

EVALUACIÓN DE FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS Y DOSIS DE ZEOLITA PARA LA AGRICULTURA

EVALUATION OF PARTICLE SIZE FRACTIONS AND DOSES OF ZEOLITE FOR AGRICULTURE

Miguel Soca¹, M. Constanza Daza-Torres^{2*}

¹Dirección de Suelos-Ministerio de Agricultura - MINAG, Edificio Minag, Conil esquina Carlos M. Céspedes, Nuevo Vedado, Plaza de la Revolución. La Habana. Cuba. (programas@minag.cu). ²Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Universidad del Valle. Calle 13 N° 100-00 Cali Colombia. (martha.daza@correounivalle.edu.co).

RESUMEN

La aplicación de zeolita natural en la agricultura ha crecido desde hace 20 años, y es necesario realizar seguimiento a los suelos donde se aplica para conocer sus efectos residuales. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de cinco tamaños de partícula y dosis de zeolita en propiedades químicas de los suelos, volatilización de N y contenido foliar de nutrientes. Entre 2010 al 2012 se condujeron cuatro experimentos en macetas de 1.6 kg con un diseño completamente aleatorizado, cinco tamaños de partícula (< 0.25, 0.25-0.50, 0.50-1.00, 1.00-2.00 y 2.00-3.00 mm), dosis de zeolita (0.00, 1.88, 4.74, 6.88 y 9.38 g kg⁻¹ de suelo) y cuatro repeticiones. Como planta indicadora se usó Rhodes (*Chlorys gallane* c.v Pioneer). Los suelos evaluados fueron representativos de Cuba, alítico (Ultisol), pardos grisáceo y con carbonatos (Inceptisoles) y húmico sialítico (Molisol). Los tamaños de partícula de 1.00 a 3.00 mm mejoraron las condiciones químicas de los suelos y redujeron hasta 57 % la volatilización de N. Las partículas menores a 1 mm aumentaron la retención de Na⁺ y K⁺, que puede favorecer la dispersión del suelo. Las dosis mayores de zeolita en los suelos pardo grisáceo, pardo con carbonatos y húmico sialítico aumentaron el contenido de bases intercambiables en el suelo, el rendimiento de masa seca y la concentración de nutrientes foliares. En contraste, en el suelo alítico no se hubo diferencias significativas en estas variables agronómicas.

Palabras Claves: Grupo de la zeolita, grama Rhodes, remediación de suelos, amonio.

ABSTRACT

The use of natural zeolite in agriculture has grown in the past 20 years, and it is necessary to follow up on the soils on which it is applied to know its residual effects. The aim of this study was to evaluate the effect of five zeolite particle and dose sizes in the chemical properties of soils, N volatilization and foliar nutrient contents. Between the years 2010 to 2012, four experiments were carried out in 1.6 kg pots with a completely randomized design, five particle sizes (< 0.25, 0.25-0.50, 0.50-1.00, 1.00-2.00, and 2.00-3.00 mm), and zeolite doses (0.00, 1.88, 4.74, 6.88 and 9.38 g kg⁻¹ of soil) and four replications. As an indicator plant, we used Rhodes grass (*Chlorys gallane* c.v Pioneer). The soils evaluated were representative of Cuba, allitic (Ultisol), pardo grisáceo and with carbonates (Inceptisoles), and humic siallitic (Molisol). The particle sizes of 1.00 to 3.00 mm improved the chemical conditions of the soils, and reduced N volatilization up to 57 %. Particles below 1 mm increased Na⁺ and K⁺ retention, which could improve soil dispersal. The greatest doses of zeolite in the pardo grisáceo, pardo con carbonatos y humic siallitic soils increased the content of exchangeable bases in the soil, the dry mass yield, and the concentration of foliar nutrients. In contrast, no significant differences were found in the allitic soil for these agronomical variables.

Key words: Zeolite group, Rhodes grass, soil remediation, ammonium.

INTRODUCTION

In Cuba, brown (Inceptisols) and humic siliceous soils (Mollisols) (USDA, 2014) cover a surface of 2 526 000 million km². They are the most extensive and important for the country's economy, and are used for different crops. Some of the limitations for their use are their presence in eroded

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: julio, 2015. Aprobado: mayo, 2016.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 50: 965-976. 2016.

INTRODUCCIÓN

En Cuba los suelos pardos (Inceptisoles) y húmicos sialíticos (Molisoles) (USDA, 2014) ocupan una superficie de 2 526 000 millones de km², son los más extensos e importantes para la economía del país y se utilizan en diferentes cultivos. Entre las limitaciones para su uso están su presencia en zonas erosionadas y profundidad efectiva. Diferentes prácticas se realizan para incrementar la producción en estos suelos, como aplicar zeolitas, que mejoran las propiedades de los suelos y contribuyen a la sostenibilidad de los sistemas agropecuarios (Jordan *et al.*, 2013).

La aplicación de zeolitas en diferentes tipos de suelos mejora sus propiedades químicas, especialmente las relacionadas con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en la zona de las raíces y disminuye las aplicaciones de fertilizantes, lo que reduce las pérdidas por volatilización y lixiviación (Zahedi *et al.*, 2012; Gholamhoseini *et al.*, 2013). Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos y porosos, lo que permite el intercambio iónico sin cambiar su estructura cristalina (López *et al.*, 2010). Según Jha *et al.* (2009), las zeolitas son apropiadas para retener iones como amonio (NH₄⁺) y retrasar el proceso de nitrificación, esto reduce la lixiviación de amonios y nitratos hacia aguas subterráneas, debido a su CIC alta de 120 a 200 cmol(+) kg⁻¹. Zwingmann *et al.* (2009) señalan que las zeolitas tratadas pueden aumentar hasta 11 veces la capacidad de retención de amonio, por lo que se clasifican como fertilizantes de liberación lenta. Su aplicación también mejora la capacidad de retención de humedad de la capa arable, facilita el movimiento del agua en el perfil y reduce la densidad del suelo, lo que propicia aumento de producción en las cosechas, y reduce el impacto ambiental (Colombani *et al.*, 2014).

La zeolita no actúa como fertilizante, pero permite recuperar la eficiencia de los fertilizantes y disponibilidad controlada de los cationes que las plantas utilizan (Costafreda, 2014). Colombani *et al.* (2015) reportan el potencial de uso de las zeolitas con estiércol de cerdo como abonos de liberación lenta que minimizan la lixiviación de nutrientes. Igual que otras enmiendas, como las cales agrícolas, la eficiencia de desempeño puede estar determinada por el tamaño de su partícula y por la dosis empleada.

areas and low effective depth. Different practices are being carried out to increase production in these soils, such as applying zeolites, which improve soil properties and contribute to the sustainability of farming systems (Jordan *et al.*, 2013).

