

EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA SOBRE EL CONTENIDO DE NITRATO Y AMONIO EN EL SUELO Y LA PLANTA DE MAÍZ

Marta Barrios¹, Judith García¹ y Carmen Basso¹

RESUMEN

El maíz requiere grandes cantidades de nitrógeno por lo que la generación de información sobre fuentes y dosis puede permitir una mayor eficiencia en el uso de éste. Para evaluar el efecto de cuatro fuentes nitrogenadas sobre la tasa de nitrificación, nitrato y amonio en suelo y planta, se realizó un experimento en la Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. El diseño experimental fue de bloques al azar con cuatro repeticiones. Las fuentes aplicadas al suelo fueron urea convencional, sulfonitrato de amonio+3,4-DMPP, urea-ESN y sulfato de amonio, fraccionadas en dos partes. Cada parcela estuvo constituida por seis hileras de 4 m de largo, separadas 0,9 m, y 0,25 m entre plantas. Se utilizaron dos dosis de N (55 y 92 kg·ha⁻¹) para generar ocho tratamientos en arreglo factorial, más un testigo sin fertilizante. Adicionalmente, se añadieron al suelo 20 kg SFT y 60 kg KCl. Se realizaron dos muestreos de suelo y de planta a 42 y 62 días después de siembra (dds). El nitrato y el amonio en suelo fueron extraídos y luego procesados mediante un analizador de iones; el amonio en savia se cuantificó por espectroscopia fluorescente a través de cromatografía líquida HPLC, y el nitrato con un electrodo de ión selectivo. El sulfonitrato de amonio+3,4-DMPP resultó el tratamiento más efectivo en retardar la tasa de nitrificación. A 42 dds las concentraciones de amonio y nitrato en la savia fueron mayores que a 62 dds, mientras que en el suelo ocurrió lo contrario, consistente con la tasa de absorción de la planta.

Palabras clave adicionales: Urea convencional, nitrato de amonio, 3,4-DMPP, urea-ESN, espectroscopia fluorescente, HPLC

ABSTRACT

Effect of nitrogen fertilization on nitrate and ammonium contents in soil and corn plant

Maize requires large amounts of N and therefore it is necessary to generate information about best N sources and rates in order to improve the nitrogen use efficiency. The experiment was conducted at the Agronomy School, Universidad Central de Venezuela, to evaluate four nitrogen sources on nitrification rate, and nitrate and ammonium contents in soil and plant. The experimental design was a complete randomized block with four repetitions. The four nitrogen sources applied to soil were: regular urea; ammonium sulfonitrate + 3,4-dimethylpyrazol phosphate, urea-ESN, and ammonium sulfate, all of them split in two fractions. Plots contained six rows spaced 0.9 m apart, and 0.25 m between plants. Two nitrogen rates (55 and 92 kg·ha⁻¹ N) were combined to generate eight treatments in factorial arrangement, plus a control without nitrogen. Additionally, 20 kg·ha⁻¹ TSP, and 60 kg·ha⁻¹ KCl, were applied. Two soil and sap sampling were carried out at 42 and 62 days after planting (dap). Nitrate and ammonium in soil were determined by ion analyzer; sap ammonium was quantified by fluorescence spectroscopy using HPLC, and nitrate using an ion selective electrode. The nitrate inhibitor 3,4-dimethylpyrazol phosphate showed more effectiveness on nitrification rate retardation in most of cases. At 42 dap ammonium and nitrate concentrations in sap were higher than at 62 dap, whereas in soil they were lower, which is consistent with plant absorption rate.

Additional key words: Regular urea, ammonium nitrate, 3, 4-DMPP, urea-ESN, fluorescence spectroscopy, HPLC

INTRODUCCIÓN

La utilización eficiente del fertilizante nitrogenado es actualmente uno de los aspectos más relevantes dentro del manejo de diferentes cultivos agrícolas en Venezuela; tal es el caso del maíz, un rubro muy importante por su incidencia en la alimentación de los venezolanos. Las

pérdidas del nitrógeno aplicado con los fertilizantes son elevadas (alrededor de 60 %), lo que disminuye sensiblemente su uso por la planta y por ende, los rendimientos del cultivo (Torres, 2005). Seleccionar la dosis adecuada, fuente y momento de aplicación del fertilizante es indispensable para el logro del éxito en la producción de los cultivos (Özden, 2010; Irañeta

