

Efecto de la aplicación de zeolita en la recuperación de nitrógeno y el rendimiento de maíz

Effect of zeolite application on nitrogen recovery and maize yield

Nicolás Obregón-Portocarrero¹; Jaime Ernesto Díaz-Ortiz¹; Martha Constanza Daza-Torres^{1*} y Héctor Fabio Aristizabal-Rodríguez²

¹Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y el Medio Ambiente, área de Ingeniería Agrícola y Recursos Hídricos. Cali, Colombia. ²Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Cali, Colombia.

*Autora para correspondencia: martha.daza@correounivalle.edu.co

Rec.: 09.12. 2014 Acep.: 17.06.2015

Resumen

La baja eficiencia de la fertilización nitrogenada ocasiona altos costos de producción y es responsable en un alto porcentaje de la contaminación ambiental; para reducir estos impactos negativos existen estrategias como la aplicación de zeolitas (*clinoptilolita*) que reducen las pérdidas de nitrógeno (N) en sistemas productivos. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de zeolita en la recuperación de N y el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.), cuando se aplicó en dosis de 15, 25 y 35 kg/ha conjuntamente con 100 kg/ha de N utilizando urea en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. La zeolita incidió significativamente ($P < 0.05$) en el rendimiento del cultivo, la altura de planta y el diámetro del tallo. Los indicadores de eficiencia de uso del nutriente (N) mostraron incrementos por la aplicación de zeolita, mejorando el aprovechamiento y la efectividad económica de la aplicación de urea. El análisis de suelo al final del ciclo del cultivo mostró que la aplicación de zeolita favoreció la adsorción de fósforo, magnesio y potasio, mejoró la CIC y ocasionó cambios en el pH. Aunque la eficiencia de recuperación de N fue menor que 60%, se observaron diferencias importantes en la recuperación de este nutriente entre tratamientos y entre etapas fenológicas del cultivo, lo cual es relevante para el manejo nutricional eficiente.

Palabras clave: *Clinoptilolita*, eficiencia de uso, urea, isótopo ¹⁵N, zeolita.

Abstract

Low efficiency of nitrogen (N) fertilization cause high production costs and environmental pollutionso the development of strategies such as zeolites application may help to reduce N losses in production systems. The aim of this study was to evaluate the effect of natural causes zeolite (*clinoptilolite*) application in nitrogen recovery and corn yield (*Zea Mays* L.), by mineral addition (15, 25 and 35 kg/ha) in nitrogen doses (100 kg ha⁻¹) from urea; It was using a randomized complete block experimental design with four replicates. Zeolite contribution was significant ($P < 0.05$) in crop yield, plant height and stem diameter. Nitrogen use efficiency indicators reported increases by zeolite application, improving nutrient use and economic effectiveness of urea. Soil analysis at end of the crop cycle showed the application of zeolite favored the adsorption of phosphorus, magnesium and potassium, improved the CIC and impacted the soil pH value. Although Nitrogen recovery efficiency did not exceed 60%, it was observed difference in N recovery between treatments and between phenological stages of the crop, which is relevant for the efficient nutritional management.

Keywords: *Clinoptilolite*, use efficiency, urine, ¹⁵N isotope, zeolita.

Introducción

Actualmente el 50% de la población mundial depende de los fertilizantes para la producción de alimentos y alrededor de 60% de ellos corresponden a fertilizantes nitrogenados para la producción de arroz, trigo y maíz (Ladha *et al.*, 2005). La urea es la fuente de nitrógeno más utilizada en el sector agrícola y en todos los casos su eficiencia es baja (< 50%) debido a pérdidas por volatilización en forma de amoníaco (NH_3) y lixiviación como nitratos (NO_3^-), lo que ocasiona procesos de degradación de los recursos naturales como eutroficación de cuerpos de agua y acidificación del suelo (Divito *et al.*, 2011), inhibición de su biota (Jackson *et al.*, 2012), pérdida de la fertilidad (Firbank *et al.*, 2013) y emisión de gases efecto invernadero (Stuart *et al.*, 2014). Por esta razón la agricultura es considerada como una de las fuentes más importantes de contaminación por NO_3^- , especialmente de las reservas hídricas del subsuelo como resultado del uso excesivo de fertilizantes, tanto químicos como orgánicos, y prácticas de riego deficientes.

