

FERTILIZANTES DE SOLUBILIDAD CONTROLADA EN EL CULTIVO DE TRIGO EN EL BAJÍO: BALANCE DE N

Controlled Solubility Fertilizers in the Wheat Crop Grown in The Bajío: N Balance

José Antonio Vera-Núñez¹, Oscar Arath Grageda-Cabrera², Martín Eduardo Ávila-Miranda³,
Javier Zaragoza Castellanos-Ramos⁴, José Iván Escalante-García⁵,
Alexander Gorokovsky⁵ y Juan José Peña-Cabriales^{1*}

RESUMEN

Los fertilizantes de alta eficiencia y solubilidad controlada representan una alternativa para incrementar la absorción de nutrimentos en cultivos agrícolas. Los objetivos del presente trabajo fueron cuantificar la absorción y la residualidad del N proveniente de fertilizantes compuestos de solubilidad controlada (FCSC: AUK1 y AGUMFA4) en el sistema trigo-suelo, con diferentes manejos (labranza tradicional y labranza de conservación) en El Bajío, empleando la técnica isotópica de ¹⁵N. Asimismo, estimar las pérdidas de N-N₂O de los FCSC en comparación con la urea y el sulfato de amonio durante el ciclo de desarrollo del cultivo, mediante cromatografía de gases en condiciones de campo. Los resultados del aporte de N mostraron diferencias de desempeño entre los FCSC evaluados; los fertilizantes AUK1 y AGUMFA4 presentaron el mayor potencial, lo cual, en el campo, se reflejó en una alta eficiencia de absorción de N (76%), comparada con la eficiencia de N-urea (16%), en condiciones de labranza. El uso de esta tecnología conlleva un valor agregado, dada la menor emisión de gases contaminantes, como el N₂O, hasta 12-20 veces menos que las pérdidas observadas en el sulfato de amonio. La implementación de la tecnología de FCSC, integrada a otras prácticas agrícolas, permite disminuir las dosis de

fertilización y potenciar la eficiencia de absorción N, favoreciendo un manejo sustentable del sistema de producción de trigo en El Bajío.

Palabras clave: isótopo ¹⁵N, residualidad N, N₂O, eficiencia de uso de N, labranza.

SUMMARY

The objectives in this study were to quantify the N-uptake and residual N from composites fertilizers of controlled solubility (CFCS: AUK1 and AGUMFA4) in a wheat-soil system under different soil management (traditional tillage and zero tillage) in El Bajío region, using the ¹⁵N isotope technique under field conditions. Losses of N-N₂O from CFCS compared with urea and ammonium sulfate during the wheat crop cycle were determined using gas chromatography. The results of N supply showed differences in performance between the CFCS evaluated, AGUMFA4 and AUK1 fertilizers showed the significant potential, which was reflected in the field in high N uptake efficiency (76%) compared with the efficiency of N-urea (16%), under zero tillage. Besides, the use of this technology represents an added ecological value because lower emissions of polluting gases (N₂O) up to 12-20 times less than the those losses observed in ammonium sulfate. The implementation of the CFCS technology integrated with other agricultural practices can reduce the fertilization rate and enhance the efficiency of N absorption, contributing to a sustainable management system for wheat production in El Bajío region.

Index words: ¹⁵N isotope, residual N, N₂O, N-use efficiency, tillage.

INTRODUCCIÓN

En México, el trigo se cultiva en aproximadamente 8×10^6 ha (5.6×10^6 ha con riego). Debido al uso de

¹ Cinvestav-IPN, Unidad Irapuato. Km. 9.6 Libramiento Norte carretera Irapuato-León. 36821 Irapuato, Guanajuato, México.

* Autor responsable (jpena@ira.cinvestav.mx)

² INIFAP-CEBAJ. Km 6.5 carretera Celaya-San Miguel de Allende, Apartado Postal 112. 38100 Celaya, Guanajuato, México.

³ Instituto Tecnológico de Tlajomulco. Km 10 carretera Tlajomulco-San Miguel Cuyutlán. Apartado Postal 12. 45640 Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México.

