

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES



TRABAJO FINAL DE CARRERA

Efecto de corrección de la acidificación provocada por la
utilización de fertilizantes nitrogenados mediante la utilización
de dosis equivalentes de fertilizantes cálcico/magnésicos

Alumnos:

- BESTILLEIRO HERNAN AGUSTÍN
- GUSMEROTTI LUCAS ALBERTO

Director: Dra. MABEL VÁZQUEZ

Coordinador de tareas de campo: Ing. Agr. DANIEL FERRO

Modalidad: Trabajo de investigación

Fecha de entrega: 15/09/2017

RESUMEN

La acidificación de los suelos responde a distintas causas, las cuales pueden ser naturales o antrópicas. En el ámbito templado, como principal causa se puede mencionar el lavado de bases y su exportación por parte de los cultivos, los cuales dejan los suelos desprovistos de cationes como calcio y magnesio, conjuntamente con la fertilización nitrogenada frecuente. Para corregir esta problemática se utilizan enmiendas o correctores básicos como calizas, dolomitas, fertilizantes cálcico-magnésicos, entre otros. Sin embargo, dichos productos están sujetos a la deriva durante su aplicación y son de difícil solubilización. En este trabajo se plantea como alternativa el uso de fertilizantes cálcico-magnésicos en dosis que neutralicen la acidez equivalente a la generada por los fertilizantes nitrogenados. Los objetivos fueron analizar la eficiencia de esta práctica alternativa evaluando el impacto de la fertilización cálcico-magnésica sobre la acidez y el complejo de cambio edáfico. El ensayo se realizó en microparcels de 2 m². Las dosis de fertilizantes aplicadas fueron 0, 50 y 100 kg ha⁻¹ de urea, conjuntamente con CaSO₄·2H₂O y MgSO₄·7H₂O combinados en sus respectivas dosis de neutralización. Las mismas se calcularon en base a los equivalentes de H⁺ generados por la hidrólisis de la urea en el suelo. Se determinó potenciométricamente el pH actual y potencial, capacidad de intercambio catiónica (CIC) y cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K) mediante acetato de amonio 1N pH 7. Los resultados arrojaron diferencias significativas solo en el pH actual para el tratamiento de 100 kg ha⁻¹ de urea vs 100 kg ha⁻¹ de urea con su respectiva dosis de neutralización cálcico-magnésica. Sin embargo, la tendencia de los resultados señalaría iguales beneficios para el resto de los tratamientos de neutralización. Esto podría sugerir la conveniencia de la aplicación de fertilizantes cálcico-magnésicos junto con la fertilización nitrogenada como neutralizadores de la acidez para evitar efectos adversos.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, entre el 25 al 30% de los suelos están de alguna manera afectados por problemas de acidez y muchos de ellos se encuentran en las regiones más productivas. (Havlin *et al.*, 2005).

La acidez edáfica puede afectar el crecimiento de las plantas en forma directa (disminución de la producción de granos y forrajes), pero también indirecta, incidiendo negativamente en la disponibilidad de nutrientes (N, P, y Mo), aumentando los niveles de elementos fitotóxicos, modificando la actividad microbiana (reducción de la fijación biológica de N y menor número de organismos transformadores de P y S orgánicos), reduciendo la capacidad de intercambio catiónica y hasta en las condiciones físicas de los suelos (pérdida de estructura edáfica). Este problema es considerado como una de las principales limitantes para la producción agropecuaria a nivel mundial (Azcarate *et al.*, 2012).

En regiones tropicales y subtropicales la problemática se origina en procesos genéticos naturales, los cuales provocan la pérdida de los elementos básicos contenidos en los materiales originales. Esto se debe, en la mayor parte de los casos, a materiales originales alterables de carácter ígneo básico, como por ejemplo el basalto en el Noroeste argentino, y un clima agresivo de alta temperatura y pluviosidad. En esas condiciones, dichos materiales se meteorizaron intensamente y las bases, además de gran parte del silicio, fueron lixiviadas (Zapata Hernandez, 2004). En estos ambientes sólo pueden desarrollarse especies vegetales que se adaptan a estas condiciones por su bajo requerimiento en estos elementos y tolerancia a efectos de toxicidad causados por el Al, Fe, Mn e H, que insaturan el complejo de cambio (Vazquez y Pagani, 2015).

En regiones templadas el proceso de acidificación se genera fundamentalmente por razones antrópicas. Una de las causas de este proceso es la exportación de bases a través de la producción agropecuaria durante largos períodos de tiempo (Gelati y Vázquez, 2004;

Lemenih *et al.*, 2004; Cruzate y Casas, 2004; Vázquez *et al.*, 2000, 2002, 2004; Vázquez, 2007, García y Vázquez, 2012). Esto ocurrió particularmente en regiones donde no ha existido historia de reposición de dichas bases, mediante fertilización o aplicación de enmiendas básicas. Otra de las causas de la acidificación es el aumento de la aplicación de fertilizantes de alto índice de acidez (Estelrich *et al.*, 2012), fundamentalmente los nitrogenados amoniacales o con grupo amida, como la urea, que producen la liberación de H^+ durante su reacción en el suelo. Otros procesos que pueden derivar en la acidificación y lixiviación de bases en el suelo, son la hidrólisis de hierro y aluminio, la oxidación de compuestos de S y N nativos, la secreción de protones por las raíces, la implementación de labranzas reducidas o cero con su posterior acumulación de materia orgánica en superficie (Vázquez y Pagani, 2015), así como también la respiración de microorganismos y raíces.