The application of zeolites in different types of soils improves their chemical properties, particularly those related to the cationic exchange capacity (CEC) in the area of the roots, and reduces fertilizer use, thus reducing losses by volatilization and lixiviation (Zahedi *et al.*, 2012; Gholamhoseini *et al.*, 2013). Zeolites are crystalline and porous aluminosilicates, which helps them carry out ionic exchanges without changing their crystalline structure (López *et al.*, 2010). Jha *et al.* (2009) report that zeolites are appropriate for retaining ions such as ammonium (NH₄⁺), and to delay the nitrification process, thus reducing the lixiviation of ammonia and nitrates towards underground waters due to its high CEC, which is between 120 and 200 cmol(+) kg⁻¹. Zwingmann *et al.* (2009) point out that zeolites can increase ammonium retention up to 11 times, therefore they are classified as slow release fertilizers. Their use also improves the moisture retention capacity of the arable layer, improves the flow of water in the profile and reduces soil density, which leads to a rise in crop production and reduces the environmental impact (Colombani *et al.*, 2014).

Zeolite does not act as a fertilizer, but rather helps recover the efficiency of fertilizers and controlled availability of cations that plants use (Costafreda, 2014). Colombani *et al.* (2015) report the potential of the use of zeolites with pig manure as slow release fertilizers that minimize nutrient lixiviation. As in the case of other amendments, such as agricultural limes, performance efficiency can be determined by its particle size and the dose used.

The use of zeolite in Cuba goes back to the late 1980's in sugarcane plantations, when Gil *et al.* (1988) and Rodríguez *et al.* (1988) showed its potential use to improve synthetic chemical fertilizers. In this way, the use of zeolites has expanded to several crops. Febles *et al.* (2015) point out that zeolite increased potato yield by 21.2 %, as well as tomato by 38 %, cucumber by 23.0 %, and other vegetables by 23.0 % to 35.0 %, when mixed 25.0 % is mixed with fertilizers with complete formulae. Soca *et al.* (2004) show that zeolite applied on Cuban

El uso de la zeolita en Cuba se remonta a finales de la década de 1980 en cultivos de caña de azúcar cuando Gil *et al.* (1988) y Rodríguez *et al.* (1988), reportan su uso potencial para mejorar la eficiencia de los fertilizantes de síntesis química. Así, el empleo de zeolitas se ha ampliado a varios cultivos. Febles *et al.* (2015) señalan la zeolita aumentó el rendimiento de papa en 21.2 %, tomate en 38 %, pepino en 23.0 % y otras hortalizas entre 23.0 y 35.0 %, cuando se mezcla 25.0 % con fertilizantes de fórmula completa. Soca *et al.* (2004) muestran que la zeolita aplicada a suelos cubanos aumenta 44 % la eficiencia de los fertilizantes y eleva la disponibilidad de nutrientes. Soca y Villareal (2015) utilizaron mezclas de zeolita y roca fosfórica en Oxisoles e Inceptisoles, y el rendimiento de papa aumentó 38 % y el de sorgo 55 %. Chaveli *et al.* (2012) utilizaron zeolita como complemento al abonado orgánico en hortalizas y aumentaron el rendimiento y la reserva de nutrientes y materia orgánica del suelo.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de fracciones granulométricas y dosis de zeolita en suelos, en pérdidas de N por volatilización y en sus propiedades químicas, mediante el cultivo de la planta indicadora grama Rhodes (*Chlorys gallane* c.v. Pioneer).

MATERIALES Y MÉTODOS

Del 2010 al 2012 se realizaron cuatro experimentos, en invernaderos de cristal, en el Instituto de Suelos de La Habana, Cuba. Diseños completamente aleatorizados se utilizaron, con cuatro repeticiones, en los que se evaluaron granulometrías y dosis de zeolita natural en suelos diferentes. Grama Rhodes en maceta con capacidad de 1.6 kg fue la unidad experimental. En las plantas se realizaron cortes cada 15 d.

La zeolita provino del yacimiento de Tasajera, en Villa Clara. La caracterización con difracción de rayos X y análisis químicos y mineralógicos se realizó en colaboración con el Centro de Investigaciones y Proyectos para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIMM). La composición de la zeolita fue 85 % de Clinoptilolita más Heulandita, 5 a 10 % de Modernita y 5 a 10 % de cuarzo, feldspatos y micas (Cuadro 1).

Evaluación del efecto de la granulometría de la zeolita en las propiedades del suelo y en la volatilización del nitrógeno

Seis fracciones de zeolita se evaluaron con tamaños de partícula: < 0.25 mm, 0.25 a 0.50 mm, 0.50 a 1.00 mm, 1.00 a 2.00 mm,

soils increases fertilizer efficiency by 44 % and also increases nutrient availability. Soca and Villareal (2015) used mixtures of zeolite and phosphoric rock on Oxisols and Inceptisols, increasing potato yield by 38 % and sorghum yield by 55 %. Chaveli *et al.* (2012) used zeolite as a complement to organic fertilizer in orchards, managing to increase yield and nutrient reserves, as well as organic matter in the soil.

The aim of this study was to evaluate the effect of particle size fractions and doses of zeolite in soils, in N losses by volatilization, and in their chemical properties, by planting the indicator plant, Rhodes grass (*Chlorys gallane* c.v. Pioneer).

MATERIALS AND METHODS

In the years of 2010 to 2012, four experiments were carried out in crystal greenhouses in the Soil Institute of Havana, Cuba. Totally random designs were used with four repetitions, in which particle size and natural zeolite doses were evaluated in different soils. Rhodes grass in a pot with a capacity of 1.6 kg represented the experimental unit. Plants were trimmed every 15 d.

The zeolite came from the Tasajera deposit, in Villa Clara. The characterization with X ray diffraction and chemical and mineral analyses were carried out in collaboration with the Research and Project Center for the Metal and Mining Industry (CIPIMM). Zeolite composition was 85 % de Clinoptilolite plus Heulandite, 5 a 10 % Modernite, and 5 to 10 % quartz, feldspars and micas (Table 1).

Evaluation of the effect of zeolite particle size in the soil properties and nitrogen volatilization

Six zeolite fractions were evaluated for particle size: < 0.25 mm, 0.25 a 0.50 mm, 0.50 a 1.00 mm, 1.00 a 2.00 mm, 2.00 to 3.00 mm, and 3.00 to 5.00 mm in the properties of an inceptisol and in the volatilization of ammoniacal nitrogen. Fifteen per cent of each size fraction was applied to the soil, which was sieved (2 mm sieve). The dose of zeolite was determined based on previous incubation evaluations without zeolite and with doses of 7.5, 15, and 30 %. The recommended dose of 120 kg hm⁻² of urea was also used, which contained 46 % N.