Recibido: Marzo 6, 2012

Aceptado: Septiembre 17, 2012

¹ Instituto de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 2101. Maracay, Venezuela. e-mail: barriosm@agr.ucv.ve; garciaj@agr.ucv.ve; bassoc@agr.ucv.ve

et al. 2010). La utilización de urea convencional como principal fuente de nitrógeno conlleva pérdidas importantes por volatilización y lavado; por ello, actualmente los fertilizantes nitrogenados de liberación controlada como la urea-ESN (siglas del inglés *Environmentally Smart Nitrogen*) o inhibidores de la nitrificación como el sulfonitrato de amonio con el inhibidor 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) son herramientas muy útiles en la disminución de las pérdidas de nitrógeno a través del retardo de la tasa de nitrificación o de la inhibición de la acción de las bacterias nitrificantes responsables de la primera fase de la transformación del amonio en nitrato, asegurando de esta manera la permanencia de la forma amoniacal en el suelo y disminuyendo las pérdidas de nitrato por lixiviación, reducción desasimilatoria, desnitrificación y escorrentía (Boutell y Toribio, 2006). Un beneficio adicional de este tipo de fertilizantes es la disminución de las cantidades de N contaminante, ya que algunos de ellos están encapsulados en una cubierta constituida por un polímero especial (Dowbenko,

2007). Esta mayor eficiencia del nitrógeno aplicado permite también un mejor aprovechamiento del fertilizante en términos de beneficio económico al poder reducirse la dosis del elemento. En tal sentido, los objetivos de este estudio fueron: a) comparar cuatro fuentes nitrogenadas con respecto a los contenidos de nitrato y amonio en el suelo y en la planta de maíz; b) calcular la máxima concentración de N en función de los contenidos de nitrato y amonio en el suelo y en la planta; y c) evaluar el efecto de los tratamientos aplicados en dos etapas del crecimiento de la planta.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en el Campo Experimental del Instituto de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, estado Aragua (10°16' N y 67°36' W). El suelo es un Fluvaquentic- haplustoll francoso fino, isohipertérmico, de mineralogía mixta (Cuadro 1).

Cuadro 1. Propiedades iniciales del suelo del experimento

Horizonte (cm)	Arcilla	Limo (%)	Arena	Textura	pH 1:1 agua	CE (dS·m ⁻¹)	MO (%)
0-30	10,8	37,6	51,6	Fa	7,02	0,12	1,14
30-60	7,5	30,4	62,1	Fa	7,34	0,068	1,03
Concentración (mg·kg ⁻¹)							
	P	K	Ca	Na	Mg		
0-30	144	20	1717	28	353		
30-60	66	4	880	60	280		

Se aplicaron al suelo cuatro fuentes diferentes de nitrógeno: a) urea convencional, b) sulfonitrato de amonio más el inhibidor (SNA+DMPP), c) urea-ESN, y d) sulfato de amonio (SA). Se utilizaron dos dosis de N (55 y 92 kg·ha⁻¹) que en combinación con las cuatro fuentes generaron ocho tratamientos en arreglo factorial. Adicionalmente se empleó un tratamiento testigo, sin nitrógeno, para constituir un ensayo en bloques al azar con nueve tratamientos y cuatro repeticiones. La aplicación se realizó en dos fracciones: la primera con la siembra y la segunda 30 días después de la siembra (dds). El área de las parcelas fue de 21,6 m², cada una con seis hileras de 4 m de largo, 0,9 m de separación y distancia entre plantas de 0,25 m. Además del nitrógeno, se agregaron al suelo, previo a la siembra, 20 kg·ha⁻¹

de fósforo como superfosfato triple con el fin de saturar la capacidad de fijación de los fosfatos por el suelo y asegurar la disponibilidad de este elemento para la planta en las primeras etapas de su desarrollo, y 60 kg·ha⁻¹ de potasio como KCl. La siembra se realizó en febrero de 2009 colocando dos semillas por punto; la banda de fertilización se colocó a 5 cm al lado y por debajo de la semilla. El entresaque de las plantas se efectuó 21 dds, dejando una planta por punto. El riego se llevó a cabo una vez por semana hasta el inicio de las lluvias. A 129 dds se realizó la cosecha manual del cultivo (14 % de humedad del grano). Se realizaron dos muestreos de suelo y de planta (coincidentes ambos), el primero a 42 dds y el segundo a 62 dds.