Durante los últimos veinte años hubo un cambio de paradigma productivo argentino sobretodo en la Región Pampeana. Esto se produjo como consecuencia de la introducción de materiales genéticos de alto potencial de rendimiento y adaptados a diferentes condiciones climáticas, los cuales tienen una alta dependencia de insumos. Este aumento, tanto de la producción como de la frontera agropecuaria, derivó en problemáticas de degradación de los suelos de índole química y física, entre ellos la acidificación (Viglizzo y Jobbágy, 2010; Iturri, 2015; Vázquez y Pagani, 2015). Al respecto, Cruzate y Casas (2004) sostienen que los suelos de la Región Pampeana han sufrido un descenso en los contenidos de Ca y Mg que se manifiesta en una disminución generalizada de pH, el que en algunas zonas, como el norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe, alcanza valores inferiores a 6 en vastas áreas. Asimismo, Vázquez y Rotondaro (2005) informaron que el 68,7 y 75,7% de 2.000 muestras analizadas para las campañas 2000/01 a 2004/05, y cifras comprobables para las campañas 2009/10 en las zonas sur de Santa Fe y norte de Buenos

Aires, respectivamente, manifestaron valores de pH < 5,9, evidenciando la gravedad de la situación para las áreas mencionadas.

Para evitar los efectos adversos provocados por la problemática mencionada en el párrafo precedente y de manera de garantizar la sostenibilidad del sistema productivo, se ha procedido, tradicionalmente, a la utilización de productos correctores o enmiendas básicas (calcita, dolomita, cal viva o apagada, fertilizantes cálcico-magnésicos). Estos productos que contienen Ca y/o Mg en diferentes proporciones, han dado origen a la práctica denominada encalado. Si bien el pH del suelo podría elevarse a través del agregado de otros compuestos, generalmente se emplean los cálcico/magnésicos con el objetivo de reponer estos elementos con funciones nutricionales para los cultivos, así como de estructurantes edáficos en suelos de regiones templadas, ya que mejoran la dinámica del aire y el agua del suelo.

Otra posibilidad de corrección coyuntural en el corto plazo es la utilización de fertilizantes cálcico-magnésicos, la que puede realizarse vía suelo o vía foliar. Su empleo es muy común en actividades intensivas (horticultura y fruticultura), pero no es una práctica habitual en cultivos extensivos, sobretudo en la Región Pampeana, debido a varios motivos. Uno de ellos se debe a las bajas cantidades requeridas por los cultivos en comparación con otros nutrientes como N, P o K. Otro de los motivos se asocia a las elevadas cantidades de Ca y Mg que presentan, en general, los suelos de dicha región, debido a los materiales originales y al moderado grado de meteorización (Sainz Rozas *et al.*, 2014; Vázquez y Pagani, 2015). Se puede mencionar también el escaso conocimiento por parte de los productores de los problemas que generan la gran extracción de estos elementos y su nula reposición; a la vez que los altos costos que provoca el uso de elevadas dosis de los mismos. No obstante el incipiente desarrollo de esta práctica de fertilización, existen en Argentina algunas experiencias en las cuales se evaluó la respuesta de varios cultivos a fertilizaciones con

estos elementos. Gambaudo *et al.* (2007) utilizaron 3 fertilizantes preparados a partir de compuestos minerales naturales, con aproximadamente 21-24% de Ca, y 8-9% de Mg, además de S, Zn y Mn. Estos productos fueron aplicados en un cultivo de soja en 3 situaciones de la zona centro de Santa Fe, con dosis de 100-120 kg ha⁻¹, obteniéndose incrementos de rendimiento de hasta 1000 kg ha⁻¹. Vivas *et al.* (2001) utilizaron un fertilizante granulado con 51 % de CaCO₃ y 37% de MgCO₃, aplicado en dosis de hasta 600 kg ha⁻¹ en maíz en suelos del centro de Santa Fe de pH 5,4 y 5,9 y bajos contenidos de Ca. Los resultados mostraron incrementos del rendimiento cercanos a los 1.000 kg ha⁻¹, con dosis de 400 y 600 kg ha⁻¹, aproximadamente. Asimismo, González *et al.* (2001) probaron el agregado de 100 kg ha⁻¹ de un granulado calcáreo dolomítico con 22% de Ca y 13% de Mg, y 50 kg ha⁻¹ de un granulado de yeso con 22% de Ca y 18% de S, sobre un cultivo de trigo en San Nicolás (Buenos Aires). Los productos fueron aplicados a la siembra y en línea, simultáneamente con una fertilización fosfórica (100 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico y 50 kg ha⁻¹ de urea). Las aplicaciones produjeron ligeros aumentos del rendimiento.

Existe un problema frecuente que condiciona la aplicación de enmiendas calcáreas, la deriva que se produce durante la aplicación. Dada la magnitud de las dosis empleadas, cercanas o superiores a la tn ha⁻¹, es común que se empleen máquinas centrifugas. La mayor parte del mercado de estas enmiendas las comercializa en forma pulverulenta, básicamente para favorecer su solubilización. Esto redundo en importantes derivas de estos polvos, aun en condiciones de baja velocidad del viento, generando pérdidas económicas importantes y otros perjuicios relacionados. Hasta el presente sólo se ha comercializado en Argentina un producto aperdigonado constituido por dolomita pulverizada y aglutinada con linosulfonato de Na. El costo de este producto limitó importantemente su difusión. Terminiello *et al.* (2006) y Vázquez *et al.* (2009, 2012) encontraron que dosis superiores a 1.500 kg ha⁻¹ de caliza/dolomita, si bien producen mejoras en las propiedades químicas,

pueden disminuir la eficiencia de la enmienda, evaluada en producción de grano de soja o materia seca de alfalfa, a causa, probablemente, de aumentos en la resistencia mecánica del suelo, originada por recristalización de los carbonatos de la propia enmienda en el espacio poroso. Esta recristalización obturaría dicho espacio en los suelos de textura fina y por ende con predominio de poros de tamaño pequeño. Estos resultados se asociaron con medidas biológicas (desarrollo de hongos y rendimiento de alfalfa), por lo que en suelos de texturas finas podrían ser desaconsejadas dosis elevadas de los productos encalantes.