The pH was evaluated using a Sartorius pH-meter (PP20); the content of exchangeable bases and the cationic exchange capacity (CEC) were evaluated using an atomic absorption spectrophotometer (GBC 902, Australia), and the Effective Cationic Exchange Capacity (ECEC) was determined as the sum of exchangeable bases in the soil, measured 45 d after planting. The loss of N by volatilization was determined using the

Cuadro 1. Análisis químico y composición catiónica de la zeolita de Tasajera, en Villa Clara, Cuba.**Table 1. Chemical analysis and cationic composition of zeolite in Tasajera, Villa Clara, Cuba.**

Mena	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	N ₂ O	K ₂ O	F ₂ O ₃	PPI	CICT	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺
					%				Cmol(+) kg ⁻¹				
Tasajera	66.0	10.1	0.4	2.9	2.9	0.8	1.8	15.0	138.0	92.0	4.0	9.0	34.0

PPI: pérdidas por ignición de gases volátiles; CICT: capacidad de intercambio catiónico total ♦ PPI: losses due to ignition of volatile gases; CICT: total cationic exchange capacity.

2.00 a 3.00 mm y 3.00 a 5.00 mm en las propiedades de un inceptisol y en la volatilización del nitrógeno amoniacal. Quince por ciento de cada fracción de tamaño se aplicó al suelo, el cual se tamizó (malla de 2 mm). La dosis de zeolita se determinó con base en evaluaciones previas de incubación sin zeolita y con dosis de 7.5, 15 y 30 %. También se usó la dosis recomendada de 120 kg hm⁻² de urea con 46 % de N.

El pH se evaluó con un pH-metro Sartorius (PP20), el contenido de bases intercambiables, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se evaluó con un espectrofotómetro de absorción atómica (GBC 902, Australia) y la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) se determinó como la suma de bases intercambiables del suelo, medidos 45 d después de la siembra. La pérdida de N por volatilización se determinó con la metodología descrita por Lara *et al.* (1997); se usó un colector tipo semiabierto-estático, con dos discos de espumas de poliuretano impregnadas con solución H₂SO₄ 0.5 N y glicerina al 3 % en su interior. La espuma inferior, ubicada a 20 cm desde la superficie, captura amoníaco de los tratamientos, y la superior, a 35 cm, adsorbe el compuesto que ingresa desde la atmósfera.

Evaluación de la dosis de zeolita en la materia seca de grama Rhodes

La zeolita (0.00, 1.88, 4.74, 6.88 y 9.38 g kg⁻¹ de suelo) se evaluó en suelos alítico, pardo grisáceo, pardo con carbonato y húmico sialítico. Los suelos alíticos se caracterizan por su perfil tipo ABC, alteración intensa de minerales primarios y saturaciones de aluminio intercambiable superiores a 50 %. Los suelos pardos se caracterizan por la presencia de horizontes síalicos que muestran composiciones mineralógicas arcillosas de tipo caolinítico. Los suelos húmicos sialíticos presenta perfiles tipo AC, rara vez presentan horizonte B y se caracterizan por el predominio de procesos de sialitización que se refleja en la composición mineralógica arcillosa del horizonte A y límites bruscos entre horizontes. La variable de respuesta fue la masa seca por unidad experimental, determinada después de mantener los tejidos 24 h en estufa de secado (Memmert, UF 750 plus, Alemania) a 60 °C.

methodology described by Lara *et al.* (1997); a semiopen-static collector was utilized, with two polyurethane foam discs soaked in a H₂SO₄ 0.5 N solution and glycerine 3 %. The lower piece of foam, located 20 cm from the surface, captures ammonium from the treatments, and the upper piece, at 35 cm, adsorbs the compound that enters from the atmosphere.

Evaluation of the dose of zeolite in the dry matter of Rhodes grass

Zeolite (0.00, 1.88, 4.74, 6.88, and 9.38 g kg⁻¹ soil) was evaluated in allitic, grayish, brown with carbonate and humic siliceous soils. Allitic soils are characterized by their ABC type profile, intense alteration of primary minerals, and exchangeable aluminum saturations of over 50 %. Brown soils are characterized by the presence of siliceous horizons, which present mineral clay-like compositions of a kaolinite type. Humic siliceous soils present AC type profiles, they seldom present horizon B and are characterized by the predominance of silica accumulation processes that are reflected in the clay-like composition of horizon A and abrupt limits between horizons. The response variable was the dry mass per experimental unit, determined after keeping the tissues for 24 h in a drying oven (Memmert, UF 750 plus, Alemania) at 60 °C.

Evaluation of zeolite in the soil properties and dry matter of Rhodes grass

In grayish brown, brown with carbonates and humic siliceous soils, zeolite proportions of 4.73, 6.87, and 9.37 g kg⁻¹ were evaluated, according to the results of previous evaluations. From each type of soil we included one control without zeolite. After 45 d, pH was determined in potassium chloride (1:1), organic matter (Walkley – Black method), exchangeable bases content (quantification by absorption and atomic emission spectrophotometer), CEC and ECEC (extraction with ammonium acetate at pH 7.0 and sum of exchangeable bases, respectively). Dry matter was also determined.

Evaluación de la zeolita en las propiedades del suelo y la materia seca de grama Rhodes

En suelos pardos grisáceos, pardos con carbonatos y húmico sialítico se evaluaron proporciones de zeolita de 4.73, 6.87 y 9.37 g kg⁻¹, de acuerdo con los resultados de las evaluaciones previas. De cada tipo de suelo se incluyó un testigo, sin zeolita. A los 45 d se determinó pH, en cloruro de potasio (1:1), materia orgánica (método de Walkley – Black), contenido de bases intercambiables (cuantificación por espectrofotómetro de absorción y emisión atómica), CIC y CICE (extracción con acetato de amonio a pH 7.0 y suma de bases intercambiables respectivamente). También se determinó la materia seca.

Evaluación del efecto de zeolita en la nutrición de grama Rhodes en tres suelos

Seis dosis de zeolita (0.00, 1.88, 4.74, 6.88 y 9.38 g kg⁻¹ de suelo) en suelos pardos (grisáceos, con carbonatos y sin carbonatos) se evaluaron para: contenido de N, determinado por la técnica de Kjeldahl y cuantificado volumétrica; P, determinado en un espectrofotómetro de llama (Jenway, PFP7, Reino Unido); K, Ca y Mg, foliar determinados mediante digestión húmeda y espectrofotometría de absorción y emisión atómica.

Los análisis químicos de suelos se realizaron según la norma NRAG 879.88 (Instituto de Suelos de Cuba, 1996) del Instituto de Suelos y los análisis foliares por la norma Ramal NRAG/CNTN-O5 (Instituto de Suelos de Cuba, 2010).