Para la determinación de amonio y nitratos en el suelo se utilizaron 36 muestras (0-20 cm) provenientes de las diferentes parcelas del ensayo. Las muestras fueron secadas a 50 °C, molidas y pasadas por un tamiz N° 2. El amonio se determinó utilizando 10 g de suelo al cual se le adicionaron 100 mL de una solución de KCl 1 N; se agitó constantemente durante 10 minutos y se filtró. Los nitratos fueron determinados tomando 40 g de suelo y adicionando 100 mL de $Al_2(SO_4)_3$ 0,025 F; se agitó constantemente durante 30 minutos y se filtró. Estos extractos fueron posteriormente utilizados para el análisis de nitratos utilizando un analizador de iones Lachat, mod. QuickChem AE.

Para la determinación de amonio y nitrato en la savia, a 42 dds se muestreó la hoja por debajo de la mazorca de ocho plantas en las dos hileras centrales de cada parcela y las muestras se llevaron al laboratorio, se cortaron y se les extrajo la savia. Se realizó el mismo procedimiento a 62 dds, tomando la quinta hoja expandida debajo de las que forman el cogollo. El amonio se determinó mediante el método basado en la reacción NH_4^+ -OPA consistente en la derivatización del NH_4^+ con o-phthaldehyde (OPA) a pH 6,8 y 2-mercaptoethanol como agente reductor y el amonio se cuantificó por espectroscopia fluorescente usando un equipo de cromatografía líquida HPLC (Patil et al., 2005). Este método permitió la estabilización de los extractos de las plantas, evitando la interferencia o contaminación con otros metabolitos que pudieran inducir a la sobreestimación del amonio. La determinación del

nitrato se realizó a través de un electrodo ión selectivo de NO_3^- (Cardy Nitrate Meter, Horiba); una vez calibrado el equipo, se realizó la lectura, en una gota de la muestra.

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando el paquete estadístico Statistix 8.0; se realizó análisis de varianza de acuerdo al diseño experimental utilizado y prueba de medias según Tukey. Se utilizó análisis de regresión para obtener los modelos explicativos del comportamiento de las variables respuesta a las tres dosis evaluadas y calcular la máxima concentración de nitrógeno en función de las fuentes aplicadas y de los contenidos de nitrato y amonio en el suelo y en la planta. Con los modelos de regresión generados se aplicó un análisis de la superficie de respuesta formada para encontrar los puntos críticos en los que se estableció la respuesta máxima.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nitrógeno amoniacal (NH_4^+) en el suelo y en la planta de maíz. Los contenidos de amonio en el suelo y en la savia de las plantas de maíz, a los 42 y 62 días de su desarrollo se reflejan en el Cuadro 2. Se puede apreciar que las mayores cantidades de amonio se encontraron en la savia y cantidades menores en el suelo. Esta forma de nitrógeno no se acumula en el tejido vegetal (La Manna et al., 2007), sino que se incorpora directamente a compuestos como la glutamina, procedentes del ciclo de Krebs, los cuales representan un medio importante de almacenamiento de nitrógeno en la planta (Kimball et al. 2002).

Cuadro 2. Concentración de NH_4^+ en el suelo, y en la savia 42 y 62 días después de la siembra (dds) del cultivo de maíz

Fuente de N	Dosis N ($kg \cdot ha^{-1}$)	42 dds		62 dds	
		NH_4^+ en suelo	NH_4^+ en savia	NH_4^+ en suelo	NH_4^+ en savia
Testigo	0	2,98 a	463,3 c	0,093 c	171,50 c
Urea	55	3,58 a	1197,5 ab	0,33 c	414,75 b
	92	4,33 a	1215,0 ab	6,65 bc	517,25 b
SNA+DMPP	55	-	1075,0 ab	23,03 a	657,75 a
	92	3,03 a	1345,0 a	-	272,00 c
Urea-ESN	55	0,28 b	1305,0 ab	0,80 c	505,25 b
	92	-	890,0 b	6,13 bc	684,50 a
SA	55	0,30 b	1175,0 ab	26,13 bc	754,00 a
	92	-	1140,0 ab	11,50 b	401,25 b
CV (%)		44,03	16,29	39,36	10,83

Medias con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre sí según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

