aplicarse en el agua de riego. En aplicaciones foliares, puede ser absorbidas rápidamente por las hojas. Una vez que la urea entra en contacto con el suelo o las plantas, la ureasa la convierte rápidamente en NH_3 . Durante este proceso, el N contenido en la urea es susceptible a pérdidas gaseosas por volatilización como NH_3 (Witte *et al.*, 2011).

Barbieri *et al.* (2010) confirman lo anterior, ya que encontraron que las pérdidas por volatilización de N como amoníaco revisten importancia cuando los fertilizantes nitrogenados aplicados contienen urea en su formulación. La importancia del momento y forma de aplicación, además de la dosis de fertilizante empleado, pueden inducir un mejoramiento en la eficiencia de absorción.

Pérdidas por volatilización de NH_3 a partir de urea, hasta de 30 kg N ha^{-1} , cuando fue aplicada al voleo, equivalentes a 25% de pérdida del fertilizante adicionado. En evaluaciones efectuadas en un cafetal de la zona central de Colombia en crecimiento vegetativo, encontraron que después de 20 días de la fertilización nitrogenada en la superficie del suelo, el acumulado de la volatilización de nitrógeno en la urea granulada fue de 20%. En cuanto al momento de aplicación, si se suministra el fertilizante durante la máxima demanda de nitrógeno de la planta, se puede reducir la inmovilización y las pérdidas del sistema suelo-planta y por lo tanto, se puede incrementar la eficiencia en el uso de nitrógeno.

En este sentido, los cereales de grano pequeño absorben hasta 90% del nitrógeno antes de la etapa de hoja bandera. Ballesteros *et al.* (2015) indicaron que cuando se aplica la totalidad de nitrógeno en la etapa de amacollamiento en triticale para forraje, no se justifican posteriores fraccionamientos del fertilizante. Referente al suministro fraccionado de urea, se han realizado diversas investigaciones, entre las que destacan.

Pino y Añez (1997) quienes encontraron que el fraccionamiento de urea no produjo efecto sobre el rendimiento ni sobre la conformación de las cabezas en lechuga; sin embargo, Pichardo *et al.* (2007) en una investigación en haba cultivar ‘cochinera’, reportaron que con la aplicación fraccionada de 132 kg N (50% al momento de sembrar y 50% a los 40 días después de la siembra), se logró mayor eficiencia en el uso de la radiación para biomasa (1.05 g MJ^{-1}), eficiencia en el uso del agua para biomasa y rendimiento (3.49 y $1.24 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$, respectivamente) y en consecuencia, mayor biomasa y rendimiento con $1\ 046.9$ y 371.3 g m^{-2} , respectivamente.

Escalante *et al.* (2015), en un experimento realizado en frijol ‘cacahuate’ en Montecillo, México, concluyeron que el suministro de 50 kg N al momento de sembrar y 50 kg N a los 40 días después de la siembra, se incrementó la biomasa (12.5%) y el rendimiento de grano (36.9%), respecto al tratamiento testigo (0 kg N). El tipo de fertilizante nitrogenado ideal, hoy día se considera que el insumo deba poseer al menos tres características fundamentales (Shavit *et al.*, 2013): 1) que sólo necesite una única aplicación a lo largo del período de crecimiento de la planta, con la proporción de nitrógeno requerido para el desarrollo óptimo de la misma; 2) presentar un máximo de productividad agronómica; y 3) tener efectos perjudiciales mínimos en la tierra, agua y ambiente.

Una estrategia para adicionar urea a las plantas cultivadas e incrementar su rendimiento, consiste en usar fertilizantes de liberación lenta (NBPT). La industria de fertilizantes ha desarrollado un tipo especial de urea que evita, o al menos reduce, las pérdidas y minimiza la polución ambiental (Trenkel, 2010).

