

# RECUPERACIÓN DE NITRÓGENO APLICADO EN FORMA FRACCIONADA EN MAÍZ FORRAJERO UTILIZANDO <sup>15</sup>N

## FORAGE CORN NITROGEN RECOVERY FROM A SPLIT <sup>15</sup>N FERTILIZER APPLICATION

José Antonio Cueto-Wong<sup>1</sup>; David Guadalupe Reta-Sánchez<sup>2</sup>;  
Uriel Figueroa-Viramontes<sup>2</sup>; Héctor Mario Quiroga-Garza<sup>2</sup>;  
Aurelio Ramos-Rodríguez<sup>3</sup>; Juan José Peña-Cabriales<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). km 6.5 margen derecha Canal Sacramento. Gómez Palacio, Dgo. MÉXICO. C. P. 35140 Apdo. Postal 41., Cd. Lerdo, Durango. MÉXICO. C. P. 35150.

<sup>2</sup>Campo Experimental La Laguna, (INIFAP). Blvd. José Santos Valdéz 1200 Pte. Col. Centro. Matamoros, Coahuila. MÉXICO. C. P. 27440 Correo-e: quiroga.mario@inifap.gob.mx. (\* Autor para correspondencia).

<sup>3</sup>Instituto Tecnológico de Torreón. km 7.5, Carretera Torreón-San Pedro, Ejido Ana, Torreón, Coahuila. MÉXICO.

<sup>4</sup>CINVESTAV Irapuato, km 9.6 Libramiento Norte, Irapuato Guanajuato, MÉXICO. C. P. 36822.

### RESUMEN

La aplicación fraccionada de fertilizantes nitrogenados incrementa la eficiencia en el uso del N por el maíz. El objetivo del presente estudio fue determinar la eficiencia de recuperación del N, en maíz forrajero, aplicando en forma fraccionada el fertilizante nitrogenado en cuatro etapas fenológicas del cultivo. El experimento se realizó entre 1999 y 2000, en Gómez Palacio, Durango, México. Se aplicó una dosis de 300 kg N·ha<sup>-1</sup> dividida en cuatro fracciones de 75 kg N·ha<sup>-1</sup> cada una, correspondientes a cuatro etapas fenológicas del maíz: a la siembra (V0), encañe (V6), inicio de crecimiento de mazorca (V12) y emergencia de estigmas (R1). Cada una de las etapas fenológicas recibió una sola vez fertilizante marcado con <sup>15</sup>N, y fertilizante comercial en el resto de las etapas, generándose así cuatro tratamientos. El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones. Se cuantificó el rendimiento de materia seca y el N recuperado por el cultivo. La eficiencia de recuperación del N alcanzó valores de 42.7, 83.2, 35.1 y 10.0 % cuando el fertilizante marcado se aplicó en las fases de siembra, V6, V12 y R1, respectivamente. Estos datos sugieren que la mejor manera de aplicación del fertilizante nitrogenado es en forma fraccionada (tres aplicaciones) hasta la fase V12, con una mayor proporción en la fase V6. En promedio, el maíz acumuló N en su parte aérea en el orden de los 243.2 kg·ha<sup>-1</sup>, de los cuales 114.8 kg provinieron del suelo. De los 300 kg N·ha<sup>-1</sup> aplicado, 42.8 % fue recuperado por el cultivo, 15.6 % se recuperó en el suelo a una profundidad de 60 cm y 41.7 % no fue contabilizado.

**PALABRAS CLAVE:** *Zea mays* L., rendimiento de materia seca, contenido y extracción de N, fases fenológicas, nitrógeno marcado.

### ABSTRACT

Split applications of nitrogen fertilizers according to maize requirements increase N use efficiency. However, few studies have been carried out in Mexico using N fertilizer labeled with <sup>15</sup>N to evaluate the recovery of N applied. The objective of this study was to determine the N recovery efficiency in maize using <sup>15</sup>N, when split N fertilizers are applied at four growth stages. The experiment was carried out between 1999 and 2000 at Gomez Palacio, Durango, Mexico. Four treatments were evaluated using N rates of 300 kg·ha<sup>-1</sup>. Split application of 75 kg·ha<sup>-1</sup>, at planting, tassel initiation (V6), beginning of fast-growing ear (V12) and silking (R1) growth stages was applied. A growth stage was labeled with <sup>15</sup>N per treatment. A randomized complete block design with three replications was used. Dry matter yield, N recovered by crop and soil were determined. Nitrogen recovery efficiency reached values of 42.7, 83.2, 35.1 and 10.0 % when labeled fertilizer was applied at planting, V6, V12, and R1 growth stages, respectively. These data suggest that the best way to apply N fertilizer is using three split applications, from planting up to V12 stage, with a greater proportion at V6 growth stage. Maize removed 243.2 kg N·ha<sup>-1</sup>, with 114.8 kg supplied by the soil N. From the applied N fertilizer (300 kg·ha<sup>-1</sup>), crop recovered 42.8 %, 15.6 % was recovered from soil 0-60 cm depth, and 41.7 % of the applied N was unaccounted.