⁴ INTAGRI. Av. Irrigación 105 20-A Col. Excelaris. 38015 Celaya, Guanajuato, México.

⁵ Cinvestav-IPN, Unidad Saltillo. Km 13 carretera Saltillo-Monterrey. 25900 Ramos Arizpe, Coahuila, México

tecnologías de producción derivadas de La Revolución Verde, como la mecanización, el uso de variedades con alto potencial de rendimiento, la irrigación y, en especial, la aplicación de agroquímicos, *i.e.* pesticidas y fertilizantes, lo que generó un incremento significativo en la producción de este cereal (Cárdenas-Navarro *et al.*, 2004).

En México, debido al incremento de la demanda de grano por el rápido aumento poblacional, la producción de trigo ha experimentado una intensificación (Kumar *et al.*, 2006), que ha generado severas consecuencias ambientales (Matson *et al.*, 1998), en particular, en regiones altamente productoras, como El Bajío, donde la mayoría de los suelos tipo Vertisol muestran bajos niveles de materia orgánica. Aunque la producción de trigo ha aumentado mediante el uso de fertilizantes nitrogenados e irrigación, se ha demostrado que una alta cantidad del N aplicado (hasta 400 kg ha⁻¹) se pierde ($\geq 50\%$) (Grageda-Cabrera *et al.*, 2000a) por mecanismos como la volatilización, la lixiviación y la desnitrificación (Hofman y van Cleemput, 2005), con serias consecuencias ambientales, debido, entre otros factores, al manejo inadecuado del agua de riego (Scheer *et al.*, 2008).

En estudios de largo plazo, enfocados a incrementar la eficiencia de absorción de N por cereales en sistemas de producción en El Bajío, se encontró que la labranza de conservación (C) es una alternativa de manejo del suelo, en términos de rendimiento a mediano plazo (4-5 años), comparada con la labranza tradicional (T) con quema de residuos (Grageda-Cabrera *et al.*, 2003). Sin embargo, la adición de residuos vegetales al suelo incrementa significativamente la densidad poblacional bacteriana y especialmente la desnitrificante (Miller *et al.*, 2008). Por esta vía, en El Bajío se pierde hasta 21% del N-fertilizante, dependiendo de la fuente de N; siendo mayores las pérdidas al aplicar fuentes nítricas, comparado con la urea y el sulfato de amonio (Grageda-Cabrera *et al.*, 2000a). Grageda-Cabrera *et al.* (2004) a través de estudios isotópicos con ¹⁵N, demostraron que la eficiencia de recuperación de N en ambos sistemas de labranza varía de 28 a 40% y que la labranza T con incorporación de residuos es más eficiente, en términos de asimilación de N por los cultivos, con pérdidas menores de N por lixiviación o en forma gaseosa. Además, gran parte del N se inmoviliza en el estrato superior del suelo. Similares patrones de hidrosolubilización presentan los FCSC, por ejemplo,

los materiales vítreos a base de fosfatos (Nakazawa *et al.*, 2006).

Por lo antes señalado, los objetivos del presente estudio fueron: 1. Cuantificar la absorción y la residualidad del N proveniente de fertilizantes compuestos de solubilidad controlada (FCSC: AUK1 y AGUMFA4) en el sistema trigo-suelo de El Bajío, con labranza tradicional (T) y labranza cero (C). 2. Estimar las pérdidas de N-N₂O de los FCSC, en comparación con las de la urea (U) y el sulfato de amonio (SA), durante el ciclo de desarrollo del cultivo de trigo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se instaló en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Celaya, Guanajuato, ubicado a 20° 35' 18.2" N y 100° 49' 34.0" O, a una altitud de 1765 m. La región recibe una precipitación pluvial media de 650 mm año⁻¹, con una temperatura media anual de 18 °C. El análisis del suelo mostró que es un Vertisol pélico, con pH_{1,2 H2O} de 6.7, contenido de materia orgánica de 2.24% y textura arcillosa.

