

## EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA DEL MAÍZ EN UN SUELO ARENOSO TRATADO CON ENMIENDA ÓRGANO-ZEOLÍTICA

Mónica B. Rodríguez<sup>1</sup>; Martín Torres Duggan<sup>2</sup>; Joaquín de Igarzabal<sup>1</sup>; Erik Stingl<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes. <sup>2</sup>Tecnoagro S.R.L.  
E-mail: [mrodrigu@agro.uba.ar](mailto:mrodrigu@agro.uba.ar)

Recibido: 12/11/2019

Aceptado: 14/09/2020

### RESUMEN

Las zeolitas aplicadas junto con residuos de feedlot podrían aportar nitrógeno (N) y mejorar el aprovechamiento del agua por los cultivos, además de retener excedentes de N en suelos arenosos. Los objetivos de este trabajo fueron: estudiar los efectos de la enmienda órgano-zeolítica (FZ) sobre la producción de biomasa, la absorción (Nabs) y eficiencia de uso del N (EUN) y del N del residuo de feedlot (EUNf) y sobre la productividad del agua (PA) del maíz; y sobre los cambios en la retención del N amoniacal y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el suelo. Para ello, se cultivó maíz en macetas en invernáculo, las que recibieron los siguientes tratamientos: testigo (T); enmienda de zeolita (Z), de residuo de Feedlot (F), órgano-zeolítica (Feedlot+Zeolita) (FZ). El residuo de feedlot (F y FZ) mejoró en un 40 % la EUNabs, mientras que FZ resultó en una mayor productividad del agua de las plantas, y en mayores aumentos en la biomasa (120 % vs. 78 %) y en el Nabs (60 % vs. 30 %) que F en comparación con el testigo; y en una EFUNf más alta que F (70%). La CIC estimada fue más alta en FZ que en el resto de los tratamientos, sin embargo, las mediciones de retención amoniacal y de nitratos mostraron ausencia de excedentes de N en el suelo al final del experimento tanto en F como en FZ. Los resultados obtenidos sugieren un efecto interactivo mejorador entre el feedlot y las zeolitas sobre las variables estudiadas, posicionando a la enmienda órgano zeolítica como una potencial alternativa sustentable para mejorar la fertilidad de suelos.

**Palabras clave:** Clinoptilolita, destinos del N, agua disponible, residuo feedlot, CIC y amonio.

## NITROGEN USE EFFICIENCY AND MAIZE WATER PRODUCTIVITY IN A SANDY SOIL TREATED WITH ORGANIC- ZEOLITIC MANURE

### ABSTRACT

Zeolites formulated with feedlot manures may improve crops nitrogen (N) availability, water use efficiency and retain N surplus in sandy soils. The objective of this study was to investigate the effect of organic-zeolitic manure (FZ) on maize biomass, absorbed (Nabs) and N use efficiency (EUNabs), feedlot residue N use efficiency (EUNf), water productivity (WP), and soil ammoniacal N retention and CEC (Cation Exchange Capacity). On this aim, a greenhouse experiment was carried out in maize in pots, and the following treatments were settled out: control (T), zeolites (Z), feedlot residues (F), feedlot residues+zeolites (FZ). Maize plants with feedlot residue amendments (F and FZ) improved their EUNabs in a 40 %. However, FZ amendment resulted in plants higher water use efficiency, and in a higher increase in biomass (120 % vs. 78 %), and in Nabs (60 % vs. 30 %) than F compared to the control. Also, EUNf was 70 % higher in FZ than in F. CEC estimated was higher in FZ compared with the other treatments, however, soil ammoniacal N and nitrates measurements showed no N surplus at the end of the experiment at both F and FZ. Results obtained suggest interactive improving effects between the zeolites and the feedlot residue on the studied variables, positioning the organic-zeolitic manure as a potential alternative sustainable tool for soil fertility improving.

**Key words:** Clinoptilolite, fates of N, available water, feedlot residues, CEC, ammonium.

## INTRODUCCIÓN

Los suelos arenosos ocupan extensas áreas del territorio argentino, siendo muy frecuentes en el oeste de la Región Pampeana (Durán *et al.*, 2011; Panigatti, 2014). Hacia esta zona fueron desplazados los sistemas de producción de carne de base pastoril como consecuencia de la expansión de la agricultura iniciada en los años 90. Dicha expansión fue acompañada por una importante intensificación de los agro-sistemas de la zona, caracterizada por una progresiva agriculturización de los modelos productivos, particularmente el cultivo de soja. Así fue como los nuevos planteos ganaderos, en gran parte bajo sistemas intensivos de producción de carne o feedlot, comparten el área con cultivos como el maíz, que se desarrollan en la denominada Pampa Arenosa. Estas zonas presentan limitaciones edáficas asociadas con drenaje algo excesivo, reducida capacidad de retención hídrica, permeabilidad moderadamente rápida y riesgo de erosión hídrica y eólica, lo que resulta en déficits hídricos frecuentes en los cultivos, aún en años húmedos (Barraco, 2009). Por otra parte, el nivel de nutrientes de estos suelos suele ser limitante para la realización de cultivos, siendo necesario el aporte de fertilizantes para mejorar su productividad (Caviglia y Andrade, 2010). Estas restricciones edafo-climáticas determinan condiciones marginales para la agricultura en estos agro-ecosistemas, razón por la cual, el uso eficiente de los recursos bióticos y abióticos constituye un objetivo esencial para su sustentabilidad.

El uso de minerales en general, y de zeolitas en particular, se considera una de las innovaciones más destacadas para mejorar la condición hidrofísica del suelo y la eficiencia de aprovechamiento de recursos abióticos como agua y N en los agrosistemas (De Campos Bernardi *et al.*, 2013; Herrmann y Torres Duggan, 2016). Si bien en la actualidad existen 40 tipos de zeolitas naturales descritas, las zeolitas naturales con potencial económi-

co corresponden a minerales autigénicos o productos de alteración en rocas sedimentarias finamente cristalinas y se las encuentra en cinco clases: chabasita, clinoptilolita, erionita, mordenita y phillipsita. Estas son las únicas aceptadas en el mercado de los minerales industriales ya que son abundantes en la naturaleza y poseen las especificaciones técnicas requeridas (SEGEMAR-UNSAM, 2006). En la Argentina, se han caracterizado yacimientos y manifestaciones con rocas portadoras de zeolitas en diferentes provincias como Chubut, La Rioja y Mendoza (Herrmann y Torres Duggan, 2016). Sin embargo, las únicas manifestaciones de zeolitas que han sido estudiadas desde el punto de vista de su potencial geológico-minero y como agrominerales son las tobas zeolíticas de la Cuenca de Paganzo (Depto. Independencia, La Rioja) (Agosto *et al.*, 2005; Carrizo *et al.*, 2006). No obstante ello, no se cuenta aún en el país con estadísticas locales confiables que permitan diferenciar la magnitud y características mineralógicas de la zeolita de uso agrícola (Herrmann, com. pers.).