Además del mencionado efecto adverso, el encalado podría tener algunas consecuencias secundarias también negativas. El aumento del pH del suelo puede provocar la modificación de la estabilidad de los agregados. En suelos ácidos de ámbitos tropicales el incremento de pH disminuye las cargas positivas variables, principal origen de las cargas de los coloides, y con ellas podría disminuir la estabilidad estructural (Roth y Pavan, 1991). Albuquerque *et al.* (2003) demostraron que si bien ocurre un aumento de la dispersión de arcilla con la dosis de calcáreo en el caso de un suelo del planalto brasileiro, el mayor aporte orgánico originado por el beneficio del encalado, compensa el proceso dispersivo, no alterándose en consecuencia la estabilidad estructural. Como puede verse, el fenómeno es multivariable y es necesario profundizar en estos procesos para diferentes ambientes edafoclimáticos. Otros autores, por el contrario, han puesto en evidencia una mejora en la estabilidad estructural, particularmente en climas templados, haciendo referencia a la formación de puentes cálcicos que favorecen la floculación de los coloides del suelo (Chan y Heenan, 1999).

Ante estas problemáticas cabe la posibilidad del empleo de fertilizantes cálcico-magnésicos. La utilización en cultivos anuales de cosecha con dosis que neutralicen la acidez equivalente generada por la oxidación de fertilizantes amínicos como la urea de amplio uso en el país aplicados en el mismo momento de la fertilización nitrogenada, se

plantea como una alternativa para evitar descensos del pH que puedan ocasionar mermas en los rendimientos.

Hipótesis

La acidificación edáfica producida por fertilizantes nitrogenados amídicos vía suelo, puede ser tratada con fertilización cálcico-magnésica utilizada como acompañante de la fertilización nitrogenada en dosis de neutralización según la cantidad de fertilizantes nitrogenados aplicada.

Objetivos

a) General: analizar la eficiencia de una práctica alternativa en el ámbito de la Región Pampeana para la corrección de la acidez provocada por la fertilización nitrogenada y aumentar la disponibilidad cálcico/magnésica.

b) Específicos

1. evaluar la posibilidad de neutralizar la acidificación producida por la fertilización nitrogenada en un ciclo productivo de una especie forrajera anual.
2. analizar la incidencia de la fertilización cálcico-magnésica en el complejo de cambio edáfico en dosis de compensación de la acidez provocada por la aplicación de diferentes cantidades de urea.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo experimental se llevó a cabo durante el año 2016. El mismo se implantó en la EEA Julio Hirschhorn, en la localidad de Los Hornos (La Plata, Bs. As. 34°59'10" S 57°59'57" O). El tiempo de desarrollo del mismo fue de 10 meses aproximadamente, sobre un suelo Argiudol típico, correspondiente a la serie Centeno (Lanfranco, 1988).

En primera instancia se tomaron muestras compuestas de suelo a 2 profundidades (0-20 y 20-40 cm) de manera de obtener datos iniciales del suelo a ensayar. En el análisis se

determinaron las siguientes variables: pH actual (suelo:agua de 1:2,5) , capacidad de intercambio catiónica (método del acetato de amonio 1N pH7), materia orgánica (MO) (Walkey y Black modificado), N total (Nt) (digestión húmeda y destilación Kjeldhal) y cationes intercambiables: Ca, Mg (quelatometría con EDTA), Na y K (fotometría de llama). Los resultados se presentan en la Tabla N° 1. Todos los análisis se llevaron a cabo mediante protocolos estandarizados por MINAGRI/AACS (SAMPLA, 2004).

Tabla N°1. Resultado del análisis de suelo previo al ensayo. MO: materia orgánica; Nt: N total; CIC: capacidad de intercambio catiónica.

Variable	Unidad	0-20 cm	20-40 cm
pH		5,59	5,55
MO	%	3,86	2,63
Nt	%	0,22	0,16
CIC	cmolc kg ⁻¹	19,53	15,60
Ca	“	9,10	11,10
Mg	“	2,20	2,90
Na	“	0,55	0,55
K	“	1,28	1,11

Con un mes de anterioridad a la fecha de siembra, se realizó una pasada de arado de reja y vertedera y posteriormente una de rastra de discos, con el objetivo de preparar la cama de siembra y controlar malezas.

El ensayo se inició el 22 de marzo de 2016, delimitando las microparcels y disponiendo los distintos tratamientos en el terreno, a la vez que se realizó una fertilización de base con 60 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico. Luego se procedió a la siembra del raigrás anual (*Lolium multiflorum*) al voleo en una densidad de 20 kg ha⁻¹, distribuido en 21 microparcels de 2 m² c/u (2 m x 1 m); dejando 2 metros de separación entre las mismas. También se sembró entre las parcelas de manera de disminuir el efecto bordura. Se utilizó el raigrás anual ya que es una especie que responde a la fertilización nitrogenada, no fija nitrógeno

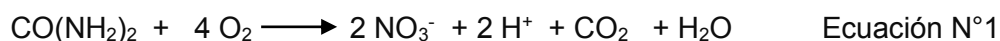
mediante fijación biológica, y porque el sitio experimental cumple con los requerimientos edafoclimáticos propios de la misma.

El ensayo se conformó con 7 tratamientos de 3 repeticiones bajo un diseño de bloques al azar. Dichos tratamientos estuvieron constituidos por distintas dosis de urea (0, 50 y 100 kg ha⁻¹) como fertilizante nitrogenado, yeso agrícola (CaSO₄.2H₂O) y sulfato de magnesio (MgSO₄.7H₂O) combinados como fertilizantes cálcico-magnésicos, en cantidades variables según la dosis de urea utilizada (Tabla N°2).

Tabla N° 2. Dosis de urea y de fertilizantes cálcico-magnésicos empleadas según los diferentes tratamientos. T: testigo; U: urea; C: dosis de fertilizantes cálcico-magnésicos según dosis de urea; 50 y 100: dosis de urea aplicadas en kg ha⁻¹.