La ineficiencia en el uso de fertilizantes nitrogenados ha conducido a la adopción de diferentes prácticas de manejo que están relacionadas con la dosis adecuada, la fuente apropiada y los tiempos o épocas de aplicación del nutriente dentro del ciclo de crecimiento del cultivo, tendientes al aumento en el rendimiento y reducción en el costo de producción y la contaminación ambiental (Hinton *et al.*, 2015).

El retardo de la tasa de nitrificación es una de las estrategias potenciales para optimizar el uso de la urea e incrementar los rendimientos de cultivos de una manera amigable con el medio ambiente, asegurando de esta manera la permanencia de la forma amoniacal en el suelo y disminuyendo las pérdidas de NO_3^- por lixiviación, denitrificación y escorrentía. La zeolita por sus propiedades fisicoquímicas, es una herramienta aplicable a la gestión razonada del nutriente, debido a su estructura cristalina y porosa que tiene la habilidad de intercambiar iones sin modificar su estructura atómica (Ma *et al.*, 2015).

Las zeolitas son una familia de minerales aluminosilicatos que por su alta capacidad de intercambio catiónico (120 a $200 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) y afinidad por el NH_4^+ se ha utilizado con éxito en

la reducción del tránsito de NO_3^- hacia la zona saturada en suelos arenosos (Colombani *et al.*, 2015). El uso de estos minerales trae múltiples beneficios, entre ellos, aumentos entre el 5 y 44% en el rendimiento de cultivos de avena (Florez *et al.*, 2007), trigo, (Osuna *et al.* 2012) y maíz (González *et al.*, 2012; Rabai *et al.*, 2013), reducción del contenido de NO_3^- en el lixiviado en relación con el NH_4^+ del suelo y aumento en la capacidad de retención de nutrientes (Torma *et al.*, 2014; Colombani *et al.*, 2015).

Sin embargo, la determinación de las dosis adecuadas de estas enmiendas minerales en suelos de textura franca que reduzcan la dosis de fertilizante nitrogenado y aumenten la eficiencia de absorción por la planta aún no están totalmente estudiadas; por tanto, el propósito de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de diferentes dosis de zeolita (*clinoptilolita*) en la eficiencia de recuperación de N y su relación con el rendimiento del cultivo de maíz.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en la hacienda San Emigdio de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), ubicada en zona rural del municipio de Palmira, departamento del Valle del Cauca, a 1255 m.s.n.m. , $3^\circ 32' 58'' \text{ N}$ y $76^\circ 12' 25'' \text{ O}$. La precipitación y temperatura media anual son de 2100 mm y 23° C , respectivamente. El suelo correspondió a la clasificación taxonómica Humic Dystrustepts cuyas principales características fisico-químicas aparecen en la Tabla 1.

Se empleó un diseño experimental unifactorial de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos evaluados se incluyen en la Tabla 2 y las unidades experimentales fueron parcelas de campo de $5 \times 4 \text{ m}$ (20 m^2), en las que se sembró maíz (variedad ICA V - 305) con una densidad de $50,000$ plantas/ha a 0.80 m entre surcos y 0.25 m entre plantas. La separación entre unidades experimentales fue de 0.25 m y entre bloques de 1 m para evitar los efectos de borde.

La dosis de fertilización nitrogenada se fraccionó en dos épocas: 30 kg/ha 15 días después de la siembra (dds) y 70 kg/ha 35 dds. Las dosis de fósforo (P) y potasio (K) fueron aplicadas en su totalidad a los 20 días después de la siembra. La

Tabla 1. Características físico-químicas iniciales del suelo del sitio experimental.

pH	(cmol _c /kg)					CE (dS/m)	(%)			P			Textura (%)		
	Ca	Mg	Na	K	CIC		MO	N	(mg/kg)	A	L	Ar			
(1:1)	Ca	Mg	Na	K	CIC	(dS/m)	MO	N	(mg/kg)	A	L	Ar			
6.29	18.10	3.27	0.02	1.53	21.0	0.47	1.33	0.18	51.40	56.20	21.30	22.60			

Tabla 2. Descripción de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Dosis (kg/ha)			
	Zeolita	Nitrógeno	P ₂ O ₅	K ₂ O
T1	0	0	0	0
T2	15	0	0	0
T3	0	100	25	33
T4	15	100	25	33
T5	25	100	25	33
T6	35	100	25	33

aplicación de urea marcada con ¹⁵N se hizo para cada dosis de N (30 y 70 kg/ha) en una subparcela de 12 plantas (4 plantas adyacentes en los tres surcos centrales) de cada unidad experimental, correspondientes a los tratamientos T3, T4, T5 y T6; para los muestreos se tomaron dos plantas centrales. Las aplicaciones de urea comercial y urea marcada se realizaron en diluciones de 10 ml por planta, de acuerdo a los requerimientos de N en cada época del cultivo.