Tratamientos

Se sembró la variedad de trigo Bárcenas S-2002 y se utilizó la dosis de fertilización recomendada en la región, 280 kg N ha⁻¹ y 80 kg P₂O₅ ha⁻¹. El diseño experimental fue de parcelas divididas, en arreglo de bloques al azar, con cuatro repeticiones. Los factores medidos en las parcelas grandes fueron: A) tipos de labranza: 1) labranza tradicional (T) y 2) labranza cero (C); y en las parcelas chicas: B) las fuentes N y C) dosis de fertilización N: 1) AUK1 60% (proporción de la dosis de fertilización N recomendada), 2) AGUMFA4 60%, 3) N-urea 100%, 4) N-sulfato de amonio 100% más P-superfosfato de calcio triple 100% y 5) testigo sin fertilización N (t), con base en los resultados de la dinámica de diferentes dosis de los FCSC y la implementación de la técnica de dilución isotópica de ¹⁵N para rastrear el origen del N. Ambos fertilizantes FCSC se generaron utilizando como matriz la arcilla (A) bentonita sin intercalación de urea (U) y potasio (K), para el caso de AUK, mientras que para el AGUMFA se utilizó la arcilla bentonita (A) en estado gel (G) con urea (U) y monofosfato de amonio (MFA). Cada unidad

experimental constó de ocho surcos de 5 m de largo y 0.13 m entre líneas de siembra. Las prácticas agronómicas se realizaron según las recomendaciones propuestas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP, 2005).

Estudio Isotópico

La parcela isotópica (4 m²) se instaló en el centro de cada uno de los tratamientos; se aplicó U y SA en solución, con 10.03% átomos de ¹⁵N en exceso, después de 0 y 40 días de la siembra.

En la etapa de madurez fisiológica se muestreó para cuantificar la producción de masa seca de paja y grano. El N total se determinó por el método Kjeldahl. En las muestras vegetales y de suelo de la parcela isotópica de ¹⁵N, la relación isotópica de ¹⁵N/¹⁴N se midió por espectrometría de emisión óptica (Faust *et al.*, 1987).

Al final del ciclo de cultivo se tomaron muestras de suelo (300 g) a 0-20, 20-40, 40-80 y 80-100 cm de profundidad. El contenido de N total en suelo se cuantificó por el método micro-Kjeldahl modificado, usando permanganato de potasio y Fe reducido para incluir NO₂⁻ y NO₃⁻ (Bremner y Mulvaney, 1982) y la relación isotópica ¹⁵N/¹⁴N. Los cálculos isotópicos de ¹⁵N se realizaron por el método de dilución isotópica (Zapata, 1990).

Cuantificación de N-N₂O

En cada tratamiento se cuantificó la pérdida de N₂O, usando la técnica de la caja cerrada (Vermoesen *et al.*, 1993).

Se utilizó el paquete estadístico STATNL (Olivares-Sáenz, 1993), para el análisis de varianza de los resultados, incluyendo la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) para la separación de medias de las variables cuantificadas de los tratamientos en estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de Grano

En términos de rendimiento de grano, se obtuvieron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) con los fertilizantes evaluados (Cuadro 1). El mayor rendimiento de grano (7.3 Mg ha⁻¹) se obtuvo cuando se aplicó sulfato de amonio (SA), con labranza tradicional (T), y fue similar al obtenido cuando se aplicó AUK1. Este resultado es

Cuadro 1. Rendimiento de grano y paja en el cultivo de trigo fertilizado con fertilizantes compuestos de solubilidad controlada (FCSC) en dos sistemas de labranza.

Tratamiento	Grano	Paja
	- - - - - Mg ha ⁻¹ - - - - -	
Labranza tradicional (T):		
AUK1	6.9	8.5
AGUMFA4	6.7	7.5
Urea (U)	5.8	6.9
Sulfato de amonio (SA)	7.8	10.8
Promedio	6.8	8.4
Testigo (t)	3.3	4.0
Labranza cero (C):		
AUK1	7.4	8.6
AGUMFA4	6.0	6.6
Urea (U)	5.2	7.2
Sulfato de amonio (SA)	7.4	11.1
Promedio	6.5	8.4
Testigo (t)	3.1	4.0
Tukey ($P \leq 0.05$)	1.03	1.4