**KEYWORDS:** *Zea mays* L., dry matter yield, concentration and uptake N, growth stages, labeled N.



Recibido: 8 de octubre, 2012  
Aceptado: 27 de mayo, 2013  
doi:10.5154/r.inagbi.2012.10.009

## INTRODUCCIÓN

El maíz para ensilaje, es apreciado por su alto contenido energético (Goodrich y Meiske, 1985; Schwab *et al.*, 2003). La producción de leche de bovino es la principal actividad agropecuaria en la Comarca Lagunera, y uno de los principales insumos para la dieta del ganado es el ensilaje de maíz, segundo forraje en importancia después de la alfalfa. En la región, el maíz forrajero, presenta potenciales de rendimiento de 22 a 24 t·ha<sup>-1</sup> de materia seca; para lo cual el cultivo remueve en su materia seca entre 244 y 267 kg N·ha<sup>-1</sup>. Con el fin de obtener los máximos rendimientos, los productores con frecuencia tienden a aplicar dosis de fertilizantes químicos y abonos orgánicos nitrogenados superiores a las requeridas por el cultivo. Lo anterior, se refleja en una baja eficiencia de aprovechamiento y rentabilidad, así como un alto potencial de contaminación con nitratos de los forrajes, suelos y aguas (Cueto *et al.*, 2006).

La aplicación inadecuada de los fertilizantes nitrogenados en regiones con agricultura intensiva ha sido parcialmente responsable de la contaminación del agua del subsuelo (Dupuy *et al.*, 1997; Klocke *et al.*, 1999). Para reducir el riesgo de contaminación por nitratos y mantener niveles de producción competitivos es conveniente conocer los requerimientos nutrimentales de los cultivos, el tipo de fertilizante apropiado y la forma y tiempo en que éste debe aplicarse (Klocke *et al.*, 1999).

Una estrategia para incrementar la eficiencia en el uso de fertilizantes nitrogenados es suministrar el N de acuerdo a las necesidades del cultivo (Andraski *et al.*, 2000). Para lograr esto, uno de los métodos más utilizados es aplicar la dosis de N en forma fraccionada en dos o más partes considerando el N disponible en el suelo y la demanda del nutrimento de acuerdo al desarrollo del maíz. Esta práctica incrementará la recuperación del fertilizante nitrogenado por el cultivo, si se compara con la aplicación total del N en la siembra (Russelle *et al.*, 1983; Jokela y Randall, 1997); probablemente y debido a que en la siembra el fertilizante nitrogenado presenta mayor exposición a los factores que causan pérdidas de N como la lixiviación y una baja demanda por el cultivo, al inicio del ciclo.

A diferencia de las investigaciones tradicionales, donde se utilizan fertilizantes convencionales, el uso de fertilizantes nitrogenados enriquecidos con el isótopo <sup>15</sup>N permite determinar con gran precisión el destino del N aplicado (Quiroga *et al.*, 2009). Zagal *et al.* (2003) indican que en diversos estudios con diferentes especies, en los cuales se han utilizado fertilizantes marcados con <sup>15</sup>N, se recupera entre un 20 y 87 % del N aplicado en el primer cultivo, entre 10 y 35 % es retenido en el suelo y de 1 a 35 % es asignado a pérdidas. Kengni *et al.* (1996) encontraron en el cultivo de maíz, que al aplicar una dosis de 260 kg N·ha<sup>-1</sup>, y utilizando fertilizante enriquecido con <sup>15</sup>N, se obtuvo una extracción de 288 kg N·ha<sup>-1</sup>; de los cuales 169 kg N·ha<sup>-1</sup> provinieron del fertilizante dando una eficiencia de recuperación del N de 65 %; y después de la cosecha se lixivio-

ron 156 kg de N·ha<sup>-1</sup>, de los cuales, 43.5 kg N·ha<sup>-1</sup> (17 %) provinieron del fertilizante aplicado. Cuando la disponibilidad de N presente en el suelo se incrementa, se han obtenido valores menores de recuperación del N que van de 49 % (Hesterman *et al.*, 1987) a valores entre 21.4 % (Zagal *et al.*, 2003) y 19.9 % (Azam *et al.*, 1985). No obstante la precisión con la que es factible determinar la recuperación por el cultivo y el suelo del N aplicado, en la actualidad son pocos los estudios realizados en México que utilizan fertilizantes marcados con <sup>15</sup>N debido al alto costo de éstos y de los análisis de las muestras que los contienen. El objetivo del presente estudio fue determinar la eficiencia de recuperación del N, en maíz forrajero, aplicando en forma fraccionada el fertilizante nitrogenado en las etapas de siembra (V0), V6, V12 y R1.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en terrenos del campo experimental del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, localizado en Gómez Palacio, Durango, México (25° 58' LN, 103° 45' LO y 1,128 msnm). La siembra se realizó en húmedo el 24 de abril de 1999. El suelo experimental a una profundidad de 0-30 cm presentó una textura migajón arcillosa, pH de 8.4, conductividad eléctrica en pasta de saturación de 1.85 dS·m<sup>-1</sup> y 1.12 % de materia orgánica por el método de Walkley y Black (SEMARNAT, 2000). Al inicio del experimento se estimó que el suelo contenía 14.2 mg·kg<sup>-1</sup> de N inorgánico por el método de arrastre de vapor (SEMARNAT, 2000).