La preparación del suelo consistió en un pase de arado a 30 cm de profundidad. La siembra de maíz se realizó de forma manual colocando 3 semillas por sitio de acuerdo con las distancias de siembra especificadas. Después de la germinación, en cada sitio se seleccionó la planta más vigorosa y se eliminaron las demás. Las láminas de riego fueron determinadas de acuerdo con el coeficiente del cultivo en cada una de las etapas fenológicas (0.4, 0.8, 1.15 y 0.7 para 0 - 30, 30 - 70, 70 - 120 y 120 - 150 días, respectivamente) y las condiciones climatológicas registradas en serie máxima de 48 años.

La evapotranspiración de referencia y precipitación efectiva fueron determinadas por medio del programa CROPWAT 8.0 de libre distribución. Los volúmenes de agua aplicados variaron entre 1.74 y 23.79 m³/semana para toda el área de experimentación, aplicados mediante riego por aspersión.

Las variables de respuesta medidas en el cultivo fueron: rendimiento fresco y seco de grano y biomasa, altura de la planta y diámetro de tallo medidos en la cosecha, y eficiencia de recuperación del N (ERN) determinada como la relación entre el N aplicado y N recuperado por la planta, mediante la metodología estándar propuesta para muestras enriquecidas con exceso de ¹⁵N (Zapata, 1990). La ERN fue medida para ambas épocas de aplicación (15 y 35 dds).

El rendimiento del cultivo se determinó en 30 plantas por unidad experimental, las cuales fueron pesadas diferenciando el grano del resto de la planta (biomasa). Se tomaron como indicadores de eficiencia de uso de nutrientes, el índice de eficiencia de nutrientes (IEN) y la eficiencia agro-

nómica (EA), calculados a partir de las ecuaciones 1 y 2 siguientes:

$$IEN (kg/kg) = \frac{\text{Rendimiento del cultivo (kg)}}{\text{kg del elemento en el tejido}} \quad (\text{Ec1})$$

$$EA (kg/kg) = \frac{\text{Rendimiento } F - \text{Rendimiento } C}{\text{Cantidad de nutriente aplicado}} \quad (\text{Ec2})$$

donde, *F* son las plantas que recibieron fertilizante (N) y *C* son aquellas que no recibieron fertilizante (N).

Al comienzo del ensayo y al momento de la cosecha se tomaron muestras de suelo hasta 25 cm de profundidad para análisis en laboratorio donde se consideraron variables edáficas como pH (método potenciométrico 1:1) nitrógeno total (método Kjeldahl, extracción con KCl 1 N), nitrógeno ¹⁵N (espectrofotometría de masas), materia orgánica (Walkley-Black), fósforo disponible (Bray II), bases intercambiables (espectrofotometría de absorción atómica) y capacidad de intercambio catiónico (extracción con acetato de amonio a pH = 7).

Para el análisis de los datos se verificó la distribución normal por medio del test de Shapiro-Will y la homogeneidad de varianzas por la prueba de Levene. Se realizó análisis de varianza para identificar diferencias estadísticas entre tratamientos. Para aquellas variables que presentaron diferencias se realizó la prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) con un coeficiente de confianza de 95%. Se utilizaron los programas estadísticos SSPS 2.2 y Excel ©.

Resultados y discusión

Rendimiento del cultivo

Los rendimientos de grano fresco variaron entre 4.21 (T1) y 7.56 Mg/ha (T6), mientras que en grano seco (12% de humedad) los rendimientos fueron de 3.72 y 6.65 Mg/ha, respectivamente (Tabla 3). No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos con zeolita y fertilizante (T4, T5 y T6) y el tratamiento con solo fertilizante (T3). No obstante, con la mayor dosis de zeolita (T6) se obtuvieron incrementos de 1.53 en grano fresco y de 1.34 Mg/ha en grano seco, en comparación con el tratamiento solo zeolita (T2), lo que indica la necesidad del aporte de N para incrementar las cosechas. Moreno *et al.* (2008) encontraron incrementos promedio de 80% en el rendimiento de grano fresco de la variedad de maíz ICA V - 305, cuando recibió una dosis similar en tres localidades de la zona central cafetera colombiana.