A los 42 dds los contenidos de amonio en el suelo estuvieron por debajo de $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ mientras que en la savia las concentraciones lo fueron por encima de $1200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en casi todos los tratamientos, lo que indicaría la elevada absorción por la planta en este momento de su ciclo (Cuadro 2). A esta edad, el cultivo se encuentra aún en su fase vegetativa y la absorción de nutrientes y otros procesos vitales ocurren a una gran velocidad por lo que los niveles de nitrógeno en el suelo son deprimidos en la mayoría de los casos. Los resultados mostraron que, en su mayor parte, los tratamientos se comportaron en forma similar y diferente al testigo, el cual mostró las menores contenidos de amonio. En el tratamiento con SNA+DMPP a la dosis alta, se obtuvo la mayor concentración promedio de amonio en la savia; sin embargo, no difirió estadísticamente ($P\leq 0,05$) del tratamiento con SNA+DMPP a la dosis baja; esto indica que el tratamiento con SNA+DMPP permitió una mayor concentración de nitrógeno amoniacal en la savia, asimilable por la planta después de su conversión a compuestos orgánicos importantes. Estos resultados pueden estar relacionados con las dosis aplicadas, además del tipo de suelo y su temperatura (Kponblekau y Killorn, 1996). En el caso del tratamiento con urea-ESN, a la dosis alta, los resultados indicaron una menor efectividad en cuanto a la absorción de N por la planta; es posible que los niveles de humedad en el suelo no hayan sido los adecuados para disolver la cubierta del gránulo y que estas mismas condiciones aumentarían la volatilización a partir de la urea.

Investigaciones recientes han revelado que pueden encontrarse concentraciones de NH_4^+ de hasta 2 mM ($36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en el xilema de plantas en condiciones de nutrición con solo NO_3^- (Márquez y Canovas, 2004). Husted et al. (2000) midieron concentraciones significativas de amonio en la savia del xilema de plantas de tomate cultivado con N- NO_3^- como única fuente de nitrógeno, sin causar síntomas de toxicidad o reducción del crecimiento, y argumentan que las células vegetales incorporan el amonio rápidamente en los esqueletos carbonados para formar aminoácidos. En este estudio las plantas no mostraron la anomalía denominada síndrome del amonio (falta de turgor u hojas poco expandidas). Es probable que, en caso de haber ocurrido una tasa elevada de

absorción de amonio, éste se haya volatilizado o desasimilado en alguna medida (Boutell y Toribio, 2006; Ferraris et al. 2010).

A los 62 dds la planta ya había alcanzado el estado de emergencia de estigmas, momento en que probablemente continúa la absorción de nitrógeno destinado exclusivamente a la formación del grano. A los 62 dds los contenidos de amonio en el suelo fueron, en general, mayores que a los 42 dds mientras que en la savia estos resultaron menores, lo cual es consistente con el hecho de que las hojas jóvenes tienen mayor concentración de NH_4^+ que las hojas más viejas no senescentes (Schjoerring et al., 2001); es posible además que la absorción de amonio ocurriera a una tasa más baja en este momento del ciclo del cultivo, de allí las mayores cantidades del ión presentes en el suelo (Cuadro 2).

Nitrógeno nítrico (NO_3^-) en el suelo y en la planta de maíz.

Con respecto al nitrato o N nítrico, las concentraciones en el suelo fueron mayores que las de amonio, tanto a los 42 como a los 62 dds, con excepción de los tratamientos con urea convencional y el testigo (Cuadro 3); esto se atribuye principalmente a la actividad de la flora nitrificante de los suelos (Monza et al., 2004). En la savia, por el contrario, se obtuvieron menores concentraciones de nitrato en las dos fechas de muestreo. Schjoerring et al. (2001) encontraron que cuando el nitrato es reemplazado por el amonio, aumentan las concentraciones de éste en la savia del xilema con el incremento de las concentraciones externas y con el tiempo de exposición al amonio.

A los 62 dds los contenidos de nitrato en el suelo fueron mayores que a los 42 dds mientras que en savia resultaron menores (Cuadro 3), atribuido a la disminución de la tasa de absorción por la planta. Los tratamientos con mayor contenido de nitrato fueron el SNA+DMPP y el sulfato de amonio en sus menores dosis, tanto en suelo como en savia, no existiendo diferencia estadística entre ellos. En general, se puede decir que la fuente con inhibidor de la nitrificación favoreció un mejor aprovechamiento del N-nítrico, debido a su efecto sobre las bacterias nitrificantes (Rodríguez-Echeverría, 2009) y la ralentización de la tasa de nitrificación; esto favorece la nutrición combinada de NO_3^- y NH_4^+