Urea NBPT

La fertilización nitrogenada debe considerar las visiones agronómica y ambiental como el rendimiento del cultivo y menor contaminación para contribuir a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas; los abonos de liberación lenta integran estas dos visiones (Zaman *et al.*, 2013). El

principal proceso de obtención de los fertilizantes de liberación controlada este dado en proteger por recubrimiento o microencapsulación un fertilizante convencional, haciéndolo un material semipermeable, controlando la penetración del agua y de liberación de los nutrientes más solubles presente en el fertilizante convencional, siendo estos utilizados por las plantas de acuerdo a sus necesidades (Watson *et al.*, 2008; Shavit *et al.*, 2013).

Una variedad de revestimientos se ha aplicado a las partículas de fertilizantes para regular su solubilidad en el suelo. Estos aditivos son compuestos químicos que retrasan y estabilizan la liberación del nitrógeno de los fertilizantes. Controlar la velocidad de liberación de nutrientes puede ofrecer múltiples beneficios de rendimiento, económicos y ambientales. Los revestimientos se aplican con mayor frecuencia a fertilizantes de nitrógeno granulados o perlados. Dado que la urea tiene el más alto contenido de N dentro de los fertilizantes solubles comunes, es el material base para la mayoría de los fertilizantes recubiertos (Prasad y Shivay, 2015).

Para retrasar la hidrólisis, se ha propuesto aplicar la urea en asociación con inhibidores de la ureasa, así la molécula favorece la asimilación por las raíces durante un largo plazo, que actúa esencialmente como un fertilizante nitrogenado de liberación lenta (Prasad y Shivay, 2015; Vivian *et al.*, 2018). La urea revestida con polímero libera lentamente el nitrógeno al sistema suelo-planta, y sólo se aplica en la siembra. El uso de urea NBPT puede reducir pérdida de amoníaco 50% a 60% en comparación con la urea no tratada (Lema *et al.*, 2017). Los inhibidores de la ureasa proporcionan a los agricultores una herramienta adicional para mantener el N aplicado en la zona radical, ocasionando mayor aprovechamiento agronómico del elemento y beneficios ambientales.

Los inhibidores de la ureasa disminuyen la tasa de volatilización del amoníaco e incrementan la disponibilidad del nutrimento para la planta (Cantarella *et al.*, 2018). Respecto a la lixiviación, la adición de urea NBPT reduce la acumulación de nitratos en los mantos freáticos (Zaman *et al.*, 2013). Existen evidencias en cultivos anuales que muestran las bondades de utilizar este tipo de fertilizante. La utilización de urea NBPT en arroz, redujo las pérdidas por la volatilización del amoníaco en comparación con la urea convencional; la magnitud de la efectividad de añadir NBPT a la urea está asociada a las condiciones del suelo y clima (Baeta *et al.*, 2016).

Li *et al.* (2015) reportan en trigo de invierno, que altas cantidades de NH_3 volatilizado oscilaron entre 11% y 25% de urea simple aplicada en suelos en el norte y noroeste de China; sin embargo, cuando usaron urea modificada con NBPT las pérdidas de NH_3 disminuyeron 83% en comparación con la urea convencional. Vivian *et al.* (2018) al investigar la efectividad de la urea NBPT para reducir la volatilización de NH_3 en maíz de verano sembrado en diferentes suelos y condiciones ambientales, encontraron que los factores meteorológicos como la precipitación, la temperatura del aire y la velocidad del viento afectaron significativamente la volatilización del NH_3 en la urea convencional.

Estos resultados sugieren que el uso de urea NBPT tiene el potencial de mitigar las pérdidas de NH_3 de los suelos alcalinos en la meseta de Loess, China. En este sentido, Maqsood *et al.* (2016) en suelos calcáreos de Pakistán, encontraron que el uso del inhibidor de la ureasa triamida N-(n-butyl) tiofosfórica (NBPT) ha mostrado reducción significativa de la volatilización de N. Ousman y Alemayehu (2015) concluyen que el uso de inhibidores de la ureasa, mejoran notablemente la absorción de nitrógeno, reducen la vaporización, nitrificación y lixiviación.