Es necesario indicar que la aplicación de zeolita contribuye a mejorar la eficiencia en el uso del N en el suelo, como lo demuestra el hecho que con el tratamiento solo zeolita (T2) se obtuvieron incrementos de 43.5% (1.83 Mg/ha) y 42.7% (1.59 Mg/ha) en el rendimiento de granos fresco y seco, respectivamente, con respecto al testigo absoluto (T1). Además, la aplicación de 100 kg/ha de N (T3) más el aporte de 15 kg/ha de zeolita (T4) favoreció incrementos de 2.4% (173 kg/ha) en el rendimiento de grano fresco, mientras que con el aporte de 35 kg/ha de zeolita (T6) este incremento fue de 3.4% (251 kg/ha), lo que muestra el efecto de la zeolita en la producción.

Las mayores producciones tanto de biomasa fresca como seca se obtuvieron con la menor dosis de zeolita acompañada del fertilizante nitrogenado; éstas fueron, respectivamente, de 2.86 y 1.95 Mg/ha, mientras que en el tratamiento con solo zeolita (T2) fueron de 3.49 y 2.34 Mg/ha con respecto al testigo (T1) y de 0.53 y 0.46 Mg/ha con respecto al tratamiento con la mayor dosis de zeolita y fertilizante nitrogenado (T6) (Tabla 3).

La aplicación de zeolita presentó beneficios en la producción de granos frente a la producción de biomasa del cultivo lo cual, en el caso particular de N, puede ser atribuido a la disponibilidad de formas minerales ($N-NH_4^+$ / $N-NO_3^-$) y al efecto regulador de la zeolita en los procesos de transformación del nutriente, en relación con la afinidad en la absorción de una u otra forma por la planta (Acón *et al.*, 2013). Igualmente por su aporte equivalente a la biomasa en función de su facilidad para ser metabolizada para la producción del radical amino ($R-NH_2$) y la incorporación de N a la materia viva a través de glutamato (Osorio, 2014).

Los rendimientos de grano obtenidos superaron los encontrados por González *et al.* (2012) con la aplicación de una mayor dosis de zeolita (52.5 kg/ha) y una menor dosis de N (90 kg/ha), lo cual demuestra que el suministro del elemento es esencial para obtener mejores rendimientos.

La altura de planta al momento de la cosecha varió entre 216 cm (T1) y 278 cm (T4) y no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos T3, T4, T5 y T6 (Tabla 3). El mayor tamaño de planta se observó con el tratamiento que recibió la menor dosis de zeolita y fertilizante nitrogenado (T4) y presentó diferencias ($P < 0.05$) frente a los tratamientos testigo (T1) y zeolita sola (T2). Además, en todos los tratamientos, con excepción del testigo absoluto y el testigo-zeolita (T2), se observaron diámetros de tallos superiores a 6.5 cm, aunque sin diferencias significativas entre ellos, lo que indica que a pesar de la presencia de la enmienda, la aplicación de N a los cultivos es necesaria para garantizar su adecuado crecimiento. En este sentido, Molina *et al.* (2002)

afirman que el diámetro de la planta está directamente relacionado con el número de brotes y yemas, lo que incide en la generación de biomasa fresca efectiva para la fotosíntesis.

Tabla 3. Análisis de comparación de medias de rendimiento y variables agronómicas del cultivo de maíz con aplicación de zeolita natural.

Tratamiento	Rendimiento fresco (Mg/ha)		Rendimiento seco (Mg/ha)		Plantas (cm)	
	Grano	Biomasa	Grano	Biomasa	Altura	Diámetro
T1	4.21c	3.80b	3.72c	2.48b	216b	5.4b
T2	6.03b*	4.43b	5.31b	2.87b	219b	5.8ab
T3	7.31ab	7.25a	6.43ab	4.73a	270ab	6.6a
T4	7.48a	7.29a	6.62a	4.82a	278a	7.0a
T5	7.01ab	6.67a	6.14ab	4.22a	267ab	6.9a
T6	7.56a	6.76a	6.65a	4.36a	250ab	7.1a
DMS _(P<0,05)	1.41	1.37	1.25	0.85	51.8	0.89
C.V. (%)	14.20	15.10	14.30	14.40	13.80	9.20
D.E.	0.94	0.91	0.83	0.56	34.38	0.59

* Valores seguidos de letras iguales no difieren en forma significativa ($P > 0.05$), según la prueba DMS. T1 = testigo; T2 = 15 kg/ha de zeolita; T3= 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T4= Combinación de 15 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T5= Combinación de 25 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T6= Combinación de 35 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado.