Se evaluaron cuatro tratamientos (época de aplicación del <sup>15</sup>N: siembra y antes de cada riego de auxilio) con una dosis de fertilización nitrogenada total de 300 kg·ha<sup>-1</sup>; dividida en cuatro aplicaciones de 75 kg N, las cuales se aplicaron en siembra, y antes del primero, segundo y tercer riego de auxilio, que corresponden de acuerdo con Ritchie *et al.* (1993) a las fases fenológicas de siembra (V0), encañe (V6), inicio de crecimiento de mazorca (V12) y emergencia de estigmas (R1), respectivamente. Al momento de irse presentando cada etapa, se aplicó el fertilizante <sup>15</sup>N (al 1 % de abundancia); de esta forma el tratamiento que recibió el <sup>15</sup>N a la siembra (V0), en el resto de las tres etapas recibió fertilizante N convencional sin marcar, de la misma forma el tratamiento (V6) sólo recibió <sup>15</sup>N en esa etapa, y así para las otras dos etapas.

El genotipo de maíz utilizado fue el híbrido '3025W' de ciclo intermedio. Los tratamientos se establecieron bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. El fertilizante nitrogenado marcado (<sup>15</sup>N) se aplicó en microparcels ubicadas en la parte central de las parcelas grandes, que consistieron de 14 surcos con una separación de 0.60 y 10 m de longitud. Las microparcels se ubicaron en la parte central de los surcos 7, 8 y con una longitud de 2.0 m. La parcela útil en las parcelas grandes

fueron 8 m lineales de los surcos 11 y 12 (10.8 m<sup>2</sup>). En las microparcelas se cosecharon 0.5 m lineales centrales del surco número 8.

Todo el experimento recibió al momento de la siembra una dosis de 100 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·ha<sup>-1</sup> en forma de superfosfato de calcio triple. El fertilizante nitrogenado se colocó en banda a un lado de las semillas o de las hileras de plantas. En las parcelas grandes se utilizó como fuente nitrogenada el sulfato de amonio (20.5 % de N), mientras que las microparcelas se fertilizaron con sulfato de amonio (20.5 % de N y 1 % de exceso de <sup>15</sup>N). Se aplicaron cuatro riegos de auxilio a los 21, 41, 68 y 86 días después de la siembra (dds). Se hicieron dos escardas antes del primero y segundo riego de auxilio. El control de plagas se realizó mediante una aplicación de insecticida a los 20 dds, que consistió de (Clorpirifos) en dosis de 1 L·ha<sup>-1</sup> y (Cipermetrina) en dosis de 0.4 L·ha<sup>-1</sup>, para el control de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*).

Para cuantificar la cantidad de N en el suelo, se realizaron muestreos tanto en las parcelas grandes como en las microparcelas a una profundidad de 0-30 y 30-60 cm. Las muestras se secaron al ambiente, molieron y tamizaron hasta pasar por un tamiz de 0.1 mm de abertura para la determinación en el laboratorio de las concentraciones de nitrógeno nítrico (N-NO<sub>3</sub>), amoniacal (N-NH<sub>4</sub>) y total (NT) por los métodos convencionales (Chapman y Parker, 1986). De la misma forma, las muestras de planta se secaron a peso constante a 65 °C, se molieron hasta pasar por una malla de 0.1 mm de abertura. La determinación de <sup>15</sup>N en muestras de suelo y tejido vegetal se realizaron en el año 2000 en un laboratorio especializado en los Estados Unidos de América (Isotope Services Inc. Los Álamos, NM, USA).

En la parte aérea del cultivo y en el suelo se determinó el porcentaje de nitrógeno derivado del fertilizante (PNDF), la cantidad de N total derivado del fertilizante (CNDF) y el porcentaje de N recuperado del fertilizante aplicado (PNR). Los valores se determinaron en cada etapa de fertilización en estudio y también considerando el total de las cuatro etapas, utilizando las siguientes ecuaciones y 0.3663 % como la abundancia natural de <sup>15</sup>N en el fertilizante (Janzen *et al.*, 1990).

$$\text{PNDF}(\%) = [(\% \text{ } ^{15}\text{N en muestra} - \text{en muestra testigo sin } ^{15}\text{N}) / (\% \text{ } ^{15}\text{N en fertilizante} - 0.3663\%)] \times 100 \quad (1)$$

$$\text{CNDF}(\text{g}) = (\% \text{ PPDF}/100) \times (\% \text{ N en muestra}/100) \times \text{peso muestra (g)} \quad (2)$$

$$\text{NR}(\%) = (\text{CNDF}/\text{cantidad de fertilizante N aplicado}) \times 100 \quad (3)$$