en beneficio de la planta, entre otras ventajas, por la compensación de los cambios de pH (Márquez y Canovas, 2004; Barrios et al. 2010). Por su parte, el sulfato de amonio a la dosis baja permitió también una mayor disponibilidad de nitrógeno para la planta; esta fuente nitrogenada ha mostrado ser muy eficiente en función de que el nitrógeno amoniacal resiste más las pérdidas por volatilización, lavado y desnitrificación, de allí su comportamiento similar al del inhibidor de la

nitrificación. Es importante destacar que el sulfato de amonio es una fuente excelente de fertilización nitrogenada para el maíz ya que hace un aporte balanceado de N y S, especialmente en suelos con bajo contenido de materia orgánica como el de este estudio. Sin embargo, el sulfato de amonio por su baja concentración de N, es una fuente de fertilización costosa por unidad de N aportado, por lo que bajo condiciones reales de producción no representa una fuente altamente recomendable.

Cuadro 3. Concentración de NO_3^- en el suelo y en la savia, 42 y 62 días después de la siembra (dds) del cultivo de maíz

Fuente de N	Dosis N ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	42 dds		62 dds	
		NO_3^- en suelo ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	NO_3^- en la savia ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NO_3^- en suelo ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	NO_3^- en la savia ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
Testigo	0	0,06 f	243,75 e	2,05 d	85,00 e
Urea	55	0,43 f	535,00 d	10,48 c	151,25 de
	92	2,25 e	737,50 b	17,25 b	261,25 c
SNA+DMPP	55	7,78 c	916,75 a	62,50 a	451,25 a
	92	17,70 a	577,50 cd	9,40 c	211,25 cd
Urea-ESN	55	1,43 ef	652,50 bc	17,20 b	227,50 c
	92	6,48 c	918,75 a	14,68 b	347,50 b
SA	55	14,88 b	956,25 a	61,50 a	446,25 a
	92	4,28 d	586,25 cd	11,50 c	242,50 c
CV (%)		9,98	6,75	50,85	6,75

En cada columna, medias con letras distintas indican diferencias estadísticas entre sí según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Determinación de las respuestas máximas (R_{max}) considerando fuentes y dosis de nitrógeno. El análisis de regresión permitió la obtención de modelos que explican el comportamiento de las variables respuesta a las tres dosis evaluadas. En algunos casos cuando se probó un modelo cuadrático, el efecto cuadrático no resultó significativo, por lo que el modelo lineal fue el más adecuado para conservar la parsimonia, aun cuando un modelo de orden superior pudiera incrementar la determinación de éste. Los resultados se muestran en el Cuadro 4.

En el caso del NH_4^+ se aprecia que la máxima concentración en la savia a los 42 dds se logró con el SNA+DMPP, registrándose una respuesta máxima (R_{max}) a una dosis de N de $92 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, seguido por la urea-ESN, urea convencional y sulfato de amonio con dosis de N que variaron de 54 a $75 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Cuadro 4). Se destaca la mejor respuesta a la fuente nitrogenada con inhibidor de la nitrificación respecto a la mayor absorción de nitrógeno amoniacal por la planta. En esta etapa de rápida absorción de nutrientes, el retardo en la

tasa de nitrificación significa una mayor disponibilidad para las raíces del nitrógeno del suelo, antes de que sea sujeto a procesos de desnitrificación por bacterias.

Con relación al NO_3^- la R_{max} en la savia se obtuvo con el sulfato de amonio a una dosis de N de $53 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, seguido por la urea-ESN, SNA+DMPP y urea convencional con dosis que oscilaron entre 52 y $92 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. En el suelo, se obtuvo la R_{max} de NO_3^- con SNA+DMPP a la dosis de $92 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, seguido por el sulfato de amonio, urea-ESN y urea convencional (Cuadro 4). A los 62 dds se lograron valores mayores de R_{max} con SNA+DMPP y con el sulfato de amonio en dosis de N cercanas a $50 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. En la savia también la urea-ESN alcanzó valores relativamente altos de R_{max} tanto para NH_4^+ como para NO_3^- . Sin embargo, en el suelo, las dos formas de urea mostraron valores bajos de R_{max} tanto para NH_4^+ como para NO_3^- , lo que se atribuye a los bajos contenidos de materia orgánica en el suelo estudiado (1,08 % en promedio), dada la asociación positiva que existe

entre la actividad ureásica y el contenido de materia orgánica (Montero y Sagardoy, 2009). De todas formas, la urea-ESN superó en la mayoría de los casos a la urea convencional (Cuadro 4), reflejando una mayor eficiencia de uso en la urea de liberación controlada.