El análisis estadístico de los datos consistió en la verificación de su distribución normal con la prueba de Shapiro Wilk y homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene. Análisis de varianza bifactorial y prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) se realizaron para establecer diferencias significativas entre los tratamientos. IBM SPSS Statistics 20.0 se utilizó para los análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la granulometría de la zeolita en las propiedades del suelo y en la volatilización del nitrógeno

El pH estuvo entre 4.35 y 5.38, con diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$) (Cuadro 2). El pH del tratamiento con el tamaño mayor de partícula no presentó diferencias significativas respecto al testigo, pero sí fue más ácido que en los otros tratamientos. El pH fue superior a 5.30 en los tamaños diferentes de partícula, lo que disminuyó la acidez para el desarrollo de las plantas. Li *et al.*

Evaluation of the effect of zeolite in the nutrition of Rhodes grass in three soils

Six zeolite doses (0.00, 1.88, 4.74, 6.88, and 9.38 g kg⁻¹ soil) in brown soils (grayish, with and without carbonates) were evaluated for: foliar N, determined using the Kjeldahl technique and volumetric quantification; P, determined in a flame spectrophotometer (Jenway, PFP7, United Kingdom); foliar K, Ca and Mg contents, determined by wet digestion and absorption and atomic emission spectrophotometry.

Chemical analyses were performed according to the NRAG 879.88 standard (Cuban Soil Institute, 1996) of the Soil Institute, and the foliar analyses, according to the Ramal NRAG/CNTN-O5 standard (Instituto de Suelos de Cuba, 2010).

The statistical analysis of the data consisted in the verification of its normal distribution using the Shapiro Wilk test, and the homogeneity of variances, with Levene's test. Bifactorial analysis of variance and Tukey test were carried out to establish significant differences between treatments. IBM SPSS Statistics 20.0 was used for the analyses.

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of zeolite particle size on soil properties and on nitrogen volatilization

The pH range was between 4.35 and 5.38, with significant differences between treatments ($p \leq 0.05$) (Table 2). The pH of the treatment with the largest particle size did not present significant differences with the control, yet it was more acidic than in other treatments. A higher pH than 5.30 was observed in the different particle sizes, which reduced the acidity for plant growth. Li *et al.* (2009) report that the pH in soil increased with the zeolite doses. This increase in pH may be due to the increase in CEC by zeolite, which also increases the capacity of retention of exchangeable bases. Also, when reducing the particle size, the specific surface of the mineral increases, favoring ionic exchange, and the natural cations of zeolite, such as Ca²⁺ and Na⁺, can be passed on to the soil solution (La Iglesia, 1989).

The exchangeable Ca contents were located in middle leves, where the largest fraction gave the lowest content of Ca²⁺, without significant differences with the control. The highest content was observed in particles with 0.5 to 1.00 mm, yet with no differences with the other sizes. The Ca levels increased due to the contribution of zeolite and its high affinity

Cuadro 2. Propiedades químicas de fracciones granulométricas de zeolita en suelo Inceptisol.
Table 2. Chemical properties of zeolite particle size in Inceptisol soil.

Fracciones en mm	pH KCl	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺ cmol (+) kg ⁻¹	K ⁺	CICE [†]	CIC [‡]
Testigo	4.35b	7.28c	1.19b	0.20d	0.14b	8.81b	9.58c
<0.25	5.35a	8.75a	1.32a	0.32ab	0.19a	10.38a	12.32ab
0.25-0.50	5.30a	8.50abc	1.23b	0.34a	0.21a	10.20a	12.72ab
0.50-1.00	5.30a	8.80a	1.27ab	0.31b	0.20a	10.69a	12.68a
1.00-2.00	5.38a	8.65ab	1.29b	0.28c	0.15b	10.29a	12.62b
2.00-3.00	5.35a	8.45abc	1.23b	0.15c	0.10c	10.09a	11.13cd
3.00-5.00	4.43b	8.23bc	1.20b	0.19d	0.11c	10.09a	10.55cd
Esx [§]	0.05	0.16	0.03	0.01	0.01	0.18	0.20
C.V %	2.01	3.92	4.17	8.50	13.43	3.61	3.32

[†]CICE: capacidad efectiva de intercambio catiónico; [‡]CIC: capacidad de intercambio catiónico. [§]Esx: desviación estándar. CV: coeficiente de variación. a,b,c,d: Medias con letra distinta en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) ♦ [†]CICE: effective capacity of cationic exchange; [‡]CIC: cationic exchange capacity; [§]Esx: standard deviation; CV: coefficient of variation. a,b,c,d: Means with different letter in a column are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

(2009) reportan que el pH del suelo aumentó con las dosis de zeolita. Este incremento en el pH puede deberse al aumento de CIC por la zeolita, lo que también aumenta la capacidad de retención de bases intercambiables. Además, al disminuir el tamaño de la partícula, la superficie específica del mineral aumenta, favoreciendo el intercambio iónico, los cationes naturales de la zeolita, como Ca²⁺ y Na⁺, pueden pasar a la solución del suelo (La Iglesia, 1989).

Los contenidos de Ca intercambiable estuvieron en niveles medios, en donde la fracción mayor proporcionó el contenido de menor Ca²⁺, sin diferencias significativas con el testigo. El contenido mayor se observó en las partículas con 0.5 a 1.00 mm, pero sin diferencias con los otros tamaños. Los niveles de Ca aumentaron por el aporte de zeolita y por su afinidad alta por este elemento (Machiels *et al.*, 2006). Las concentraciones de Mg⁺² fueron bajas y medias de acuerdo con Fernández *et al.* (2006); las concentraciones menores fueron del testigo y los tamaños de partícula mayores a 0.25 mm, excepto el tamaño entre 0.50 y 1.00 mm y <0.25 mm, con diferencias significativas respecto al testigo. Las zeolitas también son afines al Mg, aumentan su retención y disponibilidad en el suelo (Obregón *et al.*, 2016).

Los valores menores de Na intercambiable correspondieron a los tamaños de partícula entre 1.00 y 3.00 mm y los tamaños menores a 1.00 mm tuvieron el valor mayor, lo que afecta las condiciones físicas del suelo; este elemento favorece la dispersión de

towards this element (Machiels *et al.*, 2006). The concentrations of Mg+2 were low and medium, according to Fernández *et al.* (2006); the lowest concentrations were for the control and particle sizes higher than 0.25 mm, with the exception of the sizes between 0.50 and 1.00 mm and <0.25 mm, and with significant differences with the control. Zeolites also have an affinity to Mg, they increase their retention and availability in the soil (Obregón *et al.*, 2016).

The lowest exchangeable Na values came from particle sizes 1.00 to 3.00 mm, and sizes lower than 1.00 mm had the highest value, which affects the physical conditions of the soil; this element promotes the spreading of clays. Particles smaller than 1.00 mm withheld the highest amounts of exchangeable K, and an inverse proportion was observed between particle size and capacity of retention of exchangeable bases. The best results were provided by particle sizes 0.25 to 3.00 mm, with a clear influence in fractions sized 1.00 to 2.00 mm; the monovalent cations showed a tendency to increase with the lower particle sizes, although the values of K⁺ remained similar to the control, because zeolite provides less of this element than of Ca. Also, in the selective adsorption chain (lyotropic series) of the minerals, the one with bivalent cations is more favorable than the one with monovalent cations when their concentration is greater in the medium, due essentially to its greater ionic radius, which produces a change in selectivity (Machiels *et al.*, 2006).

arcillas. Las partículas menores a 1.00 mm retuvieron más K intercambiable, y se observó relación inversa entre tamaño de partícula y capacidad de retención de bases intercambiables. Los resultados mejores fueron para los tamaños de partícula de 0.25 a 3.00 mm con influencia marcada en las fracciones de 1.00 a 2.00 mm; los cationes monovalentes mostraron tendencia a incrementar con el tamaño menor de partículas, pero los valores del K^+ fueron similares al testigo porque la zeolita aporta menos de este elemento que de Ca. Además, en la cadena de adsorción selectiva (series liotrópicas) de los minerales, la de cationes bivalentes es más favorable que la de monovalentes, cuando la concentración de estos es mayor en el medio, fundamentalmente por su radio iónico mayor, lo que causa un cambio de selectividad (Machiels *et al.*, 2006).