Los datos obtenidos se analizaron con el programa estadístico SAS (SAS Institute, 1989), mediante el procedimiento PROC ANOVA de acuerdo con el diseño experi-

mental utilizado ( $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.05$ ). La comparación de medias de tratamiento se realizó utilizando la prueba de diferencia mínima significativa (DMS) con un nivel de significación de 0.05.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Rendimiento de Forraje y Contenido de N y <sup>15</sup>N

No se encontraron diferencias significativas ( $P \geq 0.05$ ), en el rendimiento de materia seca. Esta respuesta fue la esperada, puesto que en los cuatro tratamientos se utilizó la misma dosis total de fertilizante nitrogenado y a que en todos los tratamientos hubo suficiente y similar suministro de nitrógeno durante el ciclo para la acumulación de materia seca (Cuadro 1). Los niveles de rendimiento de forraje obtenidos en esta investigación son similares a los mayores rendimientos obtenidos en otros estudios realizados en la Comarca Lagunera en los que se aplicaron con dosis altas de nitrógeno (250 a 375 kg·ha<sup>-1</sup>) y un óptimo manejo agronómico, en los que se reportan rendimientos de materia seca de 21,821 kg·ha<sup>-1</sup> (Reta *et al.*, 2005) a 23,929 kg·ha<sup>-1</sup> (Cueto *et al.*, 2006).

CUADRO 1. Efecto de la fertilización fraccionada de N en maíz sobre el rendimiento de materia seca, contenido de N y <sup>15</sup>N. Dosis de 75 kg <sup>15</sup>N·ha<sup>-1</sup> en cuatro fases fenológicas: Siembra (V0); Encañe (V6); Inicio de crecimiento de mazorca (V12) y Emergencia de estigmas (R1).

Tratamiento (fase desarrollo)	Materia Seca kg·ha <sup>-1</sup>	Contenido de N %	Contenido de <sup>15</sup> N %
1 (V0)	19,299 a <sup>c</sup>	1.10 a	0.4658 b
2 (V6)	21,746 a	1.18 a	0.5507 a
3 (V12)	21,010 a	1.10 a	0.4431 c
4 (R1)	23,118 a	1.19 a	0.3860 d
DMS <sub>05</sub> <sup>y</sup>	NS	NS	0.0167
CV %	27.2	6.7	1.8

<sup>c</sup> Medias seguidas con la misma letra en cada columna no son diferentes (DMS,  $P = 0.05$ ).

<sup>y</sup> DMS<sub>05</sub> = Diferencias Mínima Significativa  $P = 0.05$ , NS = Diferencias No significativas, CV = Coeficiente de Variación.

El contenido de N en la materia seca, al ser la misma dosis total de fertilización nitrogenada, fue estadísticamente igual en los cuatro tratamientos ( $P \geq 0.05$ ), con un promedio de 1.14 % (Cuadro 1). Por otra parte, sí hubo diferencias ( $P \leq 0.05$ ) en la concentración de <sup>15</sup>N en la materia seca entre las cuatro fases de aplicación del fertilizante marcado. El mayor contenido correspondió al tratamiento 2, donde el <sup>15</sup>N se aplicó antes del primer riego de auxilio (fase V6), con un contenido de 0.5507 % <sup>15</sup>N. El menor contenido de <sup>15</sup>N (0.3860 %), y estadísticamente diferente al resto de los tratamientos ( $P \leq 0.05$ ) correspondió al tratamiento 4, en el que el fertilizante nitrogenado se aplicó antes del tercer riego de auxilio (fase R1). Este último valor fue sólo ligeramente superior al contenido natural de <sup>15</sup>N en el maíz encontrado en este estudio, 0.3692 %, lo que indica un muy bajo aprovechamiento del N aplicado

en la etapa fenológica correspondiente a la emergencia de las estigmas (fase R1), caso contrario al tratamiento 2 (fase V6), cuyo contenido de  $^{15}\text{N}$  indica el mayor aprovechamiento del N aplicado durante el ciclo de crecimiento. Las concentraciones de  $^{15}\text{N}$  en la materia seca cuando se aplicó el fertilizante marcado en la siembra (fase V0) en el tratamiento 1 y antes del segundo riego de auxilio (fase V12) en el tratamiento 3, fueron diferentes entre sí, y superior a los valores obtenidos cuando el fertilizante marcado se aplicó antes del tercer riego de auxilio (fase R1) en el tratamiento 4 (Cuadro 1).

#### Porcentaje y cantidad de nitrógeno derivado del fertilizante (PNDF y CNDF)

Del total del N acumulado en la parte aérea de la planta de maíz, 27.5 % (PNDF), provino del fertilizante aplicado en la fase V6, siendo estadísticamente ( $P \leq 0.05$ ) superior al N aportado por el fertilizante marcado aplicado en las otras fases en estudio, y correspondió a 62.4 kg N·ha<sup>-1</sup> (CNDF) de los 75 kg N ha<sup>-1</sup> aplicados en dicha fase de desarrollo (Cuadro 2). La fertilización nitrogenada en la siembra contribuyó con el 15.3 % del N total extraído por el maíz, 11.7 % provino del fertilizante aplicado en la fase V12 y tan solo 2.7 % de la fertilización en la fase R1. Del total del N acumulado en la materia seca de la planta de maíz, el 57.1 % provino del N aplicado como fertilizante en las cuatro fases de crecimiento en estudio y el restante 42.9 % provino del N mineral y orgánico residentes en el suelo, más el aportado por el agua de riego.