Recuperación de nitrógeno

Los tratamientos con diferentes dosis de zeolita acompañados de fertilizante nitrogenado (T4, T5 y T6) mostraron una recuperación de N mayor que el tratamiento con solo fertilización nitrogenada (T3), aunque las diferencias no fueron significativas ($P > 0.05$) (Figura 1). La aplicación de zeolita puede contribuir a mejorar la eficiencia de utilización de los fertilizantes nitrogenados, si se tiene en cuenta que los cultivos recuperan menos de 50% del N aplicado (Hirel *et al.*, 2011), mientras que el resto pasa a otros ecosistemas por lixiviación, erosión, volatilización y desnitrificación, generando grandes impactos ambientales y aumentando los costos de producción.

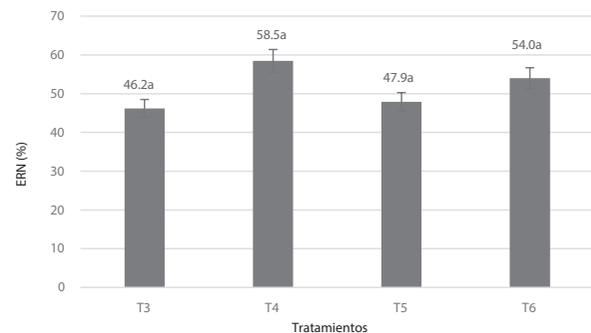


Figura 1. Efecto de la aplicación de zeolita en la Eficiencia de Recuperación de Nitrógeno (ERN).

T3= 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T4= Combinación de 15 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T5= Combinación de 25 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T6= Combinación de 35 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado.

Al relacionar la ERN con los rendimientos obtenidos se encontró que los tratamientos con zeolita obtuvieron rendimientos de grano y biomasa similares a los obtenidos con el fertilizante nitrogenado. Los tratamientos que obtuvieron mayor rendimiento mostraron, a su vez, una mayor ERN indicando que entre mejor sea utilizado el N, mejores características agronómicas se pueden conseguir.

Los incrementos obtenidos en la ERN y su consecuente aumento en el rendimiento de grano pueden ser asociadas con la incidencia de la zeolita en la dinámica de disponibilidad de N y su forma ($N-NH_4^+$ o $N-NO_3^-$), que pudieron ser afectadas no solo desde la adsorción reversible del NH_4^+ hacia la superficie de intercambio (Torma *et al.*, 2014), lográndose así un retardo en la oxidación hacia la forma $N-NO_3^-$, sino que también pudo mejorarse desde la permanencia del $N-NO_3^-$ en el suelo mediante la dilatación del radio iónico y su consecuente aumento de cationes (como Ca^{2+} , Mg^{2+} o K^+) desde la micela coloidal cargada negativamente hasta la solución libre del suelo, los cuales pudieran estar compartiendo enlaces libres con el NO_3^- , perdiendo éste su libre movilidad.

En todos los casos, la aplicación de zeolita natural favoreció la recuperación de N, y se resalta el potencial de aprovechamiento del nutriente en función del estado fenológico de la planta. Se observó que en el estadio vegetativo V4 (15 dds) la planta fue menos eficiente que en el estadio vegetativo V10 (35 dds), en términos de recuperación de N (Figura 2) debido al estado de desarrollo radicular. Lo anterior significa que la aplicación de fertilizantes nitrogenados en etapas tempranas favorece las pérdidas por nitrógeno, contribuyendo a la contaminación de otros ecosistemas.

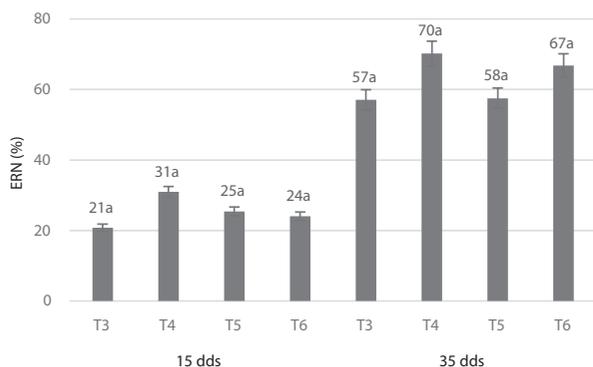


Figura 2. Efecto de la aplicación de zeolitas en la Eficiencia de Recuperación de Nitrógeno (ERN) medida a los 15 y 35 días después de la siembra.