La CICE fue de alrededor de $10 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, sin diferencias significativas entre tamaños de partícula y fue superior (12 %) que el testigo. La CIC mayor se observó con los tamaños de partícula menores a 1.00 mm y en los tamaños mayores de partícula fue similar al testigo. Esta diferencia se debe a que el efecto del tamaño mayor de partículas es a largo plazo, pues el proceso de intercambio iónico transcurre lentamente.

La aplicación de zeolita con tamaños de partícula mayores a 1.00 mm, redujo significativamente las pérdidas por volatilización de N amoniacal a la atmósfera (Cuadro 3). La zeolita ejerce efecto mayor en el suelo en presencia del fertilizante nitrogenado, cuando las partículas de ambos materiales están en contacto cercano y tienen cierta similitud granulométrica (Malekian *et al.*, 2011). El testigo presentó la pérdida mayor de NH_3 y el tamaño mayor de partícula de la zeolita mostró la pérdida menor de N a la atmósfera. La aplicación de zeolita con tamaños de partícula de 3.00 a 5.00 mm redujo hasta 57 % la pérdida de N a la atmósfera, comparado con el testigo, debido probablemente a que al aumentar la superficie específica los sitios de intercambio catiónico en la estructura aumentan, pueden retener el ion NH_4^+ , que retrasa las transformaciones biológicas del N y favorece la asimilación por la planta (Obregón *et al.*, 2016). Según Espécie *et al.* (2015), el uso de zeolita cubana (40 %) aplicada en combinación con urea, en forma de pellets, redujo 33 % la volatilización del amoníaco de soluciones acuosas. Es posible que la zeolita también haya contribuido a reducir la

ECEC was of approximately $10 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, with no significant differences between particle sizes, and was higher (12 %) than in the control. The highest CEC was observed with particle sizes of less than 1.00 mm, and in greater particle sizes, it was similar to the control. This difference is due to the greater-sized particles having a long-term effect, since the ionic exchange process takes places slowly.

Applying zeolite with particles larger than 1.00 mm, significantly reduced losses by ammonial N volatilization into the atmosphere (Table 3). Zeolite exerts a greater effect on the soil in the presence of nitrogenated fertilizer when the particles in both materials are in close contact and have a certain similarity in particle size (Malekian *et al.*, 2011). The control presented the greatest loss of NH_3 and the greater particle size in zeolite presented the lowest loss of N into the atmosphere. Applying zeolite with particle sizes between 3.00 and 5.00 mm reduced N loss into the atmosphere by up to 57 % in comparison with the control, probably because, as the specific surface increases, the cationic exchange sites in the structure increase, capable of retaining the NH_4^+ ion, which delays the biological transformations of the N and favors the assimilation by the plant (Obregón *et al.*, 2016). According to Espécie *et al.* (2015), the use of Cuban zeolite (40 %) combined with urea, in the form of pellets, reduced the volatilization of ammonia from aqueous solutions by 33 %. It is possible that the zeolite also contributed to reducing the volatilization of other chemical forms of N, such

Cuadro 3. Efecto del tamaño de partícula de zeolita en la pérdida, por volatilización, de N-NH_3 en suelos Inceptisoles.

Table 3. Effect of zeolite particle size in the loss, through volatilization, of N-NH_3 in Inceptisol soils.

Tamaño de partícula (mm)	mg $\text{NH}_3 \text{ cm}^{-2}$ a los 45 días
Testigo	371.0 a
< 1.00	344.0 a
1.00-2.00	290.0 b
2.00-3.00	280.0 b
3.00-5.00	160.0 c
ESx	2.40

Medias con letra distinta en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$) ♦ Averages with different letters in a column are statistically different (Tukey; $p \leq 0.05$).

volatilización de otras formas químicas de N, como óxido nitroso (N_2O), al retardar los procesos de nitrificación y desnitrificación en el suelo. Este efecto lo observaron Zaman y Nguyen (2010), al reducir 11 % la emisión de N_2O cuando lo aplicaron con orina de vaca en campos con trébol blanco.

Efecto de la dosis de zeolita en la materia seca de grama Rhodes

Con excepción del suelo alítico, se observó que a dosis mayor de zeolita el contenido de materia seca por maceta fue mayor (Cuadro 4). Estos resultados se deben al incremento significativo de CIC por la zeolita, que permite retención mayor de nutrientes y reducción de la acidez, lo que favorece la disponibilidad y solubilidad de elementos esenciales, como P, que participa en el desarrollo radical y beneficia la absorción de agua y nutrientes (Li *et al.*, 2009).

La dinámica suelo-zeolita-nitrógeno es variable, depende de las características fisicoquímicas de los suelos, la dosis aplicada, el manejo del cultivo y la época del año en la que se realizan los experimentos (Kolyagin y Karasev, 1999). Esto confirma la conveniencia de evaluaciones periódicas de los suelos donde se utilice, ya que la movilidad constante del N en el suelo afecta a las plantas.

En el suelo alítico hubo diferencias significativas entre los tratamientos; una tendencia a incrementar los rendimientos entre 22 y 26 % se observó en presencia del mineral. En los suelos pardos grisáceos la

as nitrous oxide (N_2O), by delaying the nitrification and denitrification processes in the soil. This effect was observed by Zaman and Nguyen (2010), when they reduced N_2O emission by 11 % when applied with cow urine in fields with white clover.

Effect of the doses of zeolite in the dry matter of Rhodes grass

With the exception of the allitic soil, we observed that as zeolite doses became larger, so was the dry matter content in each pot (Table 4). These results are due to the significant increase of CEC by zeolite, which helps retain more nutrients and reduce acidity, favoring the availability and solubility of essential elements such as P, which participates in the radical growth and benefits the absorption of water and nutrients (Li *et al.*, 2009).

The soil-zeolite-nitrogen dynamics are variable, depending on the physical and chemical characteristics of the soil, the dose applied, crop management, and the time of the year in which the experiments are carried out (Kolyagin and Karasev, 1999). This confirms the convenience of periodic evaluations on the soils where they are to be used, since the constant mobility of N in the soil affects plants.