N°	Tratamiento	Dosis de urea		Dosis de yeso		Dosis de sulfato de magnesio	
		(kg ha ⁻¹)	(gr parcela ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(gr parcela ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(gr parcela ⁻¹)
1	T	-	-	-	-	-	-
2	T50C	-	-	122,8	24,5	29,3	5,8
3	T100C	-	-	245,7	49,0	58,5	11,7
4	U50	50	10	-	-	-	-
5	U50C	50	10	122,8	24,5	29,3	5,8
6	U100	100	20	-	-	-	-
7	U100C	100	20	245,7	49,0	58,5	11,7

Para obtener las cantidades de yeso y de sulfato de magnesio necesarias para corregir la acidez, se puso énfasis en el comportamiento de la urea en el suelo. Esta última es hidrolizada por la enzima ureasa presente en el mismo, con la consecuente liberación de protones (H⁺) (Ecuación N°1).



Considerando la reacción anterior, se obtuvieron los equivalentes de H⁺ generados por cada mol de urea aplicado, para luego calcular los equivalentes de Ca⁺² y de Mg⁺²

necesarios para neutralizarlos (Tabla N°3). Una vez obtenidos dichos equivalentes de neutralización para cada dosis de urea, se relacionaron con los respectivos pesos equivalentes de los mencionados cationes en los distintos productos, a los fines de obtener la cantidad de yeso y de sulfato de magnesio a aplicar en cada tratamiento (Tabla N°2). Cabe destacar, que para el cálculo de los equivalentes de neutralizantes se mantuvo una relación de Ca/Mg de 6:1, considerada ideal en este tipo de tratamientos (Darwich, 2006).

Tabla N°3. Cantidades de equivalentes generados por cada dosis de urea con sus respectivas cantidades de neutralización. U: urea; 50 y 100: dosis de urea en kg ha⁻¹.

Tratamiento	Equivalentes de acidez generados (H⁺) (eq ha⁻¹)	Equivalentes de Ca⁺² necesarios (eq ha⁻¹)	Equivalentes de Mg⁺² necesarios (eq ha⁻¹)
U50	1666,6	1428,5	238,0
U100	3333,3	2857,1	476,1

Conjuntamente con la siembra se llevó a cabo la primera aplicación al voleo de los fertilizantes correspondientes a cada tratamiento. A principios del mes de mayo se aplicó 2,4-DB según dosis de marbete debido a la presencia de malezas de hoja ancha.

Durante el ciclo de crecimiento del cultivo se efectuaron 4 cortes (14/06; 17/8; 23/9; y 24/11) dejando aproximadamente 5 cm de remanente de área foliar, con el fin de simular una posible utilización del recurso y para evaluar la eventual respuesta del mismo a la mejora de la acidez edáfica. Una vez culminado cada corte se procedió a una refertilización con las dosis correspondientes a cada tratamiento.

A posteriori del ensayo, se tomaron muestras de cada una de las microparcels a las mismas profundidades del muestreo inicial (0-20 y 20-40 cm), extrayendo 5 submuestras por cada microparcels. Las determinaciones analíticas efectuadas fueron las mismas que las realizadas en el muestreo inicial, a las que se añadió pH potencial (suelo: KCl 1 N de 1:2,5) (SAMLA, 2004).

Una vez obtenidos los resultados, estos se analizaron mediante análisis paramétrico de la varianza previa comprobación de supuestos básicos, conjuntamente con comparación múltiple de Tukey ($p < 0.10$) y análisis de regresión y correlación utilizando el programa estadístico InfoStat (2011).

RESULTADOS

En las Figuras N° 1 y 2 se visualizan los resultados del análisis estadístico de pH actual según los distintos tratamientos y profundidades.

Figura N° 1. Resultados del pH actual de 0-20 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).

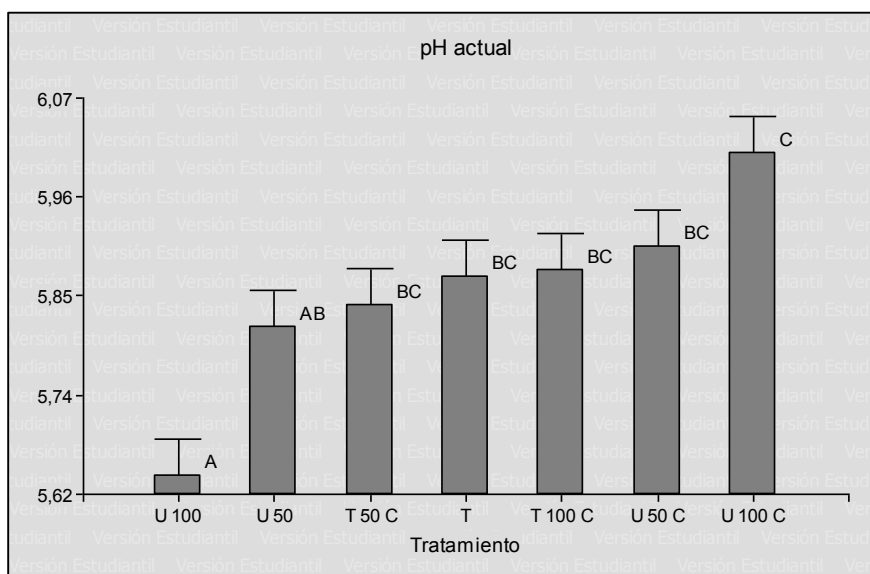
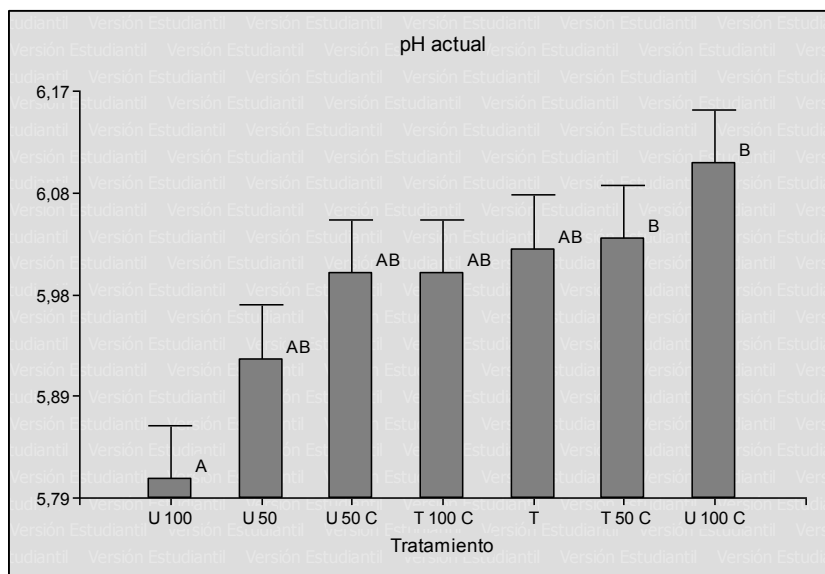


Figura N° 2. Resultados del pH actual de 20-40 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).