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos naturales cuya estructura consiste en un andamiaje de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  (Muptom, 1999; Ramesh y Reddy, 2011). Poseen canales y cavidades de dimensiones nanométricas que le otorgan una superficie interna extremadamente grande (entre 500 y 1000  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ) en relación a su superficie externa (Ferreira y Schulthess, 2011), la cual se corresponde con una elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC) y de agua, entre otras propiedades (Chester y Derouane, 2009; Polat *et al.*, 2004). Estos minerales pueden retener 1,6 veces su peso en humedad promoviendo una mayor disponibilidad de agua en la zona radical, reduciendo las pérdidas por evaporación, y disminuyendo los requerimientos de agua de riego (Bigelow 2001; Tarkalson e Ippolito, 2010). Mejoran la capacidad de retención hídrica del suelo en un amplio gradiente de potenciales mátricos (Bigelow *et al.*, 2001; Torres Duggan, 2017), incrementando la

biomasa vegetal y consecuentemente el rendimiento (Ippolito *et al.*, 2011; Rodríguez y Lavado, 2004). Además, debido a su elevada CIC, las zeolitas poseen una afinidad por el amonio del suelo que lo protege de la acción microbiana, reduciendo las tasas de nitrificación (Tarkalson e Ippolito, 2010). De este modo, actuarían como un fertilizante de liberación lenta (Polat *et al.*, 2004; Ramesh y Reddy, 2011; De Campos Bernardi *et al.*, 2013) por reducción de las pérdidas de N cuando se aplican en conjunto con fertilizantes y enmiendas orgánicas (Tsadilas y Argyropoulos, 2006).

La aplicación de enmiendas orgánicas representa una práctica efectiva para incrementar los contenidos de materia orgánica (MO) y nutrientes del suelo (Herrero, 2014; Pegoraro *et al.*, 2014). En la Argentina, una fuente significativa de este tipo de materiales proviene de establecimientos de feedlot. Este tipo de enmienda posee una alta concentración de materia orgánica, N y otros nutrientes, permitiendo reducir total o parcialmente el uso de fertilizantes (USEPA, 2000; Bolton *et al.*, 2004; Herrero, 2014). Si bien en los últimos años se evidencia un incremento del interés por la valorización agrícola de los estiércoles y residuos pecuarios como fuentes de nutrientes y/o mejoradores de la calidad de los suelos (Rodríguez y Torres Duggan, 2015), la adopción de estas prácticas es poco frecuente actualmente en la Argentina. Esto explicaría la escasa información disponible sobre la respuesta al agregado de enmiendas orgánicas de origen pecuario y sus efectos sobre las propiedades edáficas y sobre los cultivos (Herrero y Gil, 2008; Herrero, 2014).

Desde el punto de vista ambiental, la reutilización y el reciclado del estiércol de feedlot como enmienda disminuye el riesgo de contaminación de suelos y cuerpos de agua aledaños a estos establecimientos (Leggo 2000; Pordomingo, 2010; Herrero y Gil, 2008; Herrero, 2014). Sin embargo, en el suelo donde es aplicado, podrían generarse excedentes de

N (N residual) los que pueden derivar en procesos de contaminación por lixiviación de nitratos (Tarkalson e Ippolito, 2011) o por volatilización de amoníaco (He *et al.*, 2002; De Campos Bernardi *et al.*, 2013), ya que frecuentemente sólo una parte del N es absorbido por las plantas (Civeira y Rodríguez, 2011).

La aplicación conjunta al suelo de zeolitas y residuos orgánicos de feedlot como enmiendas órgano-zeolíticas (FZ) promueve la productividad de los cultivos y la condición físico-química del suelo. Estudios realizados en girasol mostraron incrementos en el rendimiento en grano, materia seca y área foliar dependiendo de la condición hídrica del año (Gholamhoseini *et al.*, 2013). Asimismo, las FZ podrían controlar los excedentes de la mineralización del N generada por este tipo de enmiendas, aunque la información disponible aún no es concluyente. Por un lado, la fertilización órgano-zeolítica en base a estiércol permitió controlar los excedentes de N provenientes del feedlot aplicado al suelo (He *et al.*, 2002; Polat *et al.*, 2004; Ramesh y Reddy, 2011) e incrementar la productividad de una pradera (Rodríguez *et al.*, 1994) y del raigrás cultivado en sustratos. Asimismo, He *et al.* (2002), sugirieron que enmiendas a base de zeolitas y celulosa aumentaron la retención de amonio en los sitios de intercambio del suelo, disminuyendo las pérdidas por volatilización derivados de fertilizantes nitrogenados. También, Ippolito *et al.* (2011) demostraron que las zeolitas redujeron la tasa de nitrificación, debido probablemente a la adsorción de amonio en su estructura cristalina, reduciendo la lixiviación del N mineral. Sin embargo, dicha adsorción de amonio podría limitar la disponibilidad de N para las plantas. Investigaciones recientes reportaron que el aprovechamiento de N proveniente de la enmienda de feedlot estaría limitado por la desincronización en los ciclos de adsorción y desorción de amonio desde la zeolita, ya que existiría un tiempo de efectividad de la unión entre amonio proveniente del fertilizante y las zeolitas. Como consecuencia, el N no estaría

disponible en el momento de mayor requerimiento del cultivo, generándose mayores niveles de nitratos perdidos en los lixiviados (Civeira y Rodríguez, 2011).

La mayoría de las investigaciones realizadas en relación con las zeolitas se han centrado en la retención de nutrientes y su posterior liberación hacia los cultivos (Rodríguez y Gatti, 2010), y en menor medida en estudiar la dinámica del agua en el sistema suelo-cultivo. Un aspecto aún no comprendido completamente es cómo interactúan los efectos del uso de las zeolitas y de las enmiendas órgano-zeolíticas sobre la productividad de agua de los cultivos. Datos publicados demuestran que este tipo de enmiendas podrían generar un mejor aprovechamiento del agua disponible, aunque en condiciones de estrés hídrico (Ippolito *et al.*, 2011). Sin embargo, Dane *et al.* (2011) observaron que gran parte del agua contenida internamente en la zeolita puede estar muy fuertemente retenida, y por lo tanto no disponible para las plantas. De lo antedicho se interpreta que el manejo de estas enmiendas con un criterio sustentable requiere de investigaciones que permitan establecer los efectos de la aplicación conjunta de zeolitas de origen local y residuos de feedlot sobre la biomasa de las plantas, el aprovechamiento del agua y el N disponible, y de su potencial para controlar eventuales excedentes de N que podrían generar contaminación.