Suministro de urea NBPT y rendimiento de maíz

Barbieri *et al.* (2010) en un experimento en maíz sembrado en Balcarce, Argentina, determinaron que la volatilización de NH_3 fue mayor en urea respecto a urea NBPT. No obstante, no se incrementó significativamente el rendimiento, contenido de N en grano, ni en la eficiencia en el uso de nitrógeno. Una respuesta similar fue descrita por Zamudio *et al.* (2018) en ensayos conducidos en Ixtlahuaca, Villa Victoria y Temascalcingo, México, donde probaron seis híbridos de maíz y dos tipos de urea (convencional y estabilizada), no encontraron diferencias significativas en el rendimiento de grano en respuesta al tipo de fertilizante.

Gagnon *et al.* (2012) en varios experimentos en maíz realizados en el este de Canadá, evaluaron el suministro de urea y urea recubierta, concluyeron que la magnitud de la respuesta varió con los años. En años húmedos (2008 y 2009) con la adición de urea NBPT (150 kg N ha^{-1}), se logró un incremento en el rendimiento de grano de 0.8 t ha^{-1} en 2008 y de 1.6 t ha^{-1} en 2009, respecto a la urea común. Vivian *et al.* (2018) en experimentos de maíz realizados en Tennessee, concluyeron que aplicando 150 kg ha^{-1} de urea recubierta con polímero, el rendimiento de grano se acrecentó en promedio en 2 t ha^{-1} respecto a la urea.

Suministro de urea NBPT en trigo

Espíndula *et al.* (2016) al investigar en trigo en Brasil reportaron que con la aplicación de urea de liberación lenta se elevó el rendimiento de grano sobre la urea común. Con 60 kg N ha^{-1} de urea NBPT se obtuvo 37.5% más rendimiento de grano y 38% más de N absorbido con relación al suministro de 60 Kg N ha^{-1} de urea normal. Giannoulis *et al.* (2016), probando diversas dosis de urea NBPT en trigo duro, descubrieron que con 120 kg ha^{-1} , el cereal alcanzó un rendimiento de $4\ 900 \text{ kg ha}^{-1}$, superando a los tratamientos 180 kg ($4\ 880 \text{ kg ha}^{-1}$) y 160 kg ($4\ 290 \text{ kg ha}^{-1}$) en producción de grano.

Dawar *et al.* (2011) condujeron un experimento en campo para investigar el impacto del inhibidor de la ureasa NBPT en el rendimiento de grano y contenido de proteína en trigo, con respecto a la urea convencional, en ambos tratamientos se adicionaron 200 kg ha^{-1} de N. Con la urea NBPT se aumentó la producción de grano y proteína ($6\ 229$ y $1\ 084 \text{ kg ha}^{-1}$) con relación a la urea ($5\ 112$ y 683 kg ha^{-1}); es decir, hubo un aumento de 18% y 37% en rendimiento de grano y proteína total, respectivamente.

En una investigación realizada en Cantenbury, Nueva Zelanda, se evaluó el efecto de diferentes dosis de urea con y sin inhibidor de la ureasa NBPT en el rendimiento y calidad de trigo, Zaman *et al.* (2010) concluyeron que con 300 kg N ha^{-1} de urea NBPT se produjo 11% más de rendimiento de grano y 15.7% más de proteína con relación a la urea convencional.

Suministro de urea NBPT en otros cultivos

En Dera, Pakistán durante los años 2010 y 2011, se establecieron experimentos en condiciones de campo con el objetivo de evaluar la eficacia de la urea aplicada con inhibidor, para minimizar el estrés abiótico en el cultivo de papa. La urea tratada a razón 300 kg N ha^{-1} aumentó el rendimiento de tubérculo 51%. La producción de papa fue de 18.8 y 36.8 t ha^{-1} para urea y urea NBPT, respectivamente (Khan *et al.*, 2014).