Los resultados del pH potencial se resumen en las Figuras N° 3 y 4.

Figura N° 3. Resultados del pH potencial de 0-20 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).

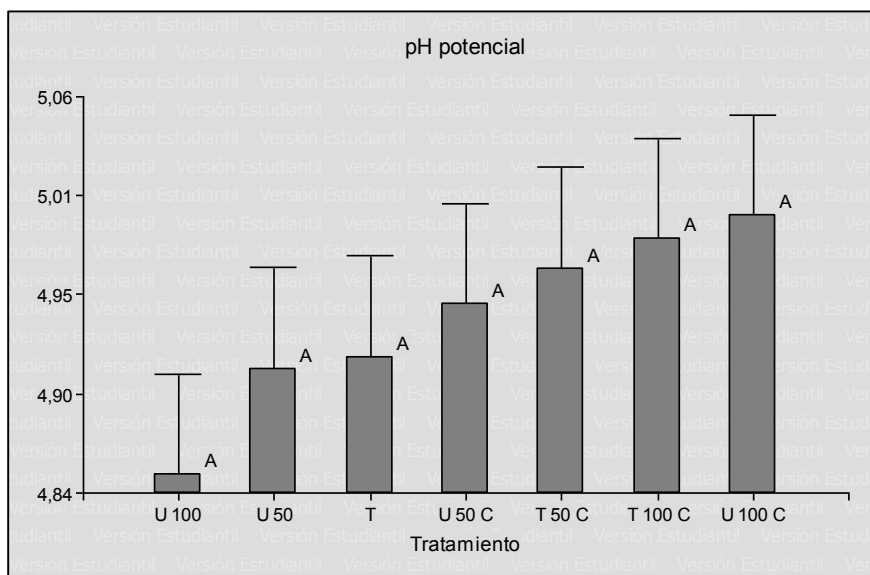
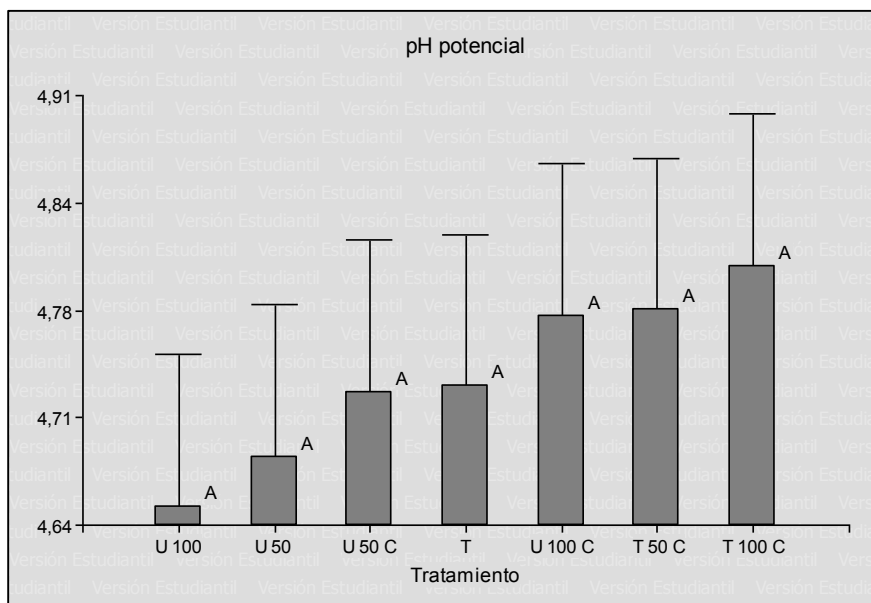


Figura N° 4. Resultados del pH potencial de 20-40 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).



En las siguientes figuras se muestran los resultados y su análisis estadístico de las variables capacidad de intercambio catiónico (Figuras N° 5 y 6) y cationes intercambiables, Ca (Figuras N° 7 y 8), Mg (Figuras N° 9 y 10), Na (Figuras N° 11 y 12) y K (Figuras N° 13 y 14).

Figura N° 5. Resultados de la capacidad de intercambio catiónica de 0-20 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).

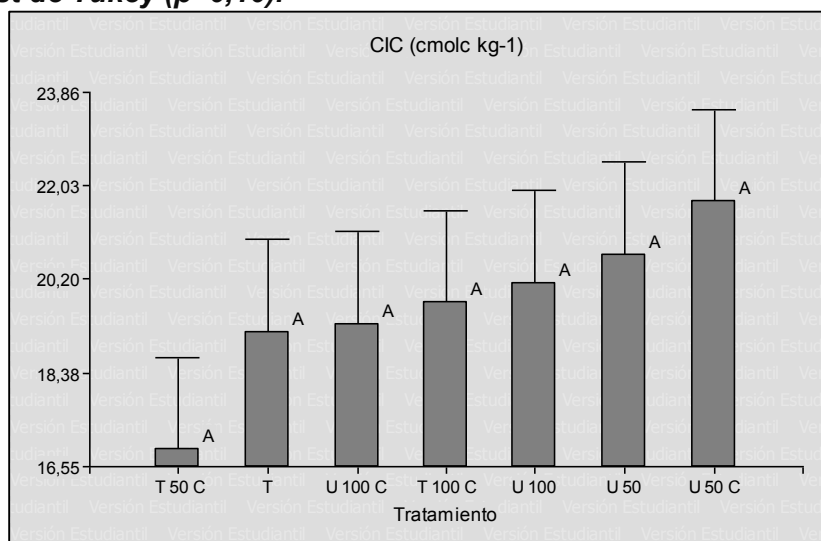


Figura N° 6. Resultados de la capacidad de intercambio catiónica de 20-40 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).