Se plantearon las siguientes hipótesis: a) debido al aporte de N del residuo de feedlot y a la capacidad para retener y conservar el agua edáfica de las zeolitas, su aplicación conjunta mejora la producción de biomasa en hoja y tallo, y el aprovechamiento del N y del agua por parte del maíz; y b) las zeolitas, debido a su propiedad de aumentar la CIC del suelo, retienen amonio residual controlando los excedentes de la mineralización del N. Los objetivos del presente trabajo fueron, por un lado estudiar los efectos de la enmienda órgano-zeolítica sobre la producción de biomasa aérea (hojas y tallo), sobre la absorción y

eficiencia de uso del N, y sobre la productividad del agua de riego en plantas de maíz; y por el otro, estimar la retención de N amoniacal en el suelo debido al aumento de la CIC promovido por el agregado de zeolitas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio experimental y descripción general de la investigación

Con el fin de investigar los efectos de la enmienda órgano-zeolítica sobre el cultivo de maíz, se compararon los efectos de la enmiendas de zeolitas, de feedlot y órgano-zeolítica (aplicación conjunta de feedlot y zeolitas) sobre: la biomasa aérea (tallo y hoja), la absorción y eficiencia de uso de N (tallo y hoja), y la productividad del agua para riego en plantas de maíz creciendo en macetas. Además, para investigar el efecto de la enmienda órgano-zeolítica sobre la dinámica del N del suelo, se determinaron los nitratos, la retención de N amoniacal ( $N-NH_4^+$ ), y el CIC en todos los tratamientos. El experimento se realizó en el invernáculo de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes de la FAUBA entre septiembre de 2014 y febrero de 2015, bajo condiciones controladas de temperatura (30°C promedio) y humedad (65 % promedio). La temperatura del aire se controló por medio de un sistema de refrigeración por paneles húmedos cuya función es reducir la temperatura del aire exterior. Los tratamientos se aplicaron en 16 macetas de 7 litros (21 cm de diámetro superior x 18 cm de diámetro inferior x 25 cm de altura), en cada una de las cuales se sembraron cuatro semillas de maíz (genotipo Ax 870 Nidera), las que luego de la emergencia se ralearon a una por maceta. La humedad de las macetas se mantuvo en capacidad de campo (CC) mediante riegos con agua destilada para evitar limitaciones hídricas durante el ensayo. El volumen de riego aplicado diariamente en cada maceta fue determinado por gravimetría calculando la diferencia de peso de la maceta sin planta en el momento de riego y la correspondiente a la

retención hídrica objetivo (CC) medidas al comienzo del experimento para cada tratamiento (Tsadilas y Argyropoulos, 2006). El ensayo se extendió hasta la floración femenina (R1) del maíz.

### Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental fue en bloques completamente aleatorizados (DBCA) con cuatro repeticiones (16 unidades experimentales). Se aplicaron cuatro tratamientos: zeolita (Z), residuo de feedlot (F), enmienda órgano-zeolítica (residuo de feedlot y zeolita) (FZ), y un testigo (sin agregado de enmienda) (Cuadro 1).

**Cuadro 1:** Descripción de los tratamientos aplicados en el experimento. T: testigo; Z: zeolitas; F: residuos de feedlot y FZ: residuos de feedlot y zeolitas.

| Tratamiento | Dosis equivalente de minerales /enmiendas aplicada |
|-------------|--|
| 1           | T -  |
| 2           | Z 5 % p/p de Z <sup>a</sup>                        |
| 3           | F 15 Mg ha <sup>-1b</sup>                          |
| 4           | FZ 15 Mg ha <sup>-1</sup> y 5 % p/p de Z           |

<sup>a</sup>(Gottardi y Galli, 1985; De Campos Bernardi *et al.* 2013).

<sup>b</sup>equivalente a la dosis de campo (Lavado *et al.*, 2007; Pordomingo, 2003).

### Caracterización del suelo, zeolitas y residuo de feedlot

El suelo utilizado en el experimento se extrajo de la capa superficial (horizonte A) de un suelo Hapludol éntico del oeste de la provincia de Buenos Aires cuyo último cultivo fue trigo. Las muestras de suelo fueron procesadas (homogeneizadas, secadas en estufa a 40°C y tamizadas por 2 mm) y luego analizadas en laboratorio utilizando metodologías de rutina (Cuadro 2).

Las características de los residuos de feedlot y las zeolitas se describen en los Cuadros 3 y 4, respectivamente. El residuo de feedlot se obtuvo de un establecimiento de feedlot a cielo abierto ubicado en la localidad de Alber-

**Cuadro 2.** Propiedades físico-químicas y granulométricas del suelo utilizado en el ensayo (n=3).

| Analito/propiedad              | Valor | Unidad                             |
|--------------------------------|-------|------------------------------------|
| pH                             | 6,10  |                                    |
| CE en extracto de sat          | 1,00  | dS m <sup>-1</sup>                 |
| COT                            | 6,50  | g kg <sup>-1</sup>                 |
| MO                             | 11,20 | g kg <sup>-1</sup>                 |
| Nt                             | 0,72  | g kg <sup>-1</sup>                 |
| Relación C/N                   | 9,00  |                                    |
| P extractable                  | 6,42  | mg kg <sup>-1</sup>                |
| N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 19,90 | mg kg <sup>-1</sup>                |
| N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 6,30  | mg kg <sup>-1</sup>                |
| Ca intercambiable              | 2,92  | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> |
| Mg intercambiable              | 1,21  | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> |
| K intercambiable               | 1,71  | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> |
| Na intercambiable              | 0,05  | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> |
| PSI                            | 0,90  | %                                  |
| CIC                            | 5,60  | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> |
| Fraccionamiento granulométrico |       |                                    |
| Arena                          | 87,00 | %                                  |
| Limo                           | 5,50  | %                                  |
| Arcilla                        | 7,50  | %                                  |

ti (provincia de Buenos Aires). Dicho material fue recogido con pala de las pilas de almacenamiento (sin compostar) donde se dispone el estiércol removido de los corrales una o dos veces al año. Las pilas se ubican fuera de los corrales, en un lugar adecuado para mantener la calidad del mismo. El residuo recogido se dispuso en bolsas que se transportaron al laboratorio y se conservaron en heladera hasta su caracterización y utilización. El material de zeolitas fue obtenido de tobas ubicadas en la cuenca de Paganzo (Provincia de la Rioja) y se clasifica como serie Heulandita/Clinoptilolita. Las muestras de suelo y residuo de feedlot se analizaron en el laboratorio IN-GEIS-UBA-CONICET mientras que la caracterización de las zeolitas fue realizada en SEGE-MAR y los análisis petrográfico-mineralógicos de las mismas, en la FCEN-UBA.

**Cuadro 3.** Propiedades químicas, físicas y físico-químicas de la zeolita utilizada en el ensayo.

| Analito/propiedad              | Valor | Unidad              |
|--------------------------------|-------|---------------------|
| pH                             | 6,0   | -                   |
| CE                             | 3,4   | dS m <sup>-1</sup>  |
| MO                             | 133,0 | g kg <sup>-1</sup>  |
| C                              | 53,7  | g kg <sup>-1</sup>  |
| Humedad                        | 15,3  | %                   |
| N                              | 6,4   | g kg <sup>-1</sup>  |
| P                              | 5,8   | g kg <sup>-1</sup>  |
| Na                             | 0,7   | g kg <sup>-1</sup>  |
| K                              | 9,3   | g kg <sup>-1</sup>  |
| Ca                             | 11,4  | g kg <sup>-1</sup>  |
| Mg                             | 0,69  | g kg <sup>-1</sup>  |
| S                              | 2,5   | g kg <sup>-1</sup>  |
| C/N                            | 8,4   | -                   |
| N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 67,2  | mg kg <sup>-1</sup> |
| N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 47,0  | mg kg <sup>-1</sup> |
| Densidad aparente              | 1,015 | g cm <sup>-3</sup>  |

La zeolita (molida a 0,5 mm), el residuo de feedlot y la formulación conjunta, se aplicaron sobre el estrato superficial de cada maceta incorporando suavemente al suelo previo a la siembra del maíz en las macetas.