Piña *et al.* (2014) efectuaron una investigación donde asociaron girasol y chícharo (*Pisum sativum* L.) en función de diferentes niveles de urea de liberación lenta (NBPT) encontrando que con 80 kg ha⁻¹ se maximizó la producción de aquenio (285.8 g m⁻²) y vaina verde (274.8 g m⁻²) respecto al testigo sin fertilizante (112.5 y 169.8 g m⁻², respectivamente).

En una cámara de crecimiento, se evaluó el efecto de la urea NBPT, sobre la fisiología y crecimiento del algodón (*Gossypium hirsutum* L.) en condiciones normales y de alta temperatura. La adición de NBPT al fertilizante tuvo efectos positivos sobre la clorofila de la hoja, el área foliar, la materia seca, la absorción de nitrógeno (N) y la eficiencia del uso de N. La ausencia de un efecto de interacción significativo indicó que la fertilización con N no fue influenciada por la temperatura (Kawakami *et al.*, 2013).

Zaman *et al.* (2013) en tres sitios en Nueva Zelanda, investigaron el efecto del inhibidor de la ureasa solo y en combinación con el inhibidor de la nitrificación dicyandiamida (DCD) en praderas. Los resultados de los ensayos mostraron que el tratamiento de la urea granular con un inhibidor de la ureasa (NBPT) acrecentó la producción de los pastos y la eficiencia en el uso de nitrógeno. El aumento en la producción de biomasa se atribuye a pérdidas reducidas de N a través de NH₃, a un aumento de la dispersión de urea y a una tasa menor de nitrificación.

Discusión

Diversos estudios, indican que un exceso de fertilización nitrogenada tiene repercusiones en el ambiente. La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) tiene relación estrecha con el uso excesivo de fertilizantes amoniacales como la urea, ya que estos aumentan la emisión de amoníaco (NH₃), nitrógeno molecular (N₂) y óxido nitroso (N₂O). El óxido nitroso es producido por microorganismos del suelo por denitrificación. La magnitud de este proceso aumenta en suelos con alta disponibilidad de nitratos y elevados contenidos hídricos. El óxido nitroso es un GEI que posee aproximadamente 300 veces más efecto de calentamiento atmosférico, respecto al dióxido de carbono (Mora *et al.*, 2007; Grisell *et al.*, 2007).

Para ampliar su eficiencia la aplicación de urea además de considerar el pH, contenido de humedad del suelo y nitrógeno disponible entre otros, debe darse un adecuado manejo agronómico, que incluye el tipo de aplicación, evitando el esparcimiento del fertilizante al 'voleo' (Nelson *et al.*, 2014). El momento óptimo de aplicación y dosis de fertilizante son relevantes, ya que se debe ajustar la cantidad y sincronizar el suministro del elemento con las necesidades de absorción del cultivo. La aplicación dividida o fraccionada de urea está íntimamente relacionada con el punto anterior, así lo destacan las investigaciones de Pichardo *et al.* (2007) en haba y de Escalante *et al.* (2015) en frijol cv. cacahuete.

El tipo de urea empleado es relevante para incrementar la eficiencia de este insumo. Las ventajas que presenta la urea NBPT sobre la urea es amplia. Al inhibir la acción de la ureasa, permite que la hidrólisis se produzca en condiciones óptimas, minimizando la volatilización de amoníaco aproximadamente 60%. Asimismo, al favorecer que la hidrólisis se produzca de forma controlada, la urea NBPT minimiza la lixiviación de nitratos gracias a la menor presencia de nitrógeno en forma amoniacal, susceptible de ser nitrificado, como consecuencia de esto la contaminación de mantos acuíferos es menor (Vivian *et al.*, 2018).

Desde el punto de vista agronómico, las bondades de utilizar urea de liberación lenta son amplias, ya que limita las pérdidas de nitrógeno y en consecuencia existe un mejor aprovechamiento del elemento químico. Además, se hace una sola aplicación y el nutrimento permanece disponible durante toda la estación de crecimiento del cultivo. Puede adicionarse superficialmente e incrementa la eficiencia del fertilizante (Trenkel, 2010; Prasad y Shivay, 2015; Vivian *et al.*, 2018).