Comparando los niveles de absorción de nitrógeno (NH_4^+ y NO_3^-) por la planta se observó

que a los 62 dds, las Rmax de las fuentes nitrogenadas evaluadas fueron aproximadamente la mitad de las obtenidas a los 42 dds, mientras que las concentraciones en el suelo fueron mucho mayores. Esto es consistente con el hecho de que en este momento del ciclo del cultivo (62 dds), los requerimientos de nutrientes y la tasa de absorción deben ser menores que a los 42 dds.

Cuadro 4. Contenidos de nitrato y amonio a la dosis máxima (relativa) de nitrógeno encontrada en la amplitud de valores evaluados a través de análisis de regresión lineal, a los 42 y 62 días después de la siembra (dds) del maíz. DMax= Dosis máxima de N; RMax= Respuesta máxima a la fuente nitrogenada aplicada

Fuente de N	Parámetros estadísticos	42 dds				62 dds			
		$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
		NH_4^+ savia	NO_3^- savia	NH_4^+ suelo	NO_3^- suelo	NH_4^+ savia	NO_3^- savia	NH_4^+ suelo	NO_3^- suelo
UC	DMax	75	92	92	92	92	92	92	92
	RMax	1255	736	4,21	2,25	532	261	6,65	16,93
	C.V. %	16,16	9,07	23,59	57,29	11,48	11,95	18,98	7,87
	R ²	87,2	95,9	32,6	81,8	93,3	94,7	98,4	98,7
	Lineal	*	*	*	*	*	*	*	*
	Cuadrático	*	-	-	*	-	*	*	-
SNA+DMPP	DMax	92	53	92	92	48	50	46	47
	RMax	1378	917	2,99	16,51	668	455	24,88	64
	C.V. %	14,29	8,70	32,29	18,38	11,11	7,22	32,47	4,25
	R ²	89,5	97,5	86,5	96,1	97,5	99,1	95,7	99,8
	Lineal	*	*	*	*	*	*	*	*
	Cuadrático	-	*	*	*	*	*	*	*
Urea-ESN	DMax	54	92	0	92	92	92	92	64
	RMax	1305	921	2,97	6,48	695	347	6,13	17,53
	C.V. %	19,91	5,99	38,12	15,54	12,66	10	24,81	4,41
	R ²	83,5	98,6	93,4	98,4	94,2	89,6	96,6	99,5
	Lineal	*	*	*	*	*	*	*	*
	Cuadrático	*	-	*	*	-	-	*	*
SA	DMax	70	53	0	50	52	52	52	48
	RMax	1210	957	2,97	15	756	447	26,71	63
	C.V. %	25,07	7,49	38,89	9,27	7,52	6,64	38,97	6,86
	R ²	72,6	98,3	92,6	99,3	98,5	99,0	86,5	99,7
	Lineal	*	*	*	*	*	*	*	*
	Cuadrático	*	*	*	*	*	*	*	*

*Indica significación del factor dosis en su forma lineal y/o cuadrática

CONCLUSIONES

La nitrificación del amonio puede ser disminuida con la aplicación de sulfonitrato de amonio + 3,4-DMPP; el cual resultó más efectivo en el retardo de la tasa de nitrificación en la

mayoría de los casos evaluados. El sulfato de amonio permitió también una buena disponibilidad de nitrógeno para la absorción por la planta. En general, la urea-ESN mostró mayor eficiencia de uso que la urea convencional, aunque en el suelo, las dos formas de urea presentaron

valores bajos de R_{max} tanto para NH_4^+ como para NO_3^- , lo que se atribuyó a los bajos contenidos de materia orgánica en el suelo. Las respuestas máximas obtenidas a partir de modelos fijados se lograron a dosis intermedias de nitrógeno para todas las fuentes, excepto para la urea convencional; ésta última resultó la menos efectiva de las fuentes nitrogenadas evaluadas en cuanto a acumulación de nitrógeno y disponibilidad para la planta. A los 42 dds las cantidades de amonio y nitrato en la savia fueron mayores que a los 62 dds, mientras que en el suelo fue al contrario, lo cual es consistente con la tasa de absorción de la planta de maíz en ese momento de su ciclo. La determinación de la respuesta máxima a las fuentes nitrogenadas permitió conocer la mejor dosis a la cual se obtiene esa respuesta bajo las condiciones del experimento, lo cual puede servir de guía para seleccionar las cantidades de nitrógeno a aplicarse, evitando así contaminación y gasto innecesario de fertilizante.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela, por el apoyo a través del Proyecto de Grupo N° 01.5820.2006.