### Determinaciones

**En suelo:** En dos momentos del ensayo, al inicio y al final (R1, floración femenina del maíz), se tomaron muestras de los 15 cm superiores de suelo de las macetas con un sacabocados de 1 cm de diámetro. Una vez extraídas, las muestras fueron procesadas (homogeneizadas, secadas en estufa a 40 °C y tamizadas por 2 mm) para su posterior análisis en laboratorio. En el muestreo inicial, se efectuaron las siguientes determinaciones: pH (potenciometría), CE (conductimetría), COT (Walkley y Black, 1934), N total por método Kjeldahl (Page *et al.*, 1982), y fósforo extractable (Bray 1, cuantificación colorimétrica) (Sparks, 1996); mientras que en el muestreo inicial y en el final, se estimaron los

**Cuadro 4.** Propiedades químicas y físico-químicas del residuo de feedlot utilizado en el ensayo.

| Elemento                                | %              |
|---|----------------|
| SiO <sub>2</sub>                        | 70,94          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>          | 12,41          |
| F <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 2,20           |
| TiO <sub>2</sub>                        | 0,22           |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>           | 0,02           |
| MnO                                     | 0,02           |
| CaO                                     | 2,39           |
| MgO                                     | 0,67           |
| K <sub>2</sub> O                        | 1,32           |
| Na <sub>2</sub> O                       | 1,9            |
| SO <sub>3</sub>                         | <0,01          |
| pH                                      | 9,5            |
| CIC (meq g <sup>-1</sup> )              | 1,49 (+/-0.01) |
| Pérdida de calcinación a 1000°C         | 7,84           |
| Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> ) | 0,92           |

nitratos en suelo por la técnica de diazotación con Snedd (Marbán, 2005); y el amonio, CIC y cationes intercambiables (Richter *et al.*, 1982). La retención de N amoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) se estimó según la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{N-NH}_4^+_{\text{final}} (\text{mg maceta}^{-1}) - \text{N-NH}_4^+_{\text{inicial}} (\text{mg maceta}^{-1})}{\text{N-NH}_4^+_{\text{inicial}} (\text{mg maceta}^{-1})}$$

Donde:

**N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup><sub>final</sub>** (mg maceta<sup>-1</sup>) y **N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup><sub>inicial</sub>** (mg maceta<sup>-1</sup>) son los niveles de N amoniacal medidos al final y al inicio del experimento, respectivamente.

**En planta:** Las plantas se cosecharon en el estado de floración femenina (R1). Se extrajeron las plantas completas, las cuales fueron separadas de sus raíces y secadas en estufa a 60°C, hasta alcanzar peso constante. Seguidamente, se separaron los tallos por corte en la base de la hoja para determinar biomasa de hoja (BH) y biomasa de tallo (BTa). Sobre el tejido seco se determinó la concentración de N por el método Kjeldahl



(Page, 1982). En base a los datos de biomasa y concentración de N se calcularon el N absorbido en hoja (NabsH) y en tallo (Nabs Ta) (Page *et al.*, 1982).

A partir de los datos de NabsH, NabsTa, N en suelo y N aportado por el residuo de feedlot, se calculó la eficiencia de uso del N del residuo de feedlot (EUNf) (Ec2) y la eficiencia de uso del N absorbido (EUNabs) (Ec3) (adaptado de Ciampitti y Vyn, 2012) según las siguientes ecuaciones:

**EUNf** (mg biomasa maceta<sup>-1</sup>/mg de N maceta<sup>-1</sup>) = (Bf - BT) / Nf

Donde,

Bf y BT representan la producción de biomasa aérea total (mg maceta<sup>-1</sup>) en tratamientos con aplicación de residuo de feedlot (Bf) y testigo (BT), respectivamente y Nf a la dosis de N aplicada con el residuo de feedlot (499 mg maceta<sup>-1</sup>)

**EUNabs** (mg biomasa maceta<sup>-1</sup>/mg N absorbido maceta<sup>-1</sup>) = BT/N abs

Donde,

BT representa a la biomasa aérea total producida (hoja+tallo) y N abs, al N total absorbido.

**Agua regada total acumulada (ml) (A):** Sumatoria total del agua administrada en todas las ocasiones de riego (Tsadilas y Argyropoulos, 2006).

**Productividad del agua de riego (PA):** Describe la relación cuantitativa entre el crecimiento de la planta y el consumo de agua. Se estimó según la siguiente ecuación de cálculo (Ec.4) en base a la fórmula adaptada de Dardanelli *et al.* (2003):

**PA=BT/A** (mg biomasa aérea total maceta<sup>-1</sup>/ml agua regada maceta<sup>-1</sup>)

Donde,

BT representa a la biomasa aérea total producida, y A al volumen de agua regada en cada unidad experimental.

## Análisis estadístico

Los efectos de los tratamientos se analizaron a través del ANOVA ( $p < 0,05$ ) de un factor (tipo de enmienda) con 4 niveles: zeolitas (Z), residuo de feedlot (F), enmienda órgano-zeolítica (FZ) y testigo (T) (sin enmienda). Las comparaciones entre las medias de los tratamientos se establecieron por test LSD ( $p < 0,05$ ) utilizando el software Statistix (versión 9.0).

## RESULTADOS

### Biomasa de maíz y eficiencias en el uso del N del residuo de feedlot y N absorbido (EUNf y EUNabs)

Los resultados obtenidos analizados en conjunto mostraron que la aplicación de tanto la enmienda órgano-zeolítica (FZ) como del feedlot (F), resultó en aumentos en la biomasa tanto de hoja como de tallo, la absorción del nitrógeno y la productividad del agua en comparación con el testigo. Sin embargo, los aumentos fueron más altos con la aplicación de FZ con respecto a F. La aplicación de zeolita (Z) en forma aislada, por su parte, no tuvo un efecto sobre estas variables.

Los valores de BT variaron entre 7,8 y 19,9 g maceta<sup>-1</sup>, siendo su promedio general 12,5 g maceta<sup>-1</sup>. Los tratamientos F y FZ promovieron aumentos en la BT de 78 y 120 %, respectivamente, evidenciando un efecto conjunto de F y Z sobre la biomasa del maíz. La BTa aumentó un 57 % en respuesta al residuo de feedlot, observándose un incremento mayor cuando éste se aplicó en conjunto con la zeolita (98% respecto del testigo). Asimismo, la BH aumentó un 29 % por el tratamiento con F, y un 69 % cuando se aplicaron juntos (FZ). Si bien la BTa se incrementó en mayor proporción que la de hoja, la relación BH/BTa no fue afectada por los tratamientos aplicados. Cuadro 5.