El suministro de urea NBPT, se ha evaluado con éxito en cultivos básicos como maíz, trigo, papa, girasol, algodón, chícharo y praderas, donde diversos investigadores reportan incrementos en el rendimiento por unidad de superficie y una mayor eficiencia en el uso de nitrógeno (Dawar *et al.*, 2011; Gagnon *et al.*, 2012; Kawakami *et al.*, 2013; Zaman *et al.*, 2013; Khan *et al.*, 2014; Piña *et al.*, 2014; Espíndula *et al.*, 2016; Giannoulis *et al.*, 2016; Vivian *et al.*, 2018).

Conclusiones

La urea de liberación lenta (NBPT) es una alternativa que los productores tienen para nutrir en forma adecuada a sus cultivos, al potenciar la asimilación y distribución de nitrógeno durante toda la estación de crecimiento. Comparado con la urea convencional, estudios de campo evidencian un incremento sustancial en la producción, lo que indica, que es una opción viable para acrecentar el rendimiento de las cosechas por unidad de superficie. Al liberar de manera gradual el fertilizante al suelo, las pérdidas por volatilización de gases nitrogenados tóxicos y la lixiviación de nitratos disminuyen, fomentando la Agricultura Sostenible y la conservación del ambiente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por la beca que actualmente le proporciona al estudiante de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales Edgar Javier Morales Morales.

Literatura citada

- Ballesteros, R. E.; Morales, R. E. J.; Franco, M. O.; Santoyo, C. E.; Estrada, C. G. y Gutiérrez, R. F. 2015. Manejo de fertilización nitrogenada sobre los componentes del rendimiento de triticale. *Rev. Mex. de Cienc. Agríc.* 6(4):721-733.
- Baeta, S. A.; Kumar, F. N.; Stone, L. F. and Baeta, T. P. 2016. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on the agronomic traits and yield of irrigated rice. *Rev. Ceres, Vicosa.* 63(5):724-731.
- Barbieri, P. A.; Echeverría, H. E.; Sainz, R. H. R. y Mangnolo, M. 2010. Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: Pérdida por volatilización y eficiencia en el uso de nitrógeno. *Ci. Suelo.* 28(1):57-66.
- Cabrera, L. M. 2007. Mineralización y nitrificación: procesos claves en el ciclo del nitrógeno. *Inf. Agron. del Cono Sur.* 34(1):1-26.
- Cantarella, R. H.; Otto, J.; Aijânio, R. S. and Brito, G. S. 2018. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor. *J. Adv. Res.* 13(1):19-27.
- Dawar, K.; Khan, I.; Khan, S. and Khan, M. I. 2011. Impact of urease inhibitor (NBPT) and herbicide on wheat yield and quality. *Pak. J. Weed Sci. Res.* 17(2):187-194.
- Elizondo, S. J. 2006. El nitrógeno en los sistemas ganaderos de leche. *Agronomía Mesoamericana* 17(1):69-77.