contrario a lo esperado, ya que en ensayos con labranza cero (C) se inmoviliza el N, debido al carbono de los residuos, el cual después se libera parcialmente, potenciando el rendimiento del cultivo (Grageda-Cabrera *et al.*, 2011). Los tratamientos de labranza C mostraron rendimiento de grano menor. Se observó una tendencia similar en lo que respecta a la absorción de N en el cultivo, así como un efecto significativo ($P \leq 0.05$) en la interacción entre labranzas y fertilizantes, donde destacó el fertilizante AUK1, en labranza C, con el mayor rendimiento de grano; así como el SA, en labranza T (Cuadro 1).

La fuente principal de S para las plantas es la materia orgánica del suelo, propiedad que ha decrecido en El Bajío, y esta es la probable causa de la mayor eficiencia del SA, en comparación con la de otros fertilizantes (Grageda-Cabrera *et al.*, 2003).

Absorción de N total (Nt) y N del fertilizante (Ndff)

Se observó la misma tendencia en el comportamiento de la absorción de Nt (Cuadro 2) que en la producción de grano, ya que la extracción de N está relacionada con el rendimiento del cultivo. Así, los tratamientos de labranza C acumularon menos N aunque fueron iguales estadísticamente, en comparación con los de labranza T ($P \leq 0.05$). Los fertilizantes AUK1 (271 kg N ha⁻¹)

y AGUMFA4 (225 kg N ha⁻¹) presentaron los mayores valores de N, tanto en grano como en paja, y por lo tanto, en la acumulación de N_t, en comparación con los obtenidos con U y el SA, y fueron 15% mayores en términos de absorción de N_t en ambos sistemas de labranza (Cuadro 2).

En los tratamientos experimentales, el N derivado del fertilizante (N_{ddf}) fue bajo (< 50%) excepto AGUMFA4 en labranza C, donde el valor de N_{ddf} fue 54% (Cuadro 2). Sin embargo, se presentó una tendencia similar a la de las otras variables: AUK1 > AGUMFA4 > SA > U.

Se observó diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en los valores de N_{ddf} en el cultivo, entre los sistemas de labranza, y fue mayor en labranza C, equivalente en grano a 132 para AUK1, 122 para AGUMFA4, 106 para SA y 46 kg N_{ddf} ha⁻¹ para U. El mayor valor de N_{ddf} correspondió al tratamiento de labranza C, con una eficiencia promedio de absorción del fertilizante N de 51% (Cuadro 3).

El sistema de labranza T mostró los valores de absorción más bajos, pues el cultivo sólo recuperó 41% de N del fertilizante aplicado. Los mayores valores de absorción de N se obtuvieron con los fertilizantes AUK1 y AGUMFA4, con 78 y 72% en labranza C, y fueron equivalentes a dos veces la absorción del SA, fertilizante al cual se le atribuye una respuesta positiva sobresaliente

Cuadro 2. Nitrógeno total y del fertilizante compuesto de solubilidad controlada (FCSC) en el cultivo de trigo en dos sistemas de labranza.

Tratamiento	Grano	Paja	N-fertilizante
	kg N ha ⁻¹		%
Labranza tradicional (T):			
AUK1	159 (89) [†]	112 (21)	41
AGUMFA4	152 (37)	99 (28)	26
Urea (U)	128 (35)	89 (41)	35
Sulfato de amonio (SA)	138 (58)	81 (36)	43
Promedio	144 (55)	95 (32)	36
Testigo (t)	62 (0)	46 (0)	0
Labranza cero (C):			
AUK1	167 (78)	104 (57)	50
AGUMFA4	141 (77)	84 (45)	54
Urea (U)	116 (25)	94 (21)	22
Sulfato de amonio (SA)	149 (66)	98 (40)	45
Promedio	141 (62)	95 (41)	43
Testigo (t)	57 (0)	47 (0)	0
Tukey ($P \leq 0.05$)	15 (9)	17 (6)	

[†] Valores de N_{ddf} en paréntesis

Cuadro 3. Absorción de nitrógeno por el cultivo de trigo fertilizado con fertilizantes compuestos de solubilidad controlada (FCSC) en dos sistemas de labranza.