LITERATURA CITADA

- Barrios, M., R. Killorn y J. García. 2010. Nitrificación del amonio a partir de un fertilizante de liberación controlada y urea convencional en dos suelos de Iowa, EEUU. *Bioagro* 22(3): 193-200.
- Boutell, C. y M. Toribio. 2006. Volatilización del amoníaco (Parte II). *Investigación y Desarrollo* N° 7. 8 p. <http://www.profertilnutrientes.com.ar/images/archivos/?id>. (consulta del 17/09/2012)
- Dowbenko, R.E. 2007. New fertility product-ESN: Controlled-release nitrogen for enhanced nitrogen efficiency and improved environmental safety. *Agrium Advance Technologies Inc. Annual Report*. 10 p.
- Ferraris, G., L. Couretot y M. Toribio. 2010. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz en Pergamino (BsAs). Efectos de fuente, dosis y uso de inhibidores. *Inta-Pergamino. Profertil. Argentina. Publicación miscelánea*. 22 p.
- Husted, S., C. Hebban y M. Mattson. 2000. A critical experimental evaluation of methods for determination of NH_4^+ in plant tissue, xylem sap and apoplastic fluid. *Physiologia Plantarum* 109(2): 167-179.
- Irañeta, J., L. Sánchez y A. Malumbres. 2010. Importancia agronómica y medioambiental de la fertilización. *Navarra Agraria* 183: 9-14.
- Kimball, B.A., K. Kobayashi y M. Bindi. 2002. Responses of agricultural crops to free air CO_2 enrichment. *Advances in Agronomy* 77: 293-368.
- Kponblekau-A., K. y R. Killorn. 1996. Nitrification of ammonium nitrogen in soils treated with XDE-474. *Soil Science Society of America Journal*. 60: 1482-1489.
- La Manna, L., C. Buduba, V. Alonso, M. Davel, C. Puentes y J. Irisarri. 2007. Comparación de métodos para la determinación de materia orgánica en suelos de la región Andino- Patagónica: efectos de la vegetación y el tipo de suelo. *Ciencia del Suelo* 25(2): 179-188.
- Márquez, A. y F. Cánovas. 2004. Absorción y asimilación de amonio. *In: J. Monza y A. Márquez (eds.). El Metabolismo del Nitrógeno en las Plantas. Almuzara Estudios. Córdoba. España. pp. 65-93.*
- Montero, F. y M. Sagardoy. 2009. Actividad enzimática de ureasa en suelos de Buenos Aires, Entre Ríos, Córdoba y Santa Fe cultivados bajo siembra directa. <http://www.engormix.com/MA-agricultura/articulos/actividad-enzimatica-ureasa-suelos-t2371/p0.htm> (consulta del 17/09/2012).
- Monza, J., O. Borsani y C. Arrese-Igor. 2004. Relaciones entre el metabolismo del carbono y el nitrógeno. *In: J. Monza y A. Márquez (eds.). El Metabolismo del Nitrógeno en las Plantas. Almuzara Estudios. Córdoba. España. pp. 121-138.*
- Özden, Ö. 2010. Effects of source and rate of nitrogen fertilizer on yield, yield components and quality of winter rapeseed (*Brassica napus* L.). *Chilean Journal of Agriculture Research* 70 (1): 132-141.

14. Patil, J.T., R.S. Jain, M.R. Sharma y R.R. Shah. 2005. Desarrollo y validación del método de cromatografía líquida de alto rendimiento para la cuantificación de oxitocina en formulación inyectable. *Ars Pharmaceutica* 46 (4): 399-410.
15. Schjoerring, J.K., S. Husted, G. Mäck y M. Mattson. 2001. The regulation of ammonium translocation in plants. *Journal of Experimental Botany* 53: 883-890.
16. Torres, M. 2005. Fertilizar eficientemente para reducir el riesgo ambiental: nitrógeno. *Medio Ambiente Info.* <http://www.medio-ambiente.info/modules.php?op=modload&name=New&file=article&sid=382> (consulta del 17/09/2012).