T3= 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T4= Combinación de 15 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T5= Combinación de 25 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T6= Combinación de 35 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado.

Generalmente la mayor absorción de N coincide con los periodos de rápido crecimiento de los cultivos. El uso de enmiendas como la zeolita permite mayor retención del N y su efectividad en etapas tempranas del cultivo, pudiendo aumentar la eficiencia de absorción por parte de las plantas al suministrar de manera gradual el N y evitar su lixiviación.

La eficiencia agronómica (EA) fue similar para todos los tratamientos con valores óptimos superiores a 25 kg/kg (Stewart, 2007) lo que muestra que la mezcla urea-zeolita aumentó los rendimientos del maíz (Tabla 4). La falta de significancia entre dosis de zeolita, indica que con la menor dosis se alcanzó una EA similar a la encontrada en el testigo sin zeolita, pero con mejores resultados en las propiedades agronómicas de las plantas.

Tabla 4. Análisis individual de comparación de medias asociadas al aprovechamiento de N.

Tratamiento	N ext. (kg ha ⁻¹)*	ERN (%)	EA (kg kg ⁻¹)	IEN (kg kg ⁻¹)
T3	156a	46a	27a	42a
T4	144a	58a	29a	48a
T5	141a	48a	25a	44a
T6	146a	54a	29a	45a
DMS _(P<0.05)	31.6	17.45	11.42	8.83
C.V. (%)	13.5	21.1	23.2	12.3
D.E.	19.76	10.91	7.14	5.52

*Nitrógeno total extraído en una hectárea de cultivo. Valores seguidos de letras iguales no difieren en forma significativa ($P > 0.05$), según la prueba DMS.

T3= 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T4= Combinación de 15 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T5= Combinación de 25 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T6= Combinación de 35 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado.

Para el índice de eficiencia de N (IEN), los valores obtenidos se encontraron por debajo de los rangos óptimos para cereales (55 - 65 kg/kg) (Stewart, 2007), situación que pudo deberse a desbalance de nutrientes. Sin embargo, los tratamientos con aporte de zeolita mostraron valores mayores de IEN que el tratamiento con solo fertilizante nitrogenado (T3).

Efectos de la zeolita en el nitrógeno en el suelo

La aplicación de zeolita en diferentes dosis promovió la retención de nitrógeno en la capa aprovechable del suelo, donde se encontraron las mayores concentraciones del nutriente con relación al tratamiento con solo fertilizante nitrogenado (T3), tanto para el nitrógeno total como para la fracción fertilizante, aunque no se

encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) (Figura 3). Es importante resaltar la alta variabilidad de los datos encontrados, que pudieron estar relacionados con la heterogeneidad de las propiedades del suelo en el sitio donde se llevó a cabo el experimento.

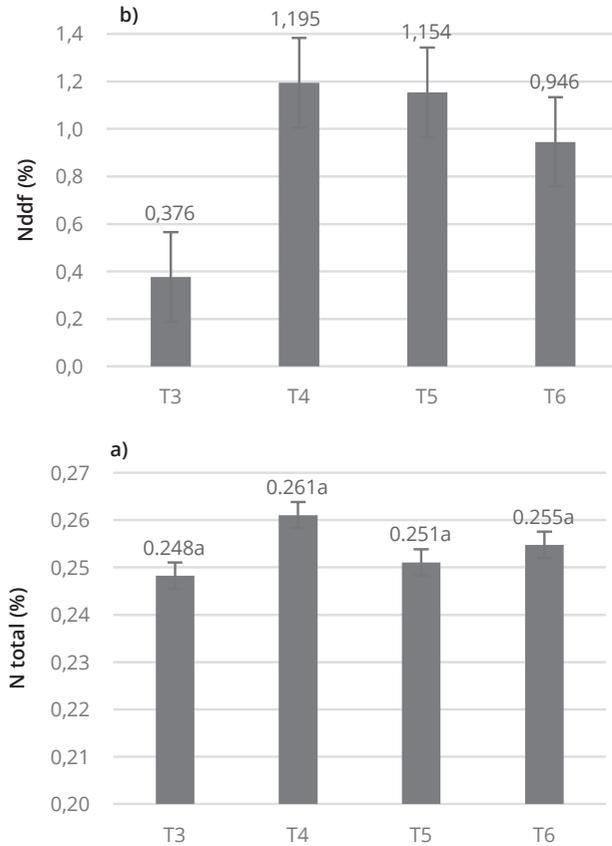


Figura 3. Efecto de la zeolita en la concentración de N en el suelo y nitrógeno ^{15}N proveniente del fertilizante (Nddf) en el suelo. T3= 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T4= Combinación de 15 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T5= Combinación de 25 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T6= Combinación de 35 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado.