Tratamiento	Absorción N-fertilizante	
	kg N ha ⁻¹	%
Labranza tradicional (T):		
AUK1	110	65.5
AGUMFA4	65	38.7
Urea (U)	76	27.1
Sulfato de amonio (SA)	94	33.6
Promedio	86	41.2
Labranza cero (C):		
AUK1	132	78.6
AGUMFA4	122	72.6
Urea (U)	46	16.4
Sulfato de amonio (SA)	106	37.9
Promedio	102	51.3
Tukey ($P \leq 0.05$)	18	

para los cultivos de la región, por el aporte de S (Grageda-Cabrera *et al.*, 2004).

Balance de N

A la cosecha, una fracción menor de N_{ddf} permaneció en el perfil del suelo (Cuadro 4). Al respecto, se reportan tendencias similares de distribución de N fertilizante en el perfil del suelo (Huggins y Pan, 2003). El N_{ddf} en el perfil del suelo (0-100 cm) varió entre los tratamientos. La residualidad de los fertilizantes fue mayor en labranza C, en el estrato de suelo 0-20 cm (Cuadro 4).

En los tratamientos con SA y U en labranza C se detectó la mayor cantidad de N_{ddf} residual (31 y 43 kg N_{ddf}, respectivamente) y permaneció en el estrato de 0-40 cm, debido a la alta disponibilidad de carbono de los residuos vegetales. La mayor residualidad de N en este manejo del suelo se debe a la inmovilización de una proporción importante del N aplicado, el cual, en etapas posteriores, será mineralizado por los microorganismos que descomponen los residuos y queda disponible para siguientes cultivos (Grageda-Cabrera *et al.*, 2003), por las actividades enzimáticas relacionadas con el N (España *et al.*, 2002). En los otros tratamientos, la cantidad de N fue menor y disminuyó conforme se profundiza en el perfil (Cuadro 4).

El N del fertilizante, en los estratos inferiores del suelo, indica que se está perdiendo una proporción de

Cuadro 4. N del fertilizante compuesto de solubilidad controlada (FCSC) en el cultivo del trigo en dos sistemas de labranza.

Tratamiento	Profundidad N-fertilizante (cm)					%
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
	- - - - - kg N ha ⁻¹ - - - - -					
Labranza tradicional (T):						
AUK1	13.3	3.2	0.3	0.0	0.0	10.0
AGUMFA	14.4	4.9	0.2	0.0	0.0	11.6
Urea (U)	4.3	8.2	2.3	0.0	0.1	5.3
Sulfato de amonio (SA)	5.7	10.9	3.4	1.9	0.9	8.2
Labranza cero (C):						
AUK1	4.9	0.3	0.1	0.1	0.0	3.2
AGUMFA	9.7	2.4	0.7	0.0	0.0	7.7
Urea (U)	19.6	9.3	0.2	2.2	0.0	11.2
Sulfato de amonio (SA)	29.4	9.6	1.7	2.6	0.2	15.6
Tukey ($P \leq 0.05$)	2.0	0.8	0.2	0.2	0.1	

N baja, por efecto de lixiviación, esto sugiere que la mayor pérdida es por vía gaseosa. Al considerar la cantidad de N absorbido por la planta (Cuadro 3) y el N en el suelo del fertilizante (Cuadro 4), se estableció un balance de N. El N del fertilizante recuperado en el sistema planta-suelo varió entre 30 y 80% y, por lo tanto, se desconoce el destino de 20-70% del N del fertilizante aplicado. Al respecto, se ha sugerido que gran parte del N del fertilizante aplicado se pierde en forma gaseosa (nitrificación, desnitrificación o volatilización). Resultados similares han reportado Grageda-Cabrera *et al.* (2000a; 2004). Asimismo, Petersen *et al.* (2009) mencionan que la mayor cantidad de N se pierde en forma de NO₂ y N₂ por nitrificación y desnitrificación, como se ha demostrado en estudios sobre rotación de cultivos y labranza.