#### Nitrógeno recuperado en planta (NR<sub>p</sub>)

De las cuatro fases en las que se aplicó el fertilizante marcado con  $^{15}\text{N}$ , la mayor recuperación del N se presentó cuando ésta se realizó en la fase V6 (21 dds), el 83.2 % de los 75 kg N·ha<sup>-1</sup> aplicados, fueron recuperados en la parte aérea del maíz al final del ciclo (Figura 1), lo anterior es el resultado de que en esta etapa de desarrollo del maíz, es cuando ocurre la mayor tasa de acumulación de materia seca (Ritchie *et al.*, 1993). Este nivel de recuperación fue estadísticamente superior ( $P \leq 0.05$ ) a las recuperaciones registradas en las otras tres fases de fertilización. La primera fertilización (siembra) fue estadísticamente igual a la realizada en la fase V12 (41 dds), presentando 42.7 y 35.1 % de NR<sub>p</sub> de los 75 kg N·ha<sup>-1</sup> aplicados en cada una, respectivamente. Por último, la menor tasa de NR<sub>p</sub> se presentó en la fertilización realizada en la fase R1 (68 dds), con apenas un 10 % del N aplicado, esto es 7.5 kg N·ha<sup>-1</sup>.

El manejo y uso eficiente del N en los sistemas de producción agrícolas son fundamentales para evitar las aplicaciones en exceso y al mismo tiempo evitar riesgos potenciales de contaminación de suelo y aguas subterráneas por lixiviación de N-NO<sub>3</sub>. El reto en la producción agrícola para maximizar rendimientos, ganancias económicas y evitar la degradación o contaminación del medio ambiente; es lograr una sincronización entre las demandas por N del cultivo y el adecuado suministro de este nu-

CUADRO 2. Nitrógeno derivado del fertilizante aplicado en forma fraccionada. Dosis de 75 kg  $^{15}\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}$  en cuatro fases fenológicas: Siembra (V0); Encañe (V6); Inicio de crecimiento de mazorca (V12) y Emergencia de estigmas (R1).

Tratamiento (fase desarrollo)	PNDF <sup>z</sup> %	CNDF kg N·ha <sup>-1</sup>
1 (V0)	15.3 b <sup>y</sup>	32.0 b
2 (V6)	27.5 a	62.4 a
3 (V12)	11.7 c	26.3 b
4 (R1)	2.7 d	7.5 c
DMS <sub>05</sub> <sup>x</sup>	2.21	12.0
CV %	7.7	18.7

<sup>z</sup>PNDF = Porcentaje del Nitrógeno derivado del fertilizante. CNDF = Cantidad del nitrógeno derivado del fertilizante.

<sup>y</sup>Medias seguidas con la misma letra en cada columna no son diferentes (DMS,  $P = 0.05$ ).

<sup>x</sup>DMS<sub>05</sub> = Diferencias Mínima Significativa  $P = 0.05$ , CV = Coeficiente de Variación.

trimento, sin llegar a provocar deficiencias y toxicidades (Cassman *et al.*, 2002). En este sentido y de acuerdo con los resultados observados en el presente estudio, la cuarta fertilización en la fase R1, correspondiente a la emergencia de estigmas, contribuirá tan solo con el 2.7 %, al N total removido por la planta de maíz forrajero durante todo su ciclo. Lo anterior coincide con lo encontrado por Edwards y Barber (1976) quienes reportan que la mayor absorción de N por las raíces de maíz ocurre entre los 18 y 24 dds, decreciendo exponencialmente a los 58 dds. En nuestro estudio, las mayores contribuciones al N total en la planta de maíz, provinieron de las primeras dos fertilizaciones, a la siembra y en la fase V6, a los 21 dds.

La aplicación inadecuada de los fertilizantes nitrogenados en regiones con agricultura intensiva ha sido parcialmente responsable de la contaminación del agua del subsuelo (Dupuy *et al.*, 1997; Klocke *et al.*, 1999). Estudios en la Comarca Lagunera han documentado concentraciones excesivas de nitratos en agua subterránea (Cueto *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2006). Para reducir el riesgo de contaminación por nitratos y mantener niveles de producción competitivos es conveniente conocer los requerimientos nutrimentales de los cultivos, el tipo de fertilizante apropiado, la forma y el tiempo en que debe aplicarse. Varios investigadores sugieren como estrategia para optimizar el uso del N, incrementar su eficiencia y evitar aplicaciones que conduzcan a una subutilización, la aplicación del N en forma fraccionada (Klocke *et al.*, 1999), y de acuerdo a los requerimientos del cultivo (Andraski *et al.*, 2000).