- Escalante, E. J. A. S.; Rodríguez, G. M. T. y Escalante, E. Y. I. 2015. Nitrógeno, distancia entre surcos, rendimiento y productividad del agua en dos cultivares de frijol. *Bioagro*. 27(2):75-82.
- Espíndula, M. C.; Campanharo, M.; Jairo, R. M. D.; Valterley, S. R.; Moacil, A. S. and Menoncin, G. 2016. Yield and nitrogen recovery of wheat plants subjected to urea application with or without a urease inhibitor in the absence of irrigation. *Cien. Inv. Agr.* 43(2):317-325.
- Félix, B. E. I. 2013. Tendencias actuales de los fertilizantes y perspectivas para 2016. *C. Agro*. 237(1):40-48.
- Galloway, J. N.; Aber, J. D.; Erisman, J. W.; Seitzinger, S. P.; Howarth, R. W.; Cowling, E. B. and Cosby, B. J. 2003. The nitrogen cascade. *BioSci*. 53(4):341-356.
- Galloway, J. N.; Dentener, F. J.; Capone, D. G.; Boyer, E. W.; Howarth, R. W. and Seitzinger, S. P. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochem*. 70(2):153-226.
- Gagnon, B.; Ziadi, N. and Grant, C. 2012. Urea fertilizer forms affect grain corn yield and nitrogen use efficiency. *Can. J. Soil Sci.* 92(2):341-351.
- Giannoulis, K. D.; Bartzialis, D.; Skofogianni, E. and Danalatos, G. N. 2016. The use of urease inhibitor fertilizers (Agrotain) and their effect on cereal crops and cotton yield. *Agro. Inter*. 1(2):77-87.
- Grisell, S. M. R.; Gavi, R. F.; Peña, C. J. J.; Pérez, M.; Tijerina, Ch. L. y Vaquera, H. H. 2007. Denitrificación de un fertilizante de lenta liberación y urea + fosfato monoamónico aplicados a trigo irrigado con agua residual o de pozo. *Rev. Int. Contam. Ambient*. 23(1):25-33.
- Kawakami, M. E.; Derrick, O. M. and Snider, L. J. 2013. Influence of high temperature and urea fertilization with n-(n-butyl) thiophosphoric triamide and dicyandiamide on cotton growth and physiology. *J. Plant Nutr.* 36(10):1615-1639.
- Khan, I.; Zaman, M.; Khan, M. J.; Iqbal, M. and Babar, M. N. 2014. How to improve yield and quality of potatoes: effects of two rates of urea N, urease inhibitor and cytozyme nutritional program. *J. Soil Sci. and Plant Nutr.* 14(2):268-276.
- Khanzada, A.; Ali, M.; Hussain, B.; Rajput, A.; Hussain, F. and Ali, U. 2016. Evaluating right timing splitting nitrogen application rates for enhanced growth and yield of sunflower. *Euro Academ. Res.* 4(7):5986-6007.
- Lema, A. A. C.; Basantes, M. E. R. y Pantoja, G. J. L. 2017. Producción de cebada (*Hordeum vulgare* L.) con urea normal y polimerizada en Pintag, Quito, Ecuador. *Agron. Mesoam*. 28(1):97-112.
- Li, Q.; Yanga, A.; Wang, Z.; Roelckec, M.; Chena, X.; Zhanga, F.; Pasda, G.; Zerulla, W.; Wissemeyer, A. H. and Liua, X. 2015. Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China. *Field Crop Res.* 175(1):96-105.
- Loomis, R. S y Connor, D. J 2002. *Ecología de cultivos*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España. 591 p.
- Maddoni, A. G.; Vilariño, P. y García, S. I. 2004. Dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-planta. *In: Satorre, H. E.; Benech, A. R. L.; De la Fuente, E. B.; Slafer, G. A; Miralles, D. J.; Otegui, M. E, and Savín, R. (Eds.). Producción de granos: bases funcionales para su manejo*. Ed. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 406-477 pp.
- Maqsood, M. A.; Awan, U. K.; Tariq, A.; Arshad, H.; Ashraf, N. and Ali, M. 2016. Nitrogen management in calcareous soils: Problems and solutions. *Pak. J. Agri. Sci.* 53(1):79-95.
- Mora, S. G.; Gavi, F.; Peña, J. J.; Pérez, J.; Tijerina, L. y Vaquera, H. 2007. Denitrificación de un fertilizante de lenta liberación y urea + fosfato mono-amónico aplicados a trigo irrigado con agua residual o de pozo. *Rev. Int. Contam. Ambient*. 23(1):25-33.