In allitic soil there were significant differences between treatments; a tendency to increase yields between 22 % and 26 % was observed in the presence of the mineral. In the grayish brown soils,

Cuadro 4 Efecto de la dosis de zeolita en la materia seca de grama Rhodes (*Chlorys gallane* c.v Pioneer) en diferentes tipos de suelo.

Table 4. Effect of the doses of zeolite on Rhodes grass (*Chlorys gallane* c.v Pioneer) dry matter in different soil types.

Tipo de suelo.	Dosis de zeolita ($g\ kg^{-1}$)					Esx	C.V (%)
	0.00	1.88	4.74	6.88	9.38		
	g maceta ⁻¹ de materia seca						
Alítico	6.30 ab	8.12a	8.52a	8.35a	8.33a	0.39	9.76
Incremento (%)	-	22	26	25	24		
Pardo grisáceo	7.46c	8.47b	9.46ab	9.56a	10.17a	0.25	5.41
Incremento (%)	-	12	21	22	27		
Pardo con carbonatos	11.44c	12.47b	12.48b	14.20a	13.40ab	0.35	7.00
Incremento (%)	-	8	8	19	15		
Húmico sialítico	14.40c	15.06c	16.08b	16.02b	18.51a	0.21	5.70
Incremento (%)		4	10	10	22		

Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) ♦ Means with different letter in a column are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

dosis mayor de zeolita (9.38 g kg^{-1}) tendió al contenido mayor de materia seca (12 y 27 % respecto al testigo), sin diferencias significativas, con 4.74 y 6.88 g kg^{-1} de zeolita. Las dosis mayores de zeolita en los suelos pardos con carbonatos generaron la materia seca mayor respecto a las demás dosis; en el suelo húmico sialítico la dosis mayor mostró incremento significativo de 22 % respecto al testigo. Todos los tipos de suelos incrementaron el porcentaje de materia seca por efecto de la zeolita, pero el suelo húmico sialítico mostró los resultados mejores, debido probablemente al predominio de arcillas esmectitas que retarda el drenaje interno y podría contribuir junto con la zeolita a retardar el lavado de bases (Fookes, 1997).

Efecto de la zeolita en las propiedades del suelo y la materia seca de grama Rhodes

La zeolita incrementó el pH, los contenidos de bases intercambiables y CIC en los tres suelos (Cuadro 5). Estos resultados son similares a los de Florez-Macías *et al.* (2007) quienes reportan el aumento del pH por el intercambio entre NH_4^+ y cationes, como Ca^{2+} y Na^+ , con la solución del suelo, y liberación de OH^- . En el suelo pardo grisáceo el incremento de Mg^{2+} fue el mayor (61 %), y el de Ca^{2+} y Na^+ en el suelo pardo con carbonatos (16 y 71 %). El suelo húmico sialítico presentó el aumento mayor en K^+ (30 %), debido a la capacidad mayor de retención de la zeolita y las arcillas esmectitas, evitando su lixiviación. La zeolita aumenta la CIC, lo que mejora la condición de acidez del suelo y favorece la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Las concentraciones de Na aumentaron por el mineral zeolítico em-

the highest zeolite dose (9.38 g kg^{-1}) showed a tendency towards the highest content of dry matter (12 % and 27 % with respect to the control), with no significant differences, with 4.74 and 6.88 g kg^{-1} of zeolite. The highest zeolite doses in the brown soils with carbonates produced the most dry matter in comparison with the other doses; in humic siliceous soil, the highest dose showed a significant increase of 22 % with regard to the control. All soil types increased the percentage of dry matter due to the effect of the zeolite, although humic siliceous soil gave the best results, due probably to the predominance of smectite clays, which delay internal drainage and could contribute, along with zeolite, to delaying the washing of bases (Fookes, 1997).

Effect of zeolite in soil properties and Rhodes grass dry matter

The zeolite increased the pH, the exchangeable base contents, and CEC in all three soils (Table 5). These results are similar to those reported by Florez-Macías *et al.* (2007), who point out the increment of pH due to the exchange between NH_4^+ and cations such as Ca^{2+} and Na^+ , with the soil solution and the release of OH^- . In the grayish brown soil, the Mg^{2+} increase was the greatest (61 %), and for Ca^{2+} and Na^+ , this was found in brown soils with carbonates (16 and 71 %). The humic siliceous soil presented the highest increase in K^+ (30 %), due to its higher zeolite and smectite clay retention capacity, avoiding their lixiviation. Zeolite increases CEC, which improves the acidity conditions of the soil and promotes the availability of nutrients for plants. Na

Cuadro 5. Efecto de la zeolita en las propiedades químicas de suelos.
Table 5. Effect of zeolite on the chemical properties of soils.

Tipos de suelo	T [†] g kg^{-1}	g/maceta	pH	% M.O. [‡]	Ca	Mg	Na cmol (+) kg^{-1}	K	CICE	CIC
Pardo Grisáceo	Testigo	7.46	4.20	2.16	6.00	0.74	0.15	2.99	9.88	12.50
	4.73	9.46	4.60	2.38	6.75	1.89	0.22	3.10	11.96	13.50
Pardos con Carbonato	Testigo	11.44	4.60	3.22	9.50	4.95	0.15	0.75	15.35	20.00
	6.87	14.20	4.80	3.43	11.00	5.21	0.52	0.87	17.60	23.10
Húmico Sialítico	Testigo	14.40	5.43	3.44	62.00	4.34	0.70	0.95	67.90	67.00
	9.37	18.51	5.90	3.71	62.50	4.76	1.00	1.35	70.10	70.00

[†]T: tratamiento; [‡]M.O.: materia orgánica ♦ T: treatment; M. O.: organic matter.

pleado, por lo que evaluaciones periódicas serían necesarias cuando se usa zeolita, ya que el Na es agente dispersante y nocivo para la estructura del suelo. Con la zeolita predominante cálcica, en medio acuoso, el NH_4^+ reemplaza al Na^+ localizado en el complejo de cambio y el contenido de Na^+ disponible aumenta. Por lo anterior, sería conveniente realizar extracciones selectivas en los yacimientos localizados encima de aguas subterráneas para conocer su contenido de Na^+ .

Efecto de la dosis de zeolita en la nutrición de Rhodes en tres suelos

La zeolita aumentó los contenidos foliares de N, P, K y Ca (Cuadro 6). A mayor dosis de zeolita en los suelos grisáceos los niveles de N, K y Ca aumentaron; en contraste, el Mg aumentó sólo con las dosis mayores; el P aumentó en todos los tratamientos, posiblemente porque la zeolita disminuye la acidez del suelo, por la adsorción equivalente de Ca^{2+} y Mg^{2+} por H^+ de la solución respectiva; esto permite aumentar la disponibilidad del P en el suelo (Obregón *et al.*, 2016). Al respecto, Rodríguez *et al.*, (2012) señalan que las zeolitas cargadas con NH_4^+ aumentan la solubilización del P. Resultados similares se observaron en

concentrations increased due to the zeolitic mineral used, and therefore periodic evaluations would be necessary when using zeolite, since Na is a dispersal agent, and harmful for soil structure. With the predominantly calcic zeolite, in an aqueous medium, NH_4^+ replaces the Na^+ located in the change complex and the content of available Na^+ increases. Due to this, it would be convenient to carry out selective extractions in the deposits located above underground waters in order to know their content of Na^+ .