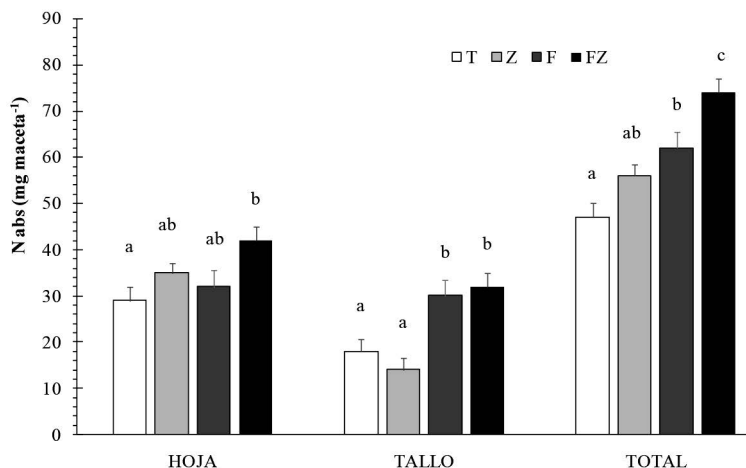
Los valores de N absorbido total variaron entre 40 y 96 mg de N maceta<sup>-1</sup>, con un pro-

**Cuadro 5.** Efectos de los diferentes tratamientos, testigo (T), zeolita (Z), residuos de feedlot (F) y enmienda órgano zeolítica (FZ) sobre la biomasa (g maceta<sup>-1</sup>) total (BT), en hoja (BH) y en tallo (BTa), y sobre la alocaión de biomasa (BH/Bta) estimados al final del ensayo. Se muestran las medias (n=4) para cada variable. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para las variables (LSD;  $p < 0,05$ )

| Tratamiento | BT<br>(g maceta <sup>-1</sup> ) | BTa<br>(g maceta <sup>-1</sup> ) | BH<br>(g maceta <sup>-1</sup> ) | BH/BTa |
|-------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------|
| T           | 8,73 a                          | 5,01 a                           | 3,72 a                          | 0,74 a |
| Z           | 10,15 ab                        | 6,06 ab                          | 4,09 ab                         | 0,67 a |
| F           | 13,70 b                         | 8,90 b                           | 4,80 b                          | 0,54 a |
| FZ          | 17,30 c                         | 11,00 c                          | 6,30 c                          | 0,57 a |
| Valor $p$   | 0,0012                          | 0,001                            | 0,0043                          | 0,05   |

medio general de 62,6 mg de N maceta<sup>-1</sup>. Las enmiendas de F y FZ determinaron aumentos en el Nabs en comparación con el testigo, sin embargo, el tratamiento FZ resultó en mayores incrementos que el F (59,6 % vs. 29,7 %); mientras que el Z no produjo cambios significativos en esa variable (Figura 1). Los valores de concentración de N en hoja fueron 0,76 %; 0,69%; 0,66% y 0,67% para los tratamientos T, Z, F y FZ, respectivamente, resultando superiores a los correspondientes al tallo: 0,37 %; 0,34%; 0,33% y 0,30 % para T, Z, F y FZ, respectivamente.

El Nabs en hoja aumentó significativamente en el tratamiento FZ (45 % comparado con el T); mientras que en tallo el incremento fue similar tanto en F como en FZ (1,7 y 1,8 veces en comparación con T; respectivamente) (Figura 1). La EUNf resultó incrementada en un 70 % con la incorporación de zeolita en la formulación conjunta (FZ) con respecto a F; mientras que la EUNabs aumentó en forma similar (40 %) en el tratamiento F y en el FZ respecto de los que no recibieron residuo de feedlot (T y Z) (Cuadro 6).



**Figura 1.** Efecto de los diferentes tratamientos, testigo (T), zeolita (Z), residuos de feedlot (F) y órgano-zeolítica (FZ) sobre la absorción de N (Nabs) (mg maceta<sup>-1</sup>) en los distintos componentes de la biomasa (tallo, hoja y total) en plantas de maíz. Se muestran las medias (n=4) del Nabs con su respectivo desvío estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada componente de la biomasa (LSD,  $p < 0,05$ ).



**Cuadro 6.** Efecto de los tratamientos, testigo (T), zeolita (Z), residuos de feedlot (F) y órgano-zeolítica (FZ) sobre la eficiencia de uso del N absorbido (EUNabs); y efecto de F y de FZ sobre la eficiencia de uso del N del residuo de feedlot (EUNf) en plantas de maíz. Se muestran las medias ( $n=4$ ) de cada variable. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variable medida ( $p<0,05$ ).

| Tratamiento | EUNabs<br>(mg biomasa maceta <sup>-1</sup> /<br>mg N absorbido maceta <sup>-1</sup> ) | EUNf<br>(mg biomasa maceta <sup>-1</sup> / mg de N de residuo<br>de feedlot maceta <sup>-1</sup> ) |
|-------------|---|--|
| T           | 185,7 a   |  |
| Z           | 181,2 a   |  |
| F           | 224,6 bc  | 10,18 a  |
| FZ          | 230,6 c   | 17,56 b  |

### CIC, amonio y nitratos residuales

Los niveles de CIC medidos en el suelo al final del experimento aumentaron significativamente con el agregado de FZ (Cuadro 7).

Ambos tratamientos con residuo de feedlot (F y FZ) mostraron una retención amoniacal mucho más baja (alrededor de 2,4 veces) que el resto de los tratamientos, aún habiendo partido de valores mayores de amonio que T y Z (2,7 veces más altos). Los valores iniciales de N-amoniaco de F y FZ fueron superiores a T y Z, sin embargo, al final del experimento, los valores de N-amonio en suelo en los tratamientos de feedlot fueron significativamente menores que los de T y Z, evidenciando la absorción de N realizada por el cultivo. Estos resultados demuestran que no se produjeron excedentes al final del experimento, aunque en el tratamiento FZ se observó un incremento significativo en la CIC.

### Productividad del agua

En el Cuadro 8 se presentan los valores de volúmenes de riego aplicados para cada tra-

tamiento y la correspondiente productividad del agua (PA).

**Cuadro 8.** Efecto de los tratamientos, testigo (T), zeolita (Z), residuos de feedlot (F) y órgano-zeolítica (FZ) sobre el agua total acumulada (ml maceta<sup>-1</sup>) y la productividad del agua de riego (PA) (mg ml<sup>-1</sup>). Se muestran las medias ( $n=4$ ) de cada variable. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada variable (LSD;  $p<0,05$ ).

| Tratamientos | Agua total acumulada<br>(ml maceta <sup>-1</sup> ) | PA(mg ml <sup>-1</sup> ) |
|--------------|--|--------------------------|
| T            | 3880 a   | 2,25 a                   |
| Z            | 4103 ab  | 2,47 a                   |
| F            | 4717 b   | 2,90 ab                  |
| FZ           | 4977 b   | 3,47 b                   |

La aplicación de Z no produjo cambios en PA, y el tratamiento F sólo promovió aumentos marginalmente significativos (Cuadro 8); mientras que la enmienda órgano-zeolítica (FZ) resultó en un incremento significativamente superior al testigo (30%) en esta variable, el que se correspondió con la mayor producción de biomasa de las plantas a las que se les aplicó dicho tratamiento.