Emisiones de N₂O

Los fertilizantes N aplicados incrementaron la emisión de N₂O, en relación con el testigo (t) (Cuadro 5), así se establecieron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre las tasas de emisión de N₂O. No obstante que no se aplicaron fuentes nítricas, la fertilización con SA y U favoreció mayor emisión de N₂O que cuando se aplicaron los fertilizantes AUK1 y AGUMFA4 (Cuadro 5).

Se ha demostrado que con alta concentración de nitrato, los microorganismos del suelo inhiben la reducción anaeróbica de N₂O a N₂, y generan una gran fracción molar de N₂O en los productos (Woodwar *et al.*, 2009).

Otros factores involucrados en la fracción molar N₂O/N₂ por desnitrificación son el pH; la presión parcial de oxígeno, la cual está en función de la humedad; la concentración de nitrato y la disponibilidad de carbono (Firestone y Davidson, 1989). La emisión de N₂O mostró patrones irregulares en el tiempo, dichos cambios se han atribuido a variaciones en la humedad y la temperatura del suelo (Grageda-Cabrera *et al.*, 2003; Warren, 2009).

Durante el ciclo de cultivo, la cantidad total de N emitida varió desde 0.4 hasta 9.0 kg N ha⁻¹ ciclo⁻¹, lo cual representó pérdidas de hasta 3.3 % del N aplicado. Asimismo, se determinó que en los tratamientos donde se aplicó SA, hubo una gran producción de N₂O. En contraste, la cantidad de N emitido fue menor con los fertilizantes AUK1 y AGUMFA4.

No obstante que la aplicación de U y SA favoreció la emisión de N₂O, estos valores fueron bajos, ya que dichos fertilizantes se pierden bajo otras formas gaseosas, por ejemplo, volatilización de amoníaco. Este fenómeno afecta a los fertilizantes amoniacales, como U y SA, entre otros, y es un proceso importante de pérdidas de N del sistema que también influye significativamente sobre la eficiencia de la fertilización de N (Sutton *et al.*, 1998). En el caso de los fertilizantes tradicionales, este proceso de pérdida resulta de reacciones químicas a partir del amonio producido por la hidrólisis de la urea o de los fertilizantes amoniacales adicionados al suelo (Hofman y van Cleemput, 2005).

Cuadro 5. Emisiones de N₂O en suelo cultivado con trigo fertilizado con fertilizantes compuestos de solubilidad controlada (FCSC) en dos sistemas de labranza.

Tratamiento	N ₂ O total
	kg ha ⁻¹ ciclo ^{-1†}
Labranza tradicional (T):	
AUK1	0.53
AGUMFA4	0.42
Urea (U)	0.67
Sulfato de amonio (SA)	6.15
Testigo (t)	0.13
Labranza cero (C):	
AUK1	0.72
AGUMFA4	0.45
Urea (U)	0.37
Sulfato de amonio (SA)	9.13
Testigo (t)	0.19
Tukey ($P \leq 0.05$)	0.56

† 147 días

Este mecanismo se considera como uno de los principales responsables de la baja eficiencia de la fertilización con N. En los últimos años, este proceso ha crecido en importancia, debido al uso preferencial de la urea, y al incremento de las dosis de fertilización con N de los cultivos.

Las pérdidas de N se magnifican cuando los fertilizantes amoniacales se aplican en la superficie del suelo, debido a la acción directa del viento sobre las pérdidas gaseosas (Hofman y van Cleemput, 2005). En El Bajío, esta práctica se realiza en la segunda fertilización, lo cual confirma que el control de la solubilidad de los fertilizantes estudiados favorece la disminución de las pérdidas N, no obstante que las sales minerales que los conforman son amoniacales-urea.

Dada la alta disponibilidad de carbono por la adición superficial de residuos vegetales y la alta conservación de humedad en el sistema de labranza C, las mayores pérdidas de N se presentaron en el orden siguiente: SA, AUK1, AGUMFA4, U y t.