Effect of doses of zeolite in Rhodes nutrition in three soils

Zeolite increased with the foliar contents of N, P, K, and Ca (Table 6). As zeolite doses increased in the grisáceos soils, so did the levels of de N, K, and Ca; in contrast, Mg increased only with the highest doses; P increased in all treatments, possibly because zeolite reduces soil acidity, due to the equivalent adsorption of Ca^{2+} and Mg^{2+} by the H^+ of the respective solution; this helps increase P availability in the soil (Obregón *et al.*, 2016). To this end, Rodríguez *et al.*, (2012) point out that the zeolites loaded with NH_4^+ increased the solubilization of the P. Similar results were observed in brown soils, without carbonates,

Cuadro 6. Efecto de la zeolita en el contenido foliar de nutrientes de grama Rhodes (*Chlorys gallane* c.v Pioner).
Table 6. Effect of zeolite on the foliar nutrient content in Rhodes grass (*Chlorys gallane* c.v Pioner).

Tipo de Suelo	Dosis de zeolita (g kg ⁻¹)	Contenido foliar (%)				
		N	P	K	Ca	Mg
Pardos Grisáceos	0.00	1.17	0.16	1.46	0.40	0.21
	1.88	1.32	0.20	1.78	0.54	0.18
	4.74	1.47	0.21	1.52	0.59	0.19
	6.88	1.68	0.21	1.51	0.65	0.18
	9.34	1.81	0.20	1.53	0.65	0.20
	15.99	2.08	0.22	1.46	0.76	0.22
	0.00	1.79	0.19	1.45	0.40	0.22
Pardos sin Carbonatos	1.88	1.87	0.21	1.50	0.62	0.24
	4.74	2.04	0.23	1.50	0.69	0.26
	6.88	2.28	0.21	1.90	0.72	0.35
	9.34	2.43	0.20	1.76	0.85	0.33
	15.99	2.55	0.20	1.68	0.97	0.35
	0.00	1.71	0.18	2.12	0.95	0.20
	1.88	1.90	0.18	2.68	1.00	0.20
Húmico sialítico	4.74	1.95	0.18	2.62	1.00	0.18
	6.88	2.05	0.17	2.64	1.02	0.16
	9.34	2.50	0.18	2.67	1.04	0.15
	15.99	2.62	0.19	2.70	1.04	0.14

suelos pardos, sin carbonatos, y húmico sialítico, con la diferencia de que en los primeros la zeolita aumentó el contenido de Mg, y en el segundo caso los niveles de Ca permanecieron similares y los de Mg disminuyeron respecto al testigo. Estos resultados son similares a los de Soca *et al.* (2004) y Millán *et al.* (2008), quienes reportan aumentos significativos en los contenidos foliares y rendimiento de las plantas al aplicar zeolita.

La zeolita incrementó los índices foliares en comparación con el testigo, debido a su efecto en el desarrollo radicular y presencia de nutrientes, al disminuir su pérdida por fijación, volatilización y lixiviación (Obregón *et al.*, 2016). La zeolita se utiliza para reducir la cantidad de N-NO_3^- y NH_4^+ residual en la solución del suelo, la tasa de nitrificación (Florez-Macías *et al.*, 2007) o aumentar el contenido de N en el tejido vegetal (Millán *et al.*, 2008).

CONCLUSIONES

La zeolita disminuyó la acidez y los contenidos de bases intercambiables en los suelos, con tamaño de partícula entre 1.00 y 3.00 mm aumentó más el pH y los contenidos de Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^+ y disminuyó la retención de Na^+ . Los tamaños de partículas mayores no incrementaron la CIC respecto al testigo, porque su efecto es a largo plazo, y partículas menores a 1 mm tienen efectividad mayor debido a su superficie activa, pero su pérdida en los suelos es mayor.

A mayor dosis de zeolita los rendimientos de materia seca del cultivo aumentaron significativamente en todos los suelos estudiados, con excepción del alítico.

La zeolita elevó el pH de los suelos y los niveles de bases intercambiables, favoreció su fertilidad y redujo las pérdidas por lixiviación. La aplicación periódica de zeolita que suministran Na puede alterar la estructura del suelo, por lo que zeolita con contenido bajo de Na y alto de Ca se recomienda. La zeolita tuvo efectos positivos en la concentración foliar de nutrientes en las plantas de grama Rhodes.

and humic siliceous soils, with the difference that in the former, zeolite increased Mg content, and in the latter, Ca levels remained similar and Mg levels fell in comparison to the control. These results are similar to those of Soca *et al.* (2004) and Millán *et al.* (2008), who report with significant increases in foliar contents and yields of plants when using zeolite.

Zeolite increased the foliar indices in comparison with the control, due to its effect in the development of the radicle and the presence of nutrients, since it reduced its loss by fixation, volatilization, and lixiviation (Obregón *et al.*, 2016). Zeolite is used to reduce the amount of N-NO_3^- and residual NH_4^+ in the soil solution, the rate of nitrification (Florez-Macías *et al.*, 2007), or to increase the N content in plant tissue (Millán *et al.*, 2008).

CONCLUSIONS

Zeolite reduced acidity and the contents of exchangeable bases in soils; with particle sizes between 1.00 and 3.00 mm, it increased pH and the contents of Ca^{+2} , Mg^{+2} , and K^+ and reduced Na^+ retention. The greater particle sizes did not increase CEC with respect to the control, because its effect is a long-term one, and particles smaller than 1 mm are more effective due to their active surface, though their loss in soils is greater.

With higher zeolite doses, dry matter yields increased significantly in all soils studied, except allitic soils.

Zeolite raised the pH of soils and the levels of exchangeable bases, it promoted their fertility, and reduced losses by lixiviation. The regular use of zeolite that provide Na can alter soil structure; therefore, zeolite with low Na and high Ca content is recommended. Zeolite had positive effects on the foliar concentration of nutrients in Rhodes grass plants.