Los valores de recuperación observados en el presente estudio de acuerdo a la fase de aplicación, indican que la fertilización nitrogenada fraccionada en las fases de siembra, V6 y V12 puede contribuir a lograr la mayor eficiencia de uso del N, debido a la mayor capacidad del cultivo para recuperar el fertilizante nitrogenado aplicado (Russelle *et al.*, 1983; Jokela y Randall, 1997). La mayor parte del N debe aplicarse en la fase V6, cuando la planta inicia el crecimiento rápido de órganos vegetativos y se están diferenciando los órganos reproductivos (Jokela y Randall, 1989; Ritchie *et al.*, 1993). La aplicación de fertilizante nitrogenado en la fase R1 presentó valores de recuperación muy bajos, por lo que la probabilidad de pérdidas de N

por lixiviación es alta durante el llenado de grano y después de la cosecha (Kengni *et al.*, 1996), y por lo tanto debe evitarse o limitarse al máximo la aplicación de fertilizante en esta etapa.

### Nitrógeno recuperado total en planta (NRT<sub>p</sub>)

El NRT<sub>p</sub>, la suma del N recuperado en las cuatro fases de aplicación de fertilizante, alcanzó 42.8 %, con un rango de 40.1 a 45.2 %, esto es de los 300 kg N·ha<sup>-1</sup> aplicados en el fertilizante durante el ciclo, 128.4 kg N·ha<sup>-1</sup> fueron acumulados en la materia seca de la parte aérea. El total de N removido por el maíz forrajero fue de 243.2 kg·ha<sup>-1</sup>, por lo que los 114.8 kg N·ha<sup>-1</sup> restantes provinieron del N mineral y orgánico existente en el suelo antes de la siembra. Este valor de recuperación del N aplicado en el fertilizante es similar al observado en otros estudios. Hesterman *et al.* (1987) con 49 %, Zhou *et al.* (1998) con 31 a 54.6 % y Zhang *et al.*, (2010) con 36.3 a 42.7 % de recuperación del N aplicado.

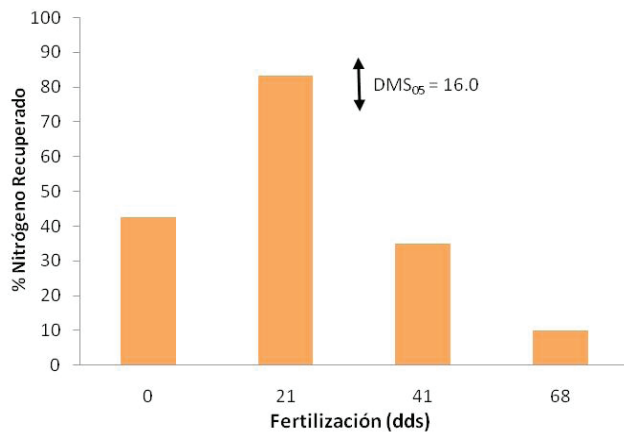


FIGURA 1. Nitrógeno recuperado en la parte aérea del maíz (NR<sub>p</sub>) proveniente del N aplicado (75 kg N ha<sup>-1</sup>) en cada una de las cuatro fertilizaciones realizadas: 0 (Siembra, V0), 21 (Encañe, V6), 41 (Inicio de crecimiento de la mazorca, V12) y 68 días después de la siembra (Emergencia de los estigmas, R1).

### Recuperación de nitrógeno en el suelo (NR<sub>s</sub>)

La cantidad de N recuperado en el suelo (NR<sub>s</sub>) evaluado al terminar el ciclo del maíz fue estadísticamente ( $P \geq 0.05$ ) igual entre las cuatro fechas de aplicación del fertilizante <sup>15</sup>N, fluctuando de 3.2 a 4.7 % en el perfil de 0-60 cm, para cada una de las fertilizaciones. La NR<sub>s</sub> total, en las cuatro aplicaciones fue de 12.8 a 18.4 %. Estos valores son similares a los encontrados por Glendon *et al.* (1994), quienes reportan una recuperación de N derivado del fertilizante en el suelo fue de 17 %. Sin embargo, estos valores se consideran bajos en comparación con los obtenidos en otros estudios. Wienhold *et al.*, (1995) en el Norte de Dakota reportan recuperaciones en suelo del orden del 30 % y Zhang *et al.*, (2010) utilizando inhibidores de nitrificación encuentran recuperaciones del 34.8 a 48.2 %. Estas diferencias pueden ser atribuidas a las altas temperaturas que se presentan durante el ciclo del maíz en la región donde se realizó la presente investigación, las cuales son propicias tanto para la pérdida de N por volatilización como por lixiviación en forma de nitrato.

### Nitrógeno no recuperado (NNR)

El N perdido, ya sea por volatilización o por lixiviación hacia zonas más profundas del suelo muestreado al final del ciclo, fue contabilizado como N no recuperado (NNR). En este caso, las cuatro fases del desarrollo en las que se aplicó el fertilizante marcado fueron estadísticamente diferentes ( $P \leq 0.05$ ). La mayor pérdida del N aplicado como fertilizante se presentó en la fase R1, a los 68 dds, cuando el 86.2 % de los 75 kg N·ha<sup>-1</sup> aplicados no fueron recuperados en el sistema planta-suelo muestreado. Se presentaron pérdidas intermedias del N aplicado (75 kg·ha<sup>-1</sup>) cuando la fertilización se realizó en la siembra y en la fase V12, con valores de NNR de 52.6 y 61.7 %, respectivamente, entre los cuales no hubo diferencia estadística. La menor pérdida del N aplicado ocurrió al fertilizar en la fase V6 (21 dds), con un valor de NNR de 12.2 %, el cual fue estadísticamente inferior ( $P \leq 0.05$ ) al resto (Figura 2).