Condiciones químicas del suelo al finalizar el cultivo

Se observaron cambios en el pH y la materia orgánica del suelo (MO), lo cual puede estar asociado con la aplicación de fertilizantes que pudieran potenciar la actividad microbiana e impactar directamente en el contenido de MO como es el caso del N, para el cual el aporte de zeolita pudo haber afectado los procesos de transformación desde la MO, por lo que los valores de pH más bajos se reportaron en los tratamientos con aplicaciones del mineral (Tabla 5). Nuevamente, la variación en los valores obtenidos refleja la variabilidad del suelo donde se desarrolló el experimento.

La concentración del fósforo disponible (P) aumentó para la mayoría de los tratamientos, lo que obedece a la fertilización previa realizada. La poca movilidad de los iones fosfatos y las bajas cantidades que son absorbidas por las plantas permiten la permanencia del nutriente en los primeros centímetros del suelo.

Los niveles de calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y sodio (Na^+) intercambiables aumentaron con respecto a las condiciones iniciales, pero no puede afirmarse que tal efecto se debió al aporte de zeolita (Tabla 5). Es necesario implementar ensayos de campo que tomen en cuenta variables como la calidad del agua de riego para poder concluir con certeza. De cualquier forma, los niveles de Na^+ encontrados son bajos en comparación con los otros cationes, por lo que no representan riesgos potenciales para la dispersión de la estructura del suelo.

El potasio (K), en términos generales, permaneció constante y posiblemente el K suministrado por el fertilizante fue absorbido por la planta con alta eficiencia. En este sentido, es importante resaltar que en los tratamientos con zeolita se obtuvieron los valores más bajos de K disponible en el suelo.

Tabla 5. Caracterización química del suelo al final del ciclo productivo del maíz.

Tratamiento	pH (1:1)	MO (%)	P (mg/kg)	K	Ca	Mg (Cmol(+)/kg)	Na	CIC
T2	6.14	4.87	69.90	0.79	23.10	7.42	0.86	39.50
T3	6.24	6.39	77.10	1.18	25.40	5.73	0.97	33.90
T4	6.16	6.33	69.00	0.70	26.00	35.80	1.03	40.60
T5	6.13	6.05	63.70	1.12	21.70	8.02	1.01	39.80
T6	6.18	2.31	29.80	0.66	15.80	15.90	1.06	40.50
	6.58*	0.18*	51.40*	1.53*	18.10*	3.27*	0.02*	21.0*

* Los datos corresponden a las condiciones iniciales del suelo. En todos los casos la muestra se compuso de submuestras tomadas en las cuatro parcelas con igual tratamiento. T1 = testigo; T2 = 15 kg/ha de zeolita; T3= 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T4= Combinación de 15 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T5= Combinación de 25 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado; T6= Combinación de 35 kg/ha de zeolita y 100 kg/ha de fertilizante nitrogenado.

Con relación a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) los resultados muestran que no se presentaron diferencias entre los tratamientos; sin embargo, es posible que con aplicaciones de dosis mayores de zeolita ocurra un aumento significativo en la CIC del suelo.

Conclusiones

La aplicación de zeolita natural (*clinoptilolita*) incrementó el rendimiento de granos de maíz hasta en 43.5% en plantas no fertilizadas y hasta en 3.4% en plantas fertilizadas con respecto al testigo, mostrando su capacidad de retención del N en el suelo.

La recuperación de N proveniente del fertilizante por parte del cultivo se favoreció con el aporte de zeolita en dosis de 15 kg/ha, dosis en la cual se extrajeron 13 kg más de nitrógeno fertilizante por hectárea, mostrando mejor desempeño que las dosis más altas evaluadas. Además, las plantas con aplicaciones de zeolita fueron más eficientes en el uso del nutriente, como lo muestran los mayores rendimientos con una extracción menor.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y a la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente de la Universidad del Valle por su apoyo en la realización del presente trabajo.

Referencias

Acón, J., Umaña, C., y Wing Chin, R. (2013). Recuperación del ^{15}N en plantas de banano y en el suelo de áreas con origen sedimentario. *Agron. Mesoam.* 24 (1), 71 – 81.