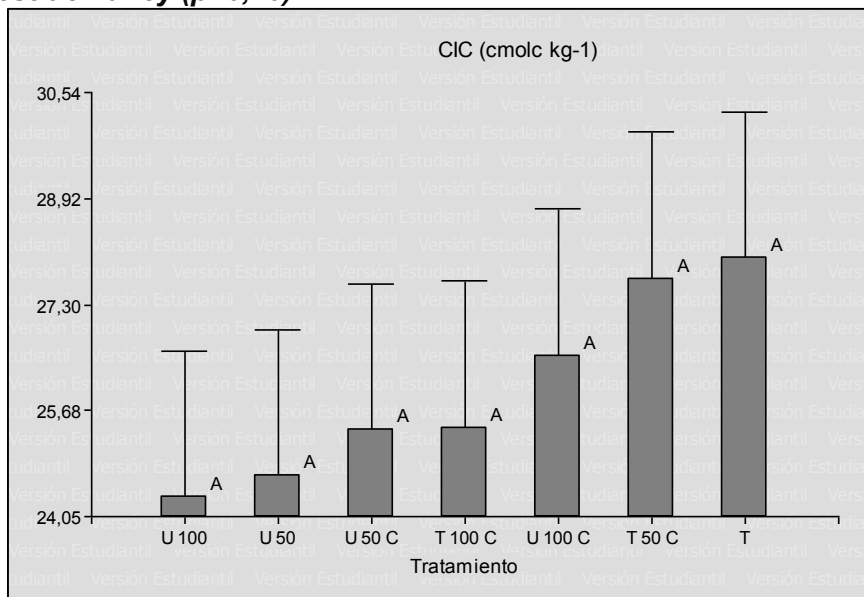


Figura N° 7. Resultados calcio intercambiable de 0-20 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).

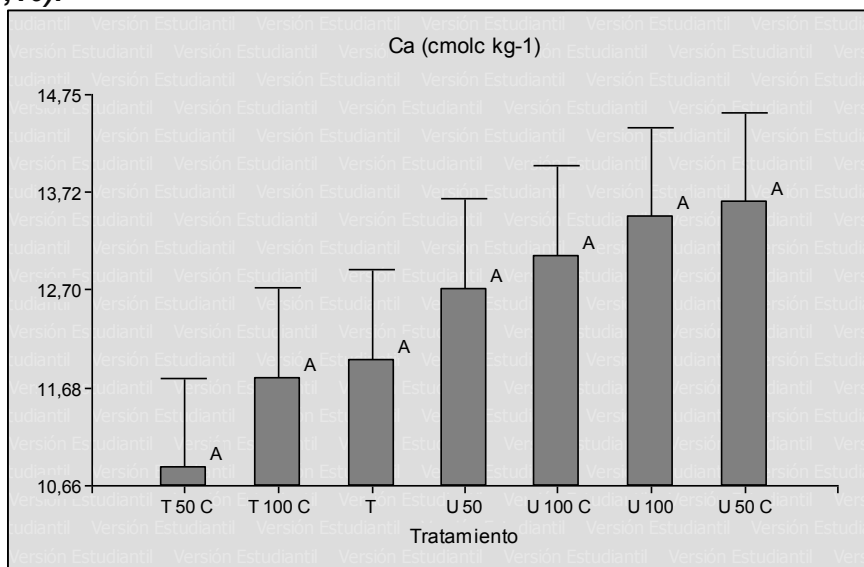


Figura N° 8. Resultados calcio intercambiable de 20-40 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).

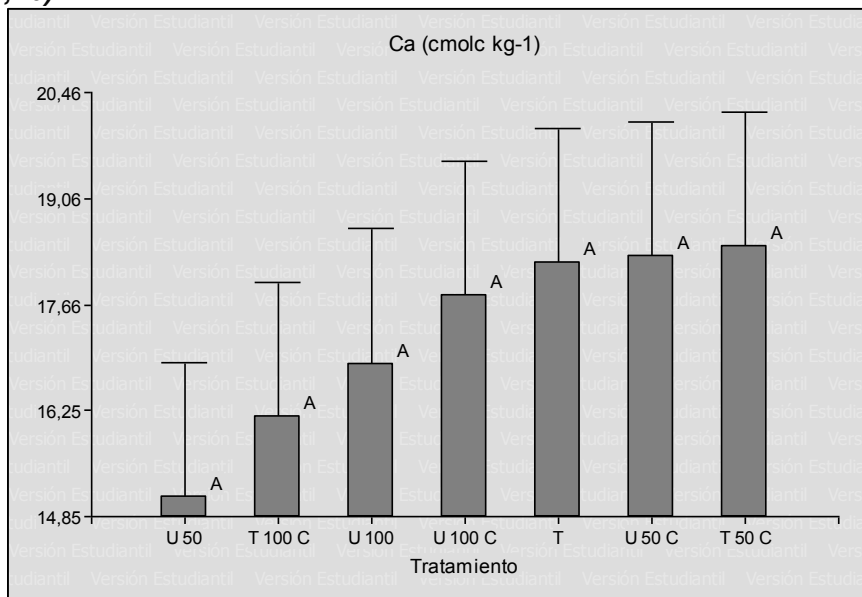


Figura N° 9. Resultados magnesio intercambiable de 0-20 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).