Las pérdidas de N por desnitrificación fueron mayores en el sistema de labranza C donde los residuos se aplicaron superficialmente, los cuales conservan mayor humedad y presentan alta disponibilidad de carbono. Por consiguiente, el manejo del agua es primordial en el ciclo del N en estos sistemas de producción agrícola. Las pérdidas de N en el sistema de labranza T, por este proceso dependen del tipo de fertilizante aplicado de acuerdo con el orden siguiente: SA > U > AUK1 > AGUMFA4. Estos resultados fueron menores que el rango reportado en condiciones de campo (Grageda-Cabrera *et al.*, 2004) y laboratorio (Grageda-Cabrera *et al.*, 2000a).

CONCLUSIONES

- El rendimiento de grano obtenido fue estadísticamente igual (7.3 Mg ha^{-1}) cuando se aplicó fertilizante AUK1 60% y sulfato de amonio 100%. Asimismo, el rendimiento de grano con urea 100% fue estadísticamente menor que con AUK1 y sulfato de amonio 100%

- Los fertilizantes con mayor potencial agronómico y menor impacto ecológico, con relación al control de solubilidad, son el AUK1 y el AGUMFA4; en campo se tuvo un incremento de la absorción de hasta 79%, mientras que esta fue 16% con urea en labranza cero.

- La aplicación de los fertilizantes estudiados favoreció la emisión de N_2O , la cual alcanzó hasta 8% del N aplicado, dependiendo de la humedad y la temperatura.

- Ecológicamente, el uso de tecnologías a base de FCSC representa un valor agregado, dada la menor emisión de gases contaminantes, como el N_2O , hasta 12-20 veces menos en comparación con el sulfato de amonio.

- Los resultados generados permiten inferir que es posible incorporar los FCSC en los programas de nutrición del cultivo de trigo, como una alternativa en este sistema agrícola para optimizar la producción intensiva de trigo en El Bajío.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Conacyt (Proy. 38999) y FOMIX-Conacyt (Proy. GTO-04-C02-54) los fondos económicos destinados para el desarrollo del proyecto.

LITERATURA CITADA

- Bremner, J. M. and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. pp. 595-623. *In*: A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds.). Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA. Madison, WI, USA.
- Cárdenas-Navarro, R., J. M. Sanchez-Yañez, R. Fariás-Rodríguez y J. J. Peña-Cabriales. 2004. Los aportes de nitrógeno en la agricultura. *Rev. Chapingo: Serie Horticultura* 10: 173-178.
- España, M., B. Rodríguez, E. Cabrera y B. Cecanti. 2002. Actividades enzimáticas y contribución de los residuos de cosecha de maíz al N del suelo en sistemas de labranza, en los llanos centrales, Venezuela. *Terra* 20: 81-86.
- Faust, H., A. Sebastianelli y H. Axmann. 1987. Métodos para el análisis de ^{15}N . FAO-OIEA. Viena, Austria.
- Firestone, M. K. and E. A. Davidson. 1989. Microbiological basis of NO and N_2O production and consumption in soil. pp. 1-7. *In*: M. O. Andreae and D. S. Schimel (eds.). Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. John Wiley and Sons. Chichester, NY, USA.
- Grageda-Cabrera, O. A., A. Vermoesen, O. van Cleemput y J. J. Peña-Cabriales. 2000a. Efecto del tipo de suelo, humedad y fuente de nitrógeno en las emisiones de N_2 y N_2O . *Terra* 18: 1-9.
- Grageda-Cabrera, O. A., F. Esparza, F. Zapata, and J. J. Peña-Cabriales. 2000b. Influence of sorghum crop residue management on the recovery of ^{15}N labelled fertilizer by wheat in Mexico. *J. Sust. Agric.* 16: 75-91.
- Grageda-Cabrera, O. A., M. Mora, R. J. Z. Castellanos, R. F. Follet, and J. J. Peña-Cabriales. 2003. Fertilizer nitrogen recovery under different tillage treatments and cropping sequences in a vertisol in central Mexico. pp. 39-56. *In*: International Atomic Energy Agency (ed.). IAEA-TECDOC-1354 Management of crop residues for sustainable crop production. Vienna, Austria.
- Grageda-Cabrera, O. A., T. Medina-Cázares, J. L. Aguilar-Acuña, M. Hernández-Martínez, E. Solís-Moya, G. A. Aguado-Santacruz y J. J. Peña-Cabriales. 2004. Pérdidas de nitrógeno por emisión de N_2 y N_2O en diferentes sistemas de manejo y con tres fuentes nitrogenadas. *Agrociencia* 38: 625-633.