Colombani, N., Mastrocicco, M., Di Giuseppe, D., Facini, B., y Coltorti, M. (2015). Batch and column experiments on nutrient leaching in soil amended with Italian natural zeolites. *Catena* 127 (1), 64 – 71.

Divito, G., Sainz, H., Echeverría, H., Studdert, G., y Wyngaard, N. (2011). Long term nitrogen fertilization: Soil property changes in an Argentinean Pampas soil under no tillage. *Soil Till. Res.* 114 (2), 117 – 126.

Firbank, L., Bradbury, R. B., McCracken, D. I., y Stoate, C. (2013). Delivering multiple ecosystem services from Enclosed Farmland in the UK. *Agric. Ecosys. Environ.* 166 (1), 65 – 75.

Florez, A., Galvis, A., Hernández, T., De León, F., y Payán, F. (2007). Efecto de la adición de zeolita clinoptilolita y mordenita en un andosol sobre el ambiente químico edáfico y el rendimiento de avena. *Interciencia* 32 (10), 692 – 696.

González, M., Gómez, N., Muñoz, J., Valencia, F., Gutiérrez, D., y Figueroa, H. (2012). Rendimiento del maíz de riego tratado con zeolita más fertilizantes en el estado de Guerrero. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 36, 1129 – 1144.

Hinton, N. J., Cloy, J. M., Bell, M. J., Chadwick, D. R., Topp, C. F., y Rees, R. M. (2015). Managing fertilizer nitrogen to reduce nitrous oxide emissions and emission intensities from a cultivate Cambisol in Scotland. *Geoderma* 4 (1), 55 – 65.

Hirel, B., Tétu, T., Lea, P., y Dubois, F. (2011). Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. *Sustainability* 3 (9):1452 – 1485.

Jackson, L., Bowles, T., Hodson, A., y Lazcano, C. (2012). Soil microbial-root and microbial-rizosphere processes to increase nitrogen availability and retention in agroecosystems. *Environ. Sustain.* 4 (5), 517 – 522.

Ladha, J. K., Pathack, H., Krupnik, T. J., Six, J., y VanKessel, C. (2005). Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Adv. Agron.* 87 (1), 85 – 156.

Ma, X., Wang, H., Wang, H., O'Brien-Abraham, J., y Lin, Y. S. (2015). Pore structure characterization of supported polycrystalline zeolite membranes by positron annihilation spectroscopy. *J. Memb. Sci.* 477 (1), 41– 48.

Molina, E., Alvarado, A., Smyth, T., Boniche, J., Alpiñar, D., y Osmond, D. (2002). Respuesta del pejíbabe para palmito *Bactrisga sipaes* al nitrógeno en Andisoles de Costa Rica. *Agron. Costarric.* 26 (2), 31 – 42.

Moreno, A., Narro, L., Vanegas, H., Molina, C., Ospina, J., y Agudelo, M. (2008). Respuesta del maíz a la fertilización química en la zona central cafetera. *Rev. Cenicafé* 59 (1): 75–80.

Osorio, N. W. (2014). *Manejo de nutrientes en suelos del Trópico*. Segunda edición. Medellín, Colombia: Vieco S.A.S. 177 – 206p.

Osuna, E. S.; Ramírez, A.; Paredes, R.; Padilla, J. S.; y Báez, A. D. (2012). Eficiencia de la zeolita como aditivo de la urea e inoculación micorrizica en el cultivo de trigo. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3 (6), 1101 – 1113.

Rabai, K. A., Ahmed, O. H., y Kasim, S. (2013). Use of formulated nitrogen, phosphorus and potassium compound fertilizer using clinoptilolite zeolite in maize *Zea mays* L. cultivation. *Emir. J. Food Agric.* 25(9), 713 – 722.

Stewart, W. M. (2007). Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. *Inform. Agron.* 67, 1–7.

Stuart, D., Schewe, R., y McDesmott, M. (2014). Reducing nitrogen fertilizer application as a climate change mitigation strategy: understanding farmer decision-making and potential barriers to change in the US. *Land Use Policy* 36(1), 210 – 218.

Torma, S., Vilcek, J., Adamisin, P., Huttmanova, E., y Hronec, O. (2014). Influence of natural zeolite on nitrogen dynamics in soil. *Turk. J. Agric. Forest.* 38(1), 739 – 744.

Zapata, F. (1990). Técnicas isotópicas en estudios sobre la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas. Viena, Austria: FAO-IAEA. p. 79 – 171.