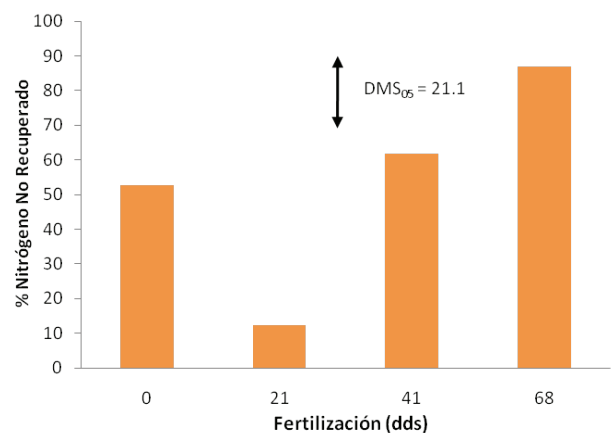


FIGURA 2. Nitrógeno no recuperado en el sistema planta-suelo (NR<sub>nr</sub>) del N aplicado (75 kg N·ha<sup>-1</sup>) en cada una de las cuatro fertilizaciones realizadas al maíz: 0, 21, 41 y 68 días después de la siembra (dds): Siembra (V0); Encañe (V6); Inicio de crecimiento de mazorca (V12) y Emergencia de estigmas (R1).

### Cantidad de nitrógeno no recuperado total

La cantidad de nitrógeno no recuperado total proveniente del aplicado en las cuatro fertilizaciones en conjunto (300 kg N·ha<sup>-1</sup>), fue en promedio 41.7 % equivalente a 125.1 kg N·ha<sup>-1</sup>. De esta cantidad de N, una parte estará contenida en el residuo del cultivo, una más pudo perderse hacia la atmósfera por desnitrificación microbológica y otra por lixiviación más allá de la zona radical. Cantidades similares son reportadas en otros estudios (Wienhold *et al.*, 1995; Azam *et al.*, 1985; Hetier y Cardon, 1996) en los cuales se encontraron valores de N no contabilizado entre 20 y 40 %. En este estudio no se evaluó el N en el componente raíz, en el residuo del cultivo después de la cosecha, ni se evaluó la cantidad de N derivado del fertilizante a mayor profundidad que 60 cm.

### CONCLUSIONES

La aplicación fraccionada del fertilizante nitrogenado en maíz forrajero de acuerdo con sus requerimientos durante

el ciclo de crecimiento, puede contribuir a lograr una mayor eficiencia en el uso del N. La eficiencia de recuperación del N alcanzó valores de 42.7, 83.2, 43.5 y 10.0 % en las fases V0, V6, V12 y R1, respectivamente. Esta información sugiere que la mayor eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado se logra al aplicarlo en forma fraccionada hasta la fase V12, con una mayor parte en la fase V6, cuando el maíz inicia el crecimiento rápido de órganos vegetativos y los órganos reproductivos se están diferenciando. La aplicación de N en la fase R1 incrementa las probabilidades de pérdidas de N debido a su bajo porcentaje de recuperación, por lo que debe evitarse o limitarse la fertilización en esta etapa.