**Cuadro 7.** Efecto de los tratamientos, testigo (T), zeolita (Z), residuos de feedlot (F) y órgano-zeolítica (FZ) sobre la concentración final de nitratos ( $N-NO_3^-$ ) (mg maceta<sup>-1</sup>); el N amoniacal ( $N-NH_4^+$ ) inicial (i) y final (f); la retención de N amoniacal y la CIC (Capacidad de intercambio catiónico) (Cmolc kg<sup>-1</sup>) del suelo. Se muestran las medias ( $n=4$ ) de cada variable. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD;  $p<0,05$ ) para las variables medidas.

| Tratamiento | $N-NO_3^-$ <sub>f</sub><br>(mg maceta <sup>-1</sup> ) | $N-NH_4^+$ inicial<br>(mg maceta <sup>-1</sup> ) | $N-NH_4^+$ final<br>(mg maceta <sup>-1</sup> ) | Retención de N amoniacal<br>( $N-NH_4^+$ <sub>f</sub> - $N-NH_4^+$ <sub>i</sub> )<br>$N-NH_4^+$ <sub>i</sub> | CIC<br>(Cmolc kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------|---|--|--|--|----------------------------------|
| T           | 152,45 b  | 9,9 a  | 6,4 a  | -0,35 a  | 5,6 a                            |
| Z           | 112,21 ab   | 9,9 a  | 6,5 a  | -0,34 a  | 6,1 ab                           |
| F           | 154,56 b  | 26,3 b   | 3,4 b  | -0,87 b  | 5,7 a                            |
| FZ          | 64,26 a   | 26,3 b   | 3,9 b  | -0,85 b  | 6,7 b                            |

## DISCUSIÓN

Los resultados evaluados globalmente mostraron efectos mejoradores interactivos entre el feedlot y las zeolitas de la enmienda órgano-zeolítica (FZ) sobre el crecimiento (biomasa de hoja y de tallo), y sobre el aprovechamiento del nitrógeno y del agua del maíz. La biomasa total del maíz tuvo un 42% más de aumento en la aplicación conjunta (FZ) en comparación con la aplicación de la enmienda de feedlot con respecto al testigo, coincidentemente con lo observado por Rodríguez y Gatti (2010) en experimentos a campo donde la zeolita se aplicó en formulación conjunta con 8 Mg ha<sup>-1</sup> de residuo de feedlot. Resultados similares fueron reportados por Torres Duggan (2017) en un experimento realizado en macetas en el que se cultivó raigrás perenne (*Lolium perenne* L.) en suelo extraído de la capa superficial de un Hapludol éntico, observándose aumentos de entre 61 y 150% en la producción de biomasa asociados a dosis de 10 y 20 Mg ha<sup>-1</sup> de residuo de feedlot, respectivamente. Tanto la BH como la BTa se vieron incrementadas por la aplicación conjunta de feedlot y zeolitas, aunque la biomasa de tallo aumentó más que la de hoja. No obstante ello, la relación hoja: tallo no varió entre tratamientos.

El efecto del residuo de feedlot sobre la biomasa de maíz puede explicarse por un aumento en la disponibilidad de N derivado de la mineralización de su N orgánico, el que se vio reflejado en el incremento de los valores de N absorbido en los tratamientos que contenían a este residuo. Sin embargo, la absorción de N fue mayor en la enmienda órgano-zeolítica (FZ) que en F (75 vs. 61 mg N maceta<sup>-1</sup>, respectivamente). En todos los tratamientos, se observó un mayor contenido de N absorbido en la hoja que en los tallos, coincidiendo con los patrones obtenidos por Rabai *et al.* (2013). El incremento en los niveles de N absorbido observado en el presente experimento, fue consistente con el aumento en la biomasa del maíz, ya que la concentración de

N en la materia seca se mantuvo dentro de valores muy similares para todos los tratamientos (0,4-0,7 %), sin producirse dilución del N. Los valores de N absorbido obtenidos en este estudio podrían ser algo superiores a los que pudieran observarse a campo con la misma dosis, especialmente en planteos bajo siembra directa, en virtud del mayor contacto de la enmienda con el suelo que se logra en las macetas.

El efecto mejorador de la aplicación conjunta sobre la biomasa de maíz no es atribuible al rol de la zeolita en la disponibilidad de agua para la planta como lo demuestran los valores de PA, los cuales no se diferenciaron del T cuando se aplica el mineral sólo, sino que podría vincularse a la mejora en la dinámica del N proveniente del feedlot. Asimismo, los valores de EUNabs fueron similares en FZ y F, mostrando que en ambos tratamientos fue similar la conversión del N absorbido en biomasa. Sin embargo, el EUNf fue un 72% más alto en FZ con respecto a F. Trabajos previos también informaron mejoras del 50% en la eficiencia en el uso de N en experimentos con raigrás perenne conducidos en condiciones similares a este estudio (suelo tratado con zeolitas y residuos de feedlot) (Torres Duggan y Rodríguez, 2018). La mejora en la eficiencia de uso del N proveniente del residuo de feedlot observada en el tratamiento FZ, podría atribuirse a las menores pérdidas de este nutriente debido al intercambio, durante el experimento, de amonio en la matriz del suelo tratado con zeolitas, en correspondencia con los incrementos significativos en el nivel de CIC. De hecho, cuando la zeolita se aplicó combinada con el residuo de feedlot, la CIC del suelo aumentó un 20 % sobre T o F ( $p=0,05$ ). Sin embargo, dicho incremento no estaría acompañado por los valores de amonio en suelo medidos al final de experimento, los que resultaron 50 % inferiores al testigo y al tratamiento Z ( $p=0,05$ ), a causa de la absorción de N por el cultivo. También Tsadilas y Argyropoulos (2006) detectaron aumentos de 15 y 40 % en la CIC asociados al agregado

de 6 y 60 Mg ha<sup>-1</sup> (0,6 y 6 % p/p) de zeolita, respectivamente. En el presente experimento, las dosis de zeolitas fueron del 5 % (p/p) aunque los efectos observados resultaron muy pequeños. Aparentemente, las zeolitas habrían retenido el amonio proveniente de la mineralización del N orgánico del residuo de feedlot, actuando como un fertilizante de liberación lenta que fue cediendo el N al cultivo mientras los niveles de amonio intercambiado van disminuyendo (Ramesh y Reddy, 2011; De Campos Bernardi *et al.*, 2013). Los resultados de este estudio coinciden con Tarkalson e Ippolito (2011) quienes observaron que, aunque el agregado de zeolitas en un suelo franco limoso condujo a aumentos en el corto plazo en las concentraciones de amonio en el suelo, éstas se redujeron drásticamente luego de 30 días debido a una liberación y nitrificación del mismo, atribuyendo este efecto a un aumento en la CIC y la posterior adsorción de amonio en la matriz mineral de la zeolita. La disminución de los valores de amonio durante este estudio y las bajas concentraciones medidas al final del mismo son consistentes con las condiciones estivales que habrían promovido el proceso de mineralización del amonio liberado del complejo de cambio con el posterior pasaje a nitratos que fueron absorbidos por el maíz. Coincidentemente, Leggo (2000) demostró que en sustratos órgano-zeolíticos la pérdida de amonio es rápida, particularmente en las dos primeras semanas de crecimiento de la planta, probablemente debido a reacciones que implican tanto intercambio iónico como procesos bacterianos. En esta investigación, la concentración de N-nitratos finales fue similar o menor a la del testigo en todos los tratamientos, evidenciando que la aplicación de F no generó excedentes de nitratos residuales en el suelo como se postuló en la hipótesis b).