—End of the English version—

-----*

LITERATURA CITADA

- Chaveli, P., R. Caballero, R. Barroso, y D. Rodríguez, 2012. Uso de la zeolita natural como complemento del abonado orgánico en el cultivo de hortalizas en huertos intensivos. Cent. Agríc. 39: 69-67.
- Colombani, N., M. Mastrocicco, D. Di Giuseppe, B. Faccini and M. Coltorti. 2015. Batch and column experiments on

- nutrient leaching in soils amended with Italian natural zeolites. Catena 127: 64-71.
- Colombani N., M. Mastrocicco, D. Di Giuseppe, B. Faccini and M. Coltorti, 2014. Variation of the hydraulic properties

- and solute transport mechanisms in a silty-clay soil amended with natural zeolites. *Catena* 123: 195-204.
- Costafreda, J. L. 2014. Tectosilicatos con características especiales: las zeolitas naturales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid. Editorial Fundación Gómez Pardo, Madrid. 26p. oa.upm.es/32548/1/Tectosilicatos_Costafreda.pdf. (Consulta: Mayo 2015).
- Espécie, S. C., M. Baptista, P. S. Gomes, Polidoro J. C., S. Lopes, M. Silva, H. Vargas, L. Mota, and L. Gomes. 2015. Cuban zeolite as ammonium carrier in urea-based fertilizer pellets: Photoacoustic-based sensor for monitoring N-ammonia losses by volatilization in aqueous solutions. *Sensor actuator* 212: 35-40.
- Febles, J., F. Borsatto, and M. Soca. 2015. Fertcel-clinoptilolite natural product to optimize the fertilization and reduce environmental pollution. *J. Agr. Sci. Technol.* 5: 189-192.
- Fernández, L. C., N. G. Rojas, T. G. Roldán, M. E. Ramírez, H. G. Zagarra, R. Uribe, R. J. Reyes, D. Flores, y J. M. Arce. 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo. SEMARNAT - INECOL. Editorial del Deporte Mexicano, México D.F. 182 p.
- Florez-Macías, A., A. Galvis, T. M. Hernández, y F. F. De León P. 2007. Efecto de la adición de zeolita /Clinoptilolita y modernita) en un andosol sobre el ambiente químico edáfico y el crecimiento de la avena. *Rev. Ciencia Tecn. América* 32: 692-696.
- Fookes, P. 1997. Suelos residuales tropicales. The Geological Society. London. http://www.academia.edu/1313528/SUELOS_RESIDUALES_TROPICALES. (Consulta: febrero 2016).
- Gholamhoseini, M., A. Ghalavand, A. Khodaei-Joghan, A. Dolatabadian, H. Zakikhani, and E. Farmanbar. 2013. Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching. *Soil Till. Res.* 126: 193-202.
- Gil, R. R. Campos, M. C. Prudas, A. Morales, y E. Torralvasava. 1988. Perspectivas de utilización de la zeolita del yacimiento de Tasajera en la industria de los fertilizantes. *Memorias de Quimindustria, La Habana-Cuba* 88: 95-98.
- Instituto de Suelos de Cuba. 1996. NRAG 879.88. Norma Ramal de Análisis Químicos de Suelo. Cuba.
- Instituto de Suelos de Cuba. 2010. NRAG/CNTN-O5. Norma Ramal de Análisis Foliares. Cuba.
- Jha, V. K., S. Hayashi, and J. Hazard. 2009. Modification on natural clinoptilolite zeolite for its NH_4^+ retention capacity. *Mater* 169: 29-35.
- Jordan, R., R. Betancourt, R. Betancourt, E. Cabrera, y D. Cabrera. 2013. Mejorador de suelo a partir de una zeolita natural: una propuesta sustentable para la agricultura. *Nova Scientia* 6: 1-11.
- Kolyagin, Y. S., and O. A. Karasev. 1999. Root nutrition and the quality of sugar beet. *Sakharnaya Svekla (Bulgaria)* 6:11-12.
- La Iglesia, A. 1989. Diagramas de estabilidad de zeolitas. *Estud. Geol.* 45: 267-277.
- Lara, C., y P. C. Trivelin O. 1997. Eficiencia de un colector semiabierto estático no cuantificado de N-NH_3 volatilizado da urea aplicado a un suelo. *Rev. Bras. Cien. Solo* 14: 481-487.
- Li, H., W. Shi, H. Shao, y M. Shao. 2009. The remediation of the lead-polluted garden soil by natural zeolite. *J. Hazard. Mater.* 169: 1106-1111.
- López M., M. Hernández, C. Barahona, M. Martínez, R. Portillo, y F. Rojas 2010. Propiedades fisicoquímicas de la clinoptilolita tratada con fertilizantes a usar como aditivo en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. *Terra Latinoam.* 28: 1-8.
- Machiels, L., R. Snellings, F. Morante, J. Elsen, y C. Paredes. 2006. Mineralogía cuantitativa de los depósitos de zeolita en la costa del Ecuador. *Rev. Tecnol. ESPOL* 19: 41-48.
- Malekian R., A. Koupai, and Y. Eslamian 2011. Influences of clinoptilolite and factant-modified clinoptilolite zeolite on nitrate leaching and plant growth. *J. Hazard. Mater.* 185: 970-976.
- Millán G., F. Agosto, L. Vásquez, L. Botto, L. Lombardi, y L. Juan 2008. Uso de clinoptilolita como un vehículo de fertilizantes nitrogenados en un suelo de la región Pampeana de Argentina. *Cien. Inv. Agr.* 35: 293-302.
- Obregón, N., J. Díaz, M. Daza, y H. Aristizábal. 2016. Efecto de la aplicación de zeolita en la recuperación de nitrógeno y el rendimiento de maíz. *Acta Agron.* 65: 24-30.
- Rodríguez, C., A. Gil, y A. Karak. 1988. Uso de la zeolita en los fertilizantes granulados. *Quimindustria* 88: 134-5-138.
- Rodríguez, C., R. Gil, y B. Soto. 2012. Roca fosfórica parcialmente acidulada con zeolita incorporada. Procedimiento de obtención y resultados agronómicos. <https://ediciones.inca.edu.cu/inca/files/congresos/2012/CD/memorias/ponencias/talleres/ENP/ra/ENP-P.13.pdf>. (Consulta: marzo 2016).
- Soca, M., y J. E. Villareal. 2015. Influencia de zeolita y roca fosfórica sobre el desarrollo de los cultivos de sorgo y papa. *Cienc. Agrop.* 23: 60-74.
- Soca M., J. Castellanos, y J. Febles 2004. Efecto de la zeolita en la eficiencia de los fertilizantes químicos, fertilizantes y enmiendas de origen mineral. *Panorama Minero* 14: 261-268.
- USDA-United States Department of Agriculture. 2014. Keys of soil taxonomy by Soil Service staff. Twelfth edition.
- Zahedi, H., A. H. Shirani-Rad, and H. R. Tohidi-Moghadam. 2012. Zeolite and selenium application and their effects on production and physiological attributes of canola cultivars under water stress. *Agrociencia* 46: 489-497.
- Zaman, M., and M. L. Nguyen. 2010. Effect of lime or zeolite on N_2O and N_2 emissions from a pastoral soil treated with urine or nitrate-N fertilizer under field conditions. *Agr. Ecosyst. Environ.* 136: 254-261.
- Zwingmann, N., B. Singh, I. Mackinnon, and R. Gilkes. 2009. Zeolite from alkali modified kaolin increases NH_4^+ retention by sandy soil: Column experiments. *Appl. Clay Sci.* 46: 7-12.