## LITERATURA CITADA

- Andraski T. W.; Bundy L. G.; Brye K. R. 2000. Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrate leaching. *J. Environ. Qual.* 29: 1095-1103.
- Azam F.; Malik K. A.; Sajjad M. I. 1985. Transformations in soil and availability to plants of <sup>15</sup>N applied as organic and legume residues. *Plant and Soil.* 86: 3-13. doi: 10.1007/BF02185020
- Cassman K. G.; Dobermann A.; Walters D. T. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio.* 31: 132-140. doi: 10.1579/0044.7447.31.2.132
- Chapman H. D.; Parker F. P. 1986. Métodos de análisis para suelos, plantas y agua. Editorial Trillas, 5ª reimpresión. México, D.F. 195 p.
- Cueto W. J. A.; Reta S. D. G.; González C. G.; Orona C. I.; Estrada A. J. 2005. Características químicas de aguas de pozos profundos del acuífero de Villa Juárez, Durango. *AGROFAZ* 5: 869-874.
- Cueto W. J. A.; Reta S. D. G.; Barrientos R. J. L.; González C. G.; Salazar S. E. 2006. Rendimiento de maíz forrajero en respuesta a fertilización nitrogenada y densidad de población. *Rev. Fitotec. Mex.* 29(Núm. especial 2): 97-101.
- Dupuy A.; Banton O.; Razack M. 1997. Groundwater pollution by nitrates in a heterogeneous agricultural watershed: 1. Evaluation of inputs to the water table (Agriflux model). *Rev. Sci. Eau.* 10: 23-40.
- Edwards J. H.; Barber S. A. 1976. Nitrogen uptake characteristics of corn roots at low N concentrations as influenced by plant age. *Agron. J.* 68: 17-19.
- Glendon H. H.; Hesterman O. B.; Paul E. A.; Peters S. E.; Janke R. 1994. Fate of legume and fertilizer nitrogen-15 in a long cropping systems experiment. *Agron. J.* 86: 910-915.
- Goodrich R. D.; Meiske J. C. 1985. Corn and sorghum silages. *In: Forages. The Science of Grassland Agriculture.* Heath M. E.; Barnes R. F.; Metcalfe D. S. (eds). 4th. Ed. Iowa State University Press. Ames, Iowa, USA. pp: 527-536.
- Hesterman O. B.; Russelle M. P.; Sheaffer C. C.; Heichel G. H. 1987. Nitrogen utilization from fertilizer and legume residues in legume-corn rotations. *Agron. J.* 79: 726-731.
- Hetier J. M.; Cardon D. 1996. Balances del nitrógeno derivado del suelo y del fertilizante en un alfisol bajo maíz. *Agronomía Tropical* 47: 217-237.
- Janzen H.H.; Bole J.B.; Biederbeck V.O.; Slinkard A.E. 1990. Fate of N applied as green manure or ammonium fertilizer to soil subsequently cropped with wheat at three sites in western Canada. *Can. J. Soil. Sci.* 70:313-323. doi: 10.4141.cjss10065
- Jokela W. E.; Randall G. W. 1989. Corn yield and residual soil nitrate as affected by time and rate of nitrogen application. *Agron. J.* 81: 720-726.
- Jokela W. E.; Randall G. W. 1997. Fate of fertilizer nitrogen as affected by time and rate of application on corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1695-1703.
- Kengni L.; Vachand G.; Thony J. L.; Laly R.; Barino B.; Recous S. 1996. Field measurement of water and nitrogen losses under irrigated maize by the combined use of neutron moisture meter, tensiometers and <sup>15</sup>N labelled fertilizer. *Terra.* 14: 84-100.
- Klocke N. L.; Watts D. G.; Schneekloth J. P.; Davison D. R.; Todd R. W.; Parkhurst A. M. 1999. Nitrate leaching in irrigated corn and soybean in a semiarid climate. *Transactions of the ASAE.* 42: 1621-1630.
- Martínez R. J. G.; Castellanos R. J. Z.; Rivera G. M.; Núñez H. G.; Faz C. R. 2006. Contaminación por nitratos en acuíferos del norte de México y del Estado de Guanajuato. *AGROFAZ* 6: 379-387.
- Quiroga G. H. M.; Delgado J.; Cueto W. J. A.; Lindemann W. C. 2009. <sup>15</sup>N uptake from manure and fertilizer sources by three consecutive crops under controlled conditions. *Rev. Bras. Ci. Solo* 33: 1249-1258.
- Reta S. D. G.; Gaytán M. A.; Carrillo A. J. S.; Cueto W. J. A.; Salinas G. H. 2005. Rendimiento y calidad de forraje de genotipos de maíz para ensilaje en función de arreglos topológicos. *Phyton.* 2005: 103-114.
- Ritchie S. W.; Hanway J. J.; Benon G. O. 1993. How a maize plant develops. Sp. Rpt. N° 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Services. Ames, IA., EUA.
- Russelle M. P.; Hauck R. D.; Olson R. A. 1983. Nitrogen accumulation rates of irrigated corn. *Agron. J.* 75: 593-598.
- SAS Institute. 1989. SAS/STAT user's guide, version 5.0. 4th ed. SAS Inst., Cary, NC.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2000. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos Estudios, muestreos y análisis. México, D.F. 48 p.
- Schwab E. C.; Randy D. S.; Joseph G. L.; James G. C. 2003. Estimating silage energy value and milk yield to rank corn hybrids. *Anim. Feed Sci. Technol.* 109: 1-18.
- Wienhold B. J.; Troien T. P.; Reichman G. A. 1995. Yield and nitrogen use efficiency of irrigated corn in the Northern Great Plains. *Agron. J.* 87: 842-846.
- Zagal E.; Rodríguez N.; Vidal I.; Hofmann G. 2003. Eficiencia de uso y dinámica del nitrógeno en una rotación con y sin uso de residuos. *Agricultura Técnica* 63: 298-310.
- Zhou X.; Leibovitch S.; MacKenzie A. F.; Madramootoo C. A.; Dutilleul P.; Smith D. L. 1998. Confined microplot size for nitrogen-15 uptake by corn plants in a corn intercrop system. *Agron. J.* 90: 155-160.
- Zhang I.; Wu Z.; Jiang Y.; Chen L.; Song Y.; Wang L.; Xie J.; Ma X. 2010. Fate of applied urea-<sup>15</sup>N in a soil-maize system as affected by urease inhibitor and nitrification inhibitor. *Plant Soil Environ.* 56: 8-15.