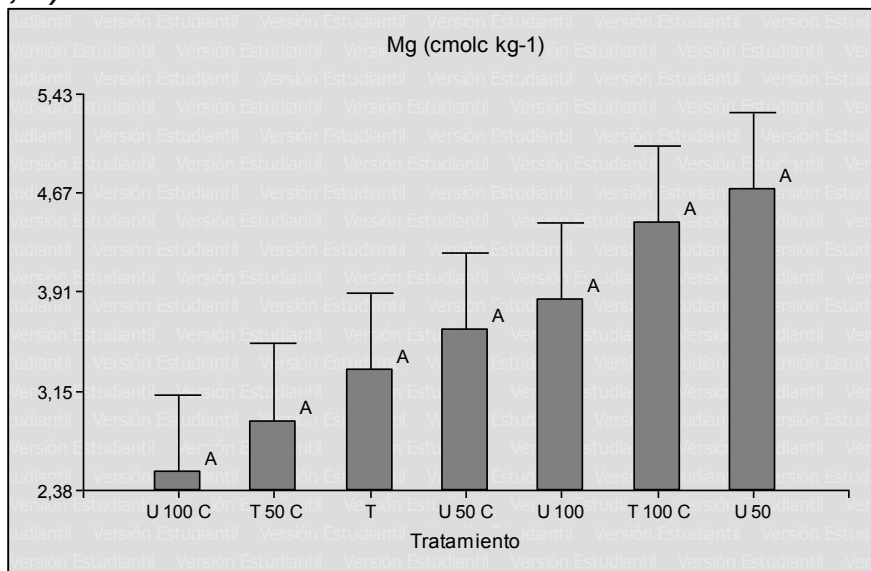


Figura N° 10. Resultados magnesio intercambiable de 20-40 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).

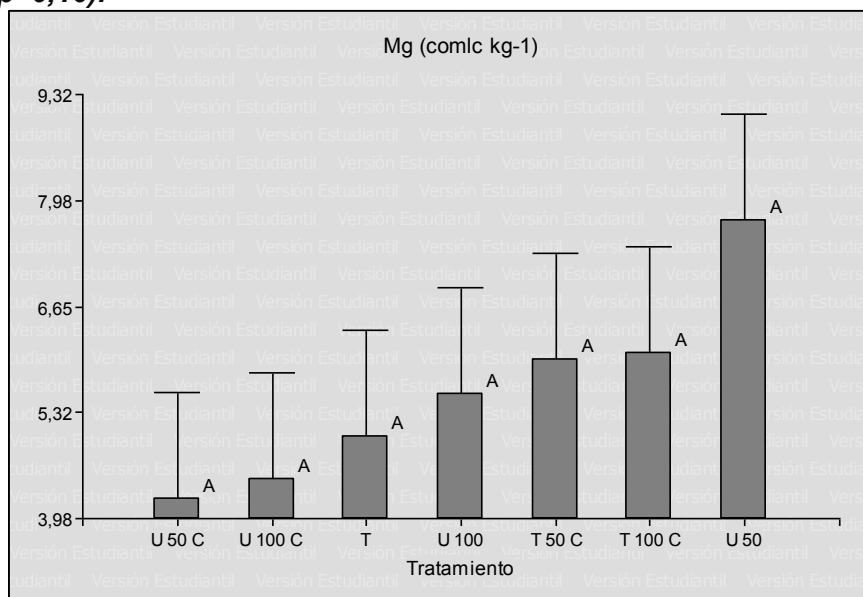


Figura N° 11. Resultados sodio intercambiable de 0-20 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).

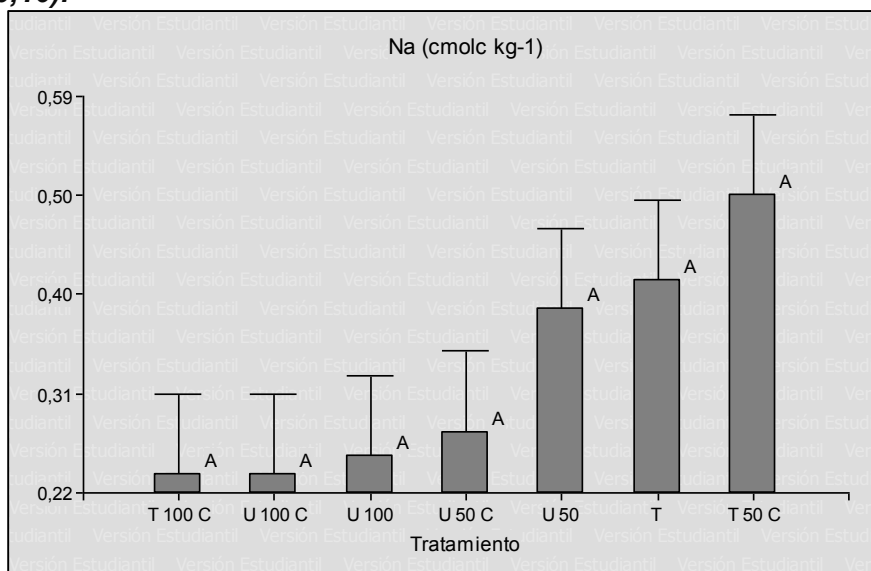


Figura N° 12. Resultados sodio intercambiable de 20-40 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).