- Grageda-Cabrera, O. A., J. A. Vera-Núñez, J. L. Aguilar-Acuña, L. Macías-Rodríguez, G. A. Aguado-Santacruz, and J. J. Peña-Cabriales. 2011. Fertilizer dynamics in different tillage and crop rotation systems in a vertisol in central Mexico. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 89: 125-134.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias). 2005. La Fertilización en los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México. Centro de Investigación Regional Centro-Campo Experimental Bajío. Folleto Técnico 1. Celaya, Guanajuato, México.
- Hofman, G. and O. van Cleemput. 2005. Soil and plant nitrogen. IFA. Paris, Francia.
- Huggins, D. R. and W. L. Pan. 2003. Key indicators for assessing nitrogen use efficiency in cereal-based agroecosystems. *J. Crop Product.* 8: 157-185.
- Kumar B., R., N. Nerula, M. Vasudeva, A. Sato, T. Shimano, and M. Osaki. 2006. Mini review-harnessing wheat genotype X Azotobacter strain interactions for sustainable wheat production in semi arid tropics. *Tropics* 15: 121-133.
- Matson, P. A., R. Naylor, and I. Ortiz-Monasterio. 1998. Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management. *Science* 280: 112-115.
- Miller, M. N., B. J. Zebarth, C. E. Dandie, D. L. Burton, C. Goyera, and J. T. Trevors. 2008. Crop residue influence on denitrification, N₂O emissions and denitrifier community abundance in soil. *Soil Biol. Biochem.* 40: 2553-2562.
- Nakazawa, R., H. Tomemori, A. Hirano, H. Mochizuki, P. An, and S. Inanaga, 2006. Effects of the application of porous glass material treated with phosphate on the growth of tomato plants and the phyto-available phosphate in soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 52: 540-544.
- Olivares-Sáenz, E. 1993. Paquete de diseños experimentales FAUANL Versión 2.4. Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, NL, México.
- Petersen, S. O., P. Schjøning, I. K. Thomsen, and B. T. Christensen. 2009. Nitrous oxide evolution from structurally intact soil as influenced by tillage and soil water content. *Soil Biol. Biochem.* 40: 967-977.
- Scheer, C., R. Wassmann, K. Kienzler, N. Ibragimov, and R. Eschanov. 2008. Nitrous oxide emissions from fertilized, irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: Influence of nitrogen applications and irrigation practices. *Soil Biol. Biochem.* 40: 290-301.
- Sutton, M. A., D. S. Lee, G. J. Dollard, and D. Fowler. 1998. International conference on atmospheric ammonia: emission, deposition and environmental impacts. Vol. 32, No. 3. Pergamon. Culham, Oxford, UK.
- Vermoesen, A., O. van Cleemput, and G. Hofman. 1993. Nitrogen loss processes: mechanisms and importance. *Pedologie* 43: 417-433.
- Warren, C. R. 2009. Why does temperature affect relative uptake rates of nitrate, ammonium and glycine: A test with *Eucalyptus pauciflora*. *Soil Biol. Biochem.* 41: 778-784.
- Woodward, K. B., C. S. Fellows, C. L. Conway, and H. M. Hunter. 2009. Nitrate removal, denitrification and nitrous oxide production in the riparian zone of an ephemeral stream. *Soil Biol. Biochem.* 41: 671-680.
- Zapata, F. 1990. Técnicas isotópicas en estudios sobre la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas. pp. 79-168. In: G. Hardarson (ed.). Empleo de técnicas nucleares en los estudios de la relación suelo-planta. Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena, Austria.