La PA mejoró significativamente respecto a la del testigo por la aplicación conjunta de Z y F. Así, se evidencia un uso más eficiente del agua aplicada ya que, a iguales volúmenes de riego aplicado, el tratamiento FZ ab-

sorbió más N y produjo más biomasa. Sin embargo, esta variable no fue afectada significativamente por las zeolitas, ni por los residuos de feedlot aplicados solos. La condición de humedad (capacidad de campo) pudo haber limitado el efecto de las zeolitas sobre la PA como lo evidencian Wehtje *et al.* (2003) quienes observaron que las mejoras en la retención de agua promovidas por las zeolitas, sólo fueron observadas en condiciones de estrés hídrico, en correspondencia con el aumento de la biomasa de la grama común (*Cynodon dactylon* L. Pers.) bajo restricciones de humedad. Similar tendencia fue informada por Gholamhoseini *et al.* (2012) en estudios realizados con canola creciendo en suelos arenosos y Sepakhah y Barzegar (2010) en arroz cultivado en ambiente semiárido. Otros estudios (Wiedenfled, 2003) mostraron que la aplicación de enmiendas a base de zeolitas bajo condiciones de capacidad de campo no condujo a mejoras en la capacidad de retención de agua por los suelos, ni tampoco en el rendimiento de cultivos hortícolas respecto del control sin zeolitas. Asimismo, en un estudio que evaluó el crecimiento del raigrás perenne (*Lolium perenne*, L.) bajo diferentes regímenes de humedad (sequía y disponibilidad hídrica no limitante), Torres Duggan (2017) observó un efecto significativo de la Z sobre la conservación del agua, específicamente un menor requerimiento de riego, y sobre la eficiencia de uso del N que no fueron detectados cuando el cultivo se mantuvo sin restricción hídrica.

## CONCLUSIONES

La aplicación conjunta de zeolita y residuos de feedlot mejoró la producción de biomasa tanto en hoja como en tallo, y el aprovechamiento de N y agua por parte del maíz, debido al aporte de N del residuo de feedlot y al rol de las zeolitas tanto en la dinámica del N como en la eficiencia del uso del agua. Las zeolitas habrían actuado como fertilizantes de liberación lenta, reteniendo el amonio pro-

veniente del residuo de feedlot y liberándolo al suelo para ser absorbido por el maíz durante el ciclo, lo que habría evitado excedentes del balance de N. A pesar de la baja retención de agua propia del suelo utilizado en el experimento, la productividad del agua no fue afectada por las zeolitas aplicadas solas en virtud de las condiciones de humedad no limitantes del ensayo.

Por otra parte, cabe destacar la evidente ventaja económica de aplicar estas enmiendas respecto de una dosis equivalente de fertilizante nitrogenado (urea). La aplicación de enmiendas de feedlot aporta MO que, además de mejorar el nivel de fertilidad nitrogenada, promueve mejoras en la aptitud física del suelo (no medida en este estudio), y constituye una solución sustentable a la problemática de la disposición final de un pasivo ambiental como es el residuo de feedlot.

Los resultados obtenidos permitieron demostrar que los residuos orgánicos de origen

animal y los minerales disponibles localmente constituyen una herramienta valiosa para mejorar la disponibilidad y la eficiencia de uso de los nutrientes y del agua y, consecuentemente, la productividad de los cultivos. Quedan planteados interrogantes para futuras investigaciones referidos a las condiciones en las cuales se evidencia el efecto de las zeolitas sobre la dinámica del agua en ambientes arenosos donde la retención de humedad es limitante. La amplia disponibilidad de ambos recursos (residuos de feedlot y zeolitas) en la Argentina, convierte a la enmienda órgano-zeolítica en una alternativa sustentable para mejorar la fertilidad de suelos con limitaciones.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por la Universidad de Buenos Aires (UBACYT 20020120100172BA Programación 2014-2017).

## BIBLIOGRAFIA

- Agosto, M. E., Canafoglia, R., de Barrio, R., Cabello, C., Schalamuk, I., Minelli, G. y Botto, I. L. (2005). Depósitos tobáceos terciarios zeolitizados del área de Paganzo (provincia de La Rioja). Su potencialidad tecnológica. *Actas del XVI Congreso Geológico Argentino*. La Plata. En CD.
- Barraco, M., Díaz Zorita, M., Brambilla, C., Álvarez, C. y Scianca, C. (2009). Respuesta del trigo a la fertilización nitrogenada y nitro-azufrada en suelos arenosos. *Ciencia del Suelo*, 27 (2), 217-224.
- Bigelow, C. A., Bowman, D. C. and Cassel, D. K. (2001). Nitrogen leaching in san-based root zones amended within organic soil amendments and sphagnum peat. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126 (1), 151-156.
- Bolton, A., Studdert, G.A. y Echeverría, H.E. (2004). Utilización de estiércol de animales en confinamiento como fuente de recursos para la agricultura. *Revista Argentina de Producción Animal*, 24 (1-2), 53-73.
- Carrizo, R., Donnari, E., Marcos, O. y Prieri, A. (2006). Potencial geológico-minero de ceolitas sedimentarias en el distrito Paganzo. La Rioja. República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. SEGEMAR. *Serie contribuciones técnicas N°29*. 28 p.
- Caviglia, O. P. and Andrade, F. H. (2010). Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*, 3, 1-8.
- Ciampitti, I. A. and Vyn, T. (2012). Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research*, 133, 48-67.
- Civeira, G. y Rodríguez, M. B. (2011). N residual y lixiviado del fertilizante en el sistema suelo-planta-zeolitas. *Ciencia del Suelo*, 29(2), 285-294.
- Chester, W.A. and Derouane, E. G. (2009). Zeolite characterization and catalysis. Switzerland: Editorial Springer.
- Dardanelli, J., Collino, D., Otegui, M. E y Sadras, V. O. (2003). Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. (330-386), Buenos Aires, Argentina: Editorial Facultad de Agronomía.