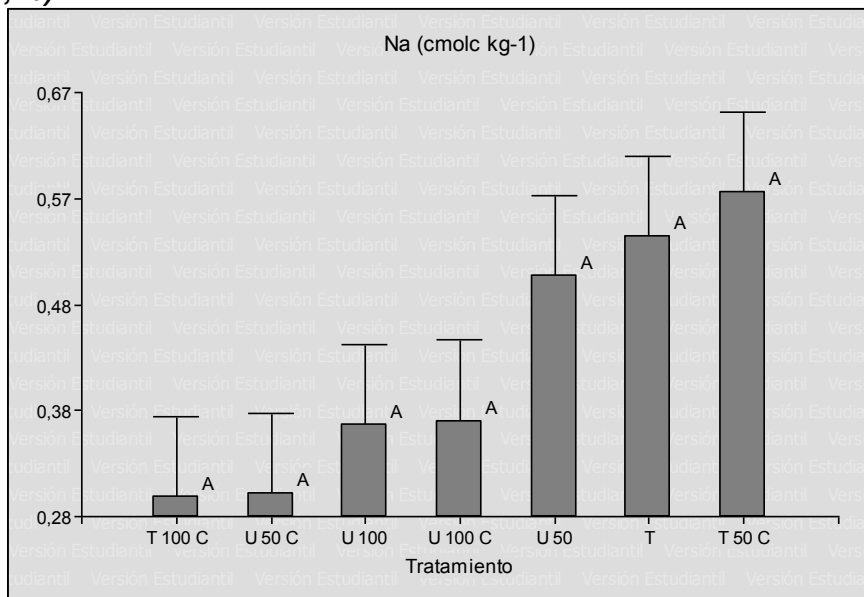


Figura N° 13. Resultados potasio intercambiable de 0-20 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).

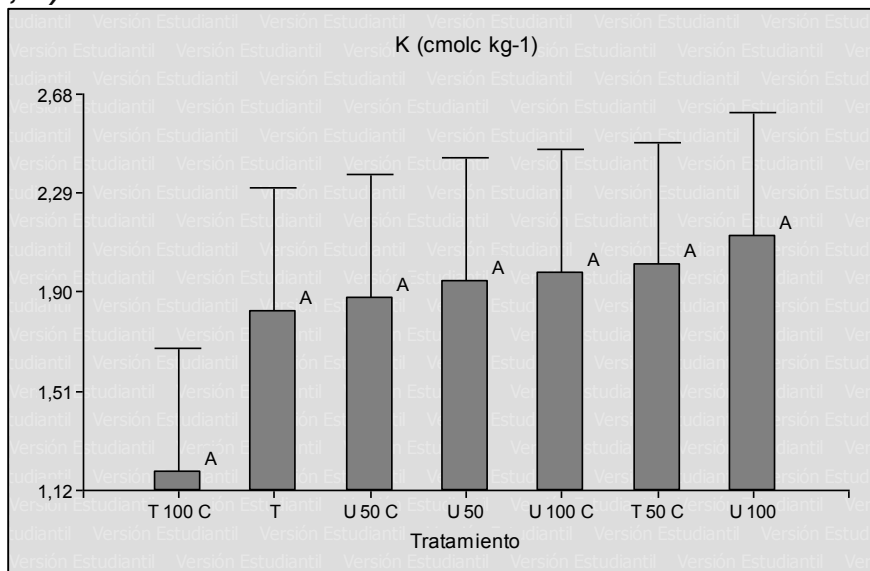
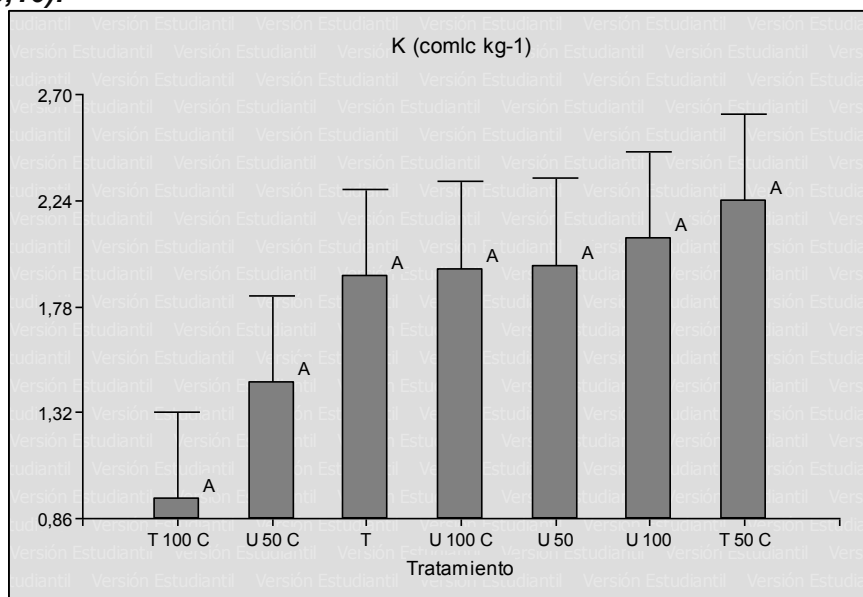


Figura N° 14. Resultados potasio intercambiable de 20-40 cm de profundidad. Letras distintas significan diferencias estadísticamente significativas según el Test de Tukey ($p < 0,10$).



DISCUSIÓN

La aplicación de urea produjo los mayores niveles de acidez actual y potencial (Figuras N° 1, 2, 3 y 4), lo que se corresponde con lo citado por Adams (1984), Chien *et al.*, (2008), y Esterlich *et al.* (2012). Estos autores señalan el efecto acidificante de dicho fertilizante por la liberación de H^+ en su proceso de hidrólisis y oxidación a NO_3^- , contribuyendo a aumentar la acidez edáfica.

Sin embargo la variabilidad de los resultados en las Figuras N° 1 y 2 no permite comprobación estadística más que para el tratamiento U100, ya que a la profundidad de 0-20 cm dicho tratamiento tuvo diferencias estadísticas significativas ($p < 0,10$) respecto de U50C, T, T100C, U50C, U100C; 20-40 cm: U100 vs T 50C, U100C. De lo dicho se desprende que entre el tratamiento de 100 kg ha^{-1} de urea y el de 100 kg ha^{-1} de urea con su correspondiente dosis de fertilizantes neutralizadores (U100 vs U100C) hubo diferencias significativas con el mismo nivel de probabilidad. En las mencionadas figuras también

evidencia que la variación del pH actual fue de entre 0,45 y 0,38 unidades de pH para la capa de 0-20 y la de 20-40 cm de profundidad respectivamente. No obstante, esto no se manifiesta en los tratamientos restantes, ya