- Nelson, K. A.; Motavalli, P. P. and Nathan, M. 2014. Nitrogen fertilizer sources and application timing affects wheat and inter-seeded red clover yields on claypan soils. *Agronomy*. 4(4):497-513.
- Ousman, K. Y. and Alemayehu, W. M. 2015. Effects of nitrogen inhibitors and slow nitrogen releasing fertilizers on crop yield, nitrogen use efficiency and mitigation of nitrous oxide (N₂O) emission. *J. Agric. Environ. Sci.* 1(2):108-120.
- Prasad, R. and Shivay, Y. S. 2015. Fertilizer nitrogen of the life, agriculture and environment. *Indian J. Fert.* 11(8):47-53.
- Pichardo, R. J. C.; Escalante, E. J. A. S.; Díaz, R. R.; Quevedo, N. A.; Volke, H. V. y Morales, R. E. J. 2007. Rendimiento y eficiencia en el uso del agua de cultivares de haba (*Vicia faba* L.) para doble propósito. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 19(1):71-84.
- Pino, H. y Añez, B. 1997. Forma y tiempo de aplicación de nitrógeno en la producción de lechuga. *Rev. Forest. Venezolana* 41(1):87-88.
- Piña, G. J. L.; Morales, R. E. J.; Domínguez, L. A.; Ramírez, D. J. F.; Estrada, C. y Franco, M. O. 2014. Razón equivalente de la tierra, rendimiento de grano y extracto etéreo de *Helianthus annuus* L. en monocultivo y asociado con *Pisum sativum* L. en función de urea estabilizada. *Python*. 83(1):101-108.
- Reyes, A.; Figueroa, U.; Ochoa, E.; Verastegui, J.; Sánchez, J. I. y Núñez, G. 2012. Lixiviación de nitratos provenientes de estiércol y fertilizante en forrajes cultivados en lisímetros de volumen. *Explotación Racional y Monitoreo de Ecosistemas. Agrofaz.* 12(4):95-101.
- Rochette, P.; Angers, D. A.; Chantigny, M. H.; Gasser, M. O.; MacDonald J. D.; Pelster, D. E. and Bertrand, N. 2013. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea? *J. Environ. Qual.* 42(6):1635-1642.
- Schlesinger, H. W. 2009. On the fate of anthropogenic nitrogen. *PNAS.* 106(1):203-208.
- Shavit, U.; Reiss, M. and Shaviv, A. J. 2013. Wetting mechanisms of gel-based controlled-release fertilizers. *J. Controlled Release.* 88(1):71-83.
- Trenkel, M. E. 2010. Slow-and controlled-release and stabilized fertilizers. An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. *International Fertilizer Industry Association. Paris, France* 133 p.
- Vivian, Z.; Larson, J. A.; Yinb, X.; Savoyc, H. J.; McClureb, A. M.; Essingtonc, M. E. and Boyera, Ch. N. 2018. Profitability of enhanced efficiency urea fertilizers in no-tillage corn production. *Agron. J. Abs. - Crop Econ. Prod. Manag.* 110(4):1439-1446.
- Watson, C. J.; Akhonzada, N. A.; Hamilton, J. T. and Matthews, D. 2008. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Use Manag.* 24(3):246-253.
- Witte, C. 2011. Urea metabolism in plants. *Plant Sci.* 180(3):431-438.
- Zaman, M.; Nguyen, M. L. and Blennerhassett, J. D. 2010. The effect of different rates of urea with or without urease inhibitor (NBPT) on wheat yield and quality. *Agric. J.* 5(5):309-312.
- Zaman, M.; Zaman, S.; Adhinarayanan, C.; Nguyen, M. L.; Nawaz, S. and Dawar, K. M. 2013. Effects of urease and nitrification inhibitors on the efficient use of urea for pastoral systems. *Soil Sci. Plant Nutr.* 59(4):649-659.
- Zamudio, G. B.; Félix, R. A.; Martínez, G. A.; Cardoso, G. J. C.; Espinosa, C. A. y Tadeo, R. M. 2018. Producción de híbridos de maíz con urea estabilizada y nutrición foliar. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 9(6):1231-1244.