- De Campos Bernardi, A. C., Anchoa Oliviera, P., de Melo Monte, M. B. and Souza-Barros, F. (2013). Brazilian sedimentary zeolite use in agriculture. *Microporous and Mesoporous Materials*, 167,16-21.
- Durán, Morrás H., Studdert, G. and Xiaobing, L. (2011). Distribution, properties, land use and management of Mollisols in South America. *Chinese Geographical Science*, 21(5): 511-530.
- Ferreira, D. R. and Schulthess, C.P. (2011). The nanopore innersphere enhancement effect on cation adsorption: sodium, potassium and calcium. *Soil Science Society of America Journal*, 75 (2),389-396.
- Gholamhoseini, M., Agha Alikhani, M., Dolatabadian, A., Khodaei-Joghan, A. and Zakikhani, H. (2012). Decreasing nitrogen leaching and increasing canola forage yield in a sandy soil by application of natural zeolite. *Agronomy Journal*, 104 (5),1467-1475.
- Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Khodaei-Joghan, A., Dolatabadian, A., Zakikhani, H. and Farmanbar, E. (2013). Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching. *Soil and Tillage Research*, 126, 193-202.
- Githinji, L. J. M. and Dane, J. H. (2011). Physical and hydraulic properties of inorganic amendments and modeling their effects on water movement in sand-based root zones. *Irrigation Science*, 29, 65-77.
- Gottardi, G. and Galli, E. (1985). Natural zeolites. Berlin, Germany: Editorial Springer.
- He, Z., Calvert, D. V., Alva, A. K., Li, Y.C. and Banks, D. J. (2002). Clinoptilolite zeolite and cellulose amendments to reduce ammonia volatilization in a calcareous sandy soil. *Plant and soil*, 247(2), 253-260.
- Herrero, M. A. y Gil, S. B. (2008). Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Ecología Austral*, 18, 273-289.
- Herrero, M. A. 2014. Manejo y tratamiento de estiércol y purines. En Herrero, M. A., Gil, S. B., Rebuelto, M. y Sardi, G. M. I. (Eds), *La producción animal y el ambiente* (pp 97-126). Argentina: Editorial Bmpress,
- Herrmann, C. y Torres Duggan, M. (2016). Fertilizantes y enmiendas de origen mineral en la Argentina: caracterización y uso en la Argentina. En: Pereyra, F. X. y Torres Duggan, M. (Eds). *Suelos y Geología Argentina* (329-355). Buenos Aires, Argentina: Coedición de la Asociación Geológica Argentina y Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Ippolito, J. A., Tarkalson, D. D. and Lehrsch, G. A. (2011). Zeolite soil application method affects inorganic Nitrogen, moisture and corn growth. *Soil Science*, 176 (3), 136-142.
- Lavado, R. S., Rodríguez, M. B., Alvarez, R., Taboada, M. A. and Zubillaga, M. S. (2007). Transfer of potentially toxic elements from biosolid-treated soils to maize and wheat crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 312-318.
- Leggo, P. (2000). An investigation of plant growth in an organo-zeolitic substrate and its ecological significance. *Plant and Soil*, 219, 135-146.
- Marban, L. (2005). Métodos de extracción y determinación de nitratos en suelos. Parte (II). En L. Marbán, y S. Ratto(Eds). *Tecnologías en análisis de suelos (Capítulo V)*,(131-138). Buenos Aires, Argentina: Editorial Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS).
- Page, A. L., Miller, R. H. and Keeney, D. R. (Eds).(1982). *Methods of soil analysis. Part 2. No. 9, Agronomy series*. Madison, USA: Editorial ASA-SSSA.
- Panigatti, J. L. 2014. Clasificación de suelos y su relación con la fertilidad. En: Echeverría, H. E. y García, F.O. (Eds). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Capítulo 2.2da edición*. (904 p). Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA
- Pegoraro, V. R., Boccolini, M., Aimetta, M. B., Baigorria, T. y Cazorla, C. R. (2014). Influencia de la aplicación de efluente porcino sobre propiedades químicas y biológicas de un Argiudol típico (Córdoba, Argentina). *Ciencia del Suelo*, 32 (2), 283-289.
- Polat, E. M., Karaca, H., Demir, A. and Onus, N. (2004). Use of natural Zeolite (Clinoptilolite) in Agriculture. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 12, 183-188.
- Pordomingo, A. J. 2003. *Gestión ambiental en el feedlot. Guía de buenas prácticas*. La Pampa, Argentina: Editorial INTA Anguil.
- Pordomingo, A. J. 2010. Captura, contención y manejo de efluentes y estiércol (Capítulo 3). En: Suárez, M. (Ed). *Suplementación y engorde a corral de vacunos*, 70-74.

- Rabai, K. A., Osumanu, H., Ahmed, A. and Susilawati, K. (2013). Use of formulated nitrogen, phosphorus, and potassium compound fertilizer using clinoptilolite zeolite in maize (*Zeamays L.*) cultivation. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 25 (9), 713-722.
- Ramesh, K. and Reddy, D. (2011). Zeolites and their potential uses in agriculture. *Advances in Agronomy*, 113, 219-241.
- Richter, M., Conti, M. y Maccarini, G. (1982). Mejoras en la determinación de cationes intercambiables y capacidad de intercambio catiónico en los suelos. *Revista Facultad de Agronomía*, 3 (2), 145-155.
- Rodríguez, I., Crespo, G., Rodríguez, M. y Aguilar, M. 1994. Efecto de diferentes proporciones de excreta-zeolita en el rendimiento y composición química de *Panicum máximum* vc. *Likoni*. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 28, 113-117.
- Rodríguez, M. B. and Lavado, R.S. (2004). Uptake and distribution of trace elements by soybean from a degraded soil treated with biosolids. *Agrochimica*, Vol XLVIII (3-4), 89-98.
- Rodríguez, M. B. y Gatti, J. P. (2010). Zeolitas como mejoradoras de la respuesta de la soja a los residuos de feedlot. *XXI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo*. Rosario, Argentina, En CD.
- Rodríguez, M. B. y Torres Duggan, M. (2015). Caracterización de los fertilizantes, enmiendas, abonos y su calidad agronómica. En: Álvarez, R. (Ed). *Fertilidad de suelos y fertilización en la Región Pampeana* (369-400). Buenos Aires Argentina: Editorial Facultad de Agronomía.
- SEGEMAR-UNSAM. 2006. Diatomita, Perlita, Ceolita. Publicación técnica N°13. 143 p.
- Sepaskhah, A. R. and Barzegar, M. (2010). Yield, water and nitrogen-use response of rice to zeolite and nitrogen fertilization in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 98, 38-44.
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. A., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T. and Sumner, M. E. (Eds.). 1996. *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*. Madison, Wisconsin, USA:Ed. ASA.
- Statistix for Windows. Versión 2.0. 1998.
- Tarkalson, D. D. and Ippolito, J. A. (2010). Clinoptilolite zeolite influence on inorganic Nitrogen in silt loam and sandy agricultural soils. *Soil Science*, 175 (7), 357-362.
- Tarkalson, D.D. and Ippolito, J. A. (2011). Clinoptilolite zeolite influence on nitrogen in a manure amended Sandy agricultural soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42, 2370-2378.
- Torres Duggan, M. (2017). Productividad forrajera en ambientes ganaderos mejorados con la aplicación de residuos de feedlot, roca fosfática y zeolita natural. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Veterinarias. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- Torres Duggan, M. and Rodríguez, M. B. (2018). Zeolite use for a sustainable agriculture in Argentina: what we know and what we do not know yet? *21 World Congress of Soil Science*. 12-17 de Agosto de 2018. Río de Janeiro, Brasil.
- Tsadilas, C. and Argyropoulos, G. (2006). Effect of clinoptilolite addition to soil on wheat yield and nitrogen uptake. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37, 2691-2699.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2000). Profile of the Agricultural Livestock Production Industry. USA: Editor Government Institutes.
- Walkley, A. J. and Black, I. A. (1934). Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Wehtje, G. R., Shaw, J., Walker, R. H. and Williams, W. (2003). Bermudagrass Growth in Soil Supplemented with Inorganic Amendments. *HortScience*, 38 (4), 613-617.
- Wiedenfeld, F. (2003). Zeolite as a Soil Amendment for Vegetable Production in the Lower Rio Grande Valley. *Subtropical Plant Science*, 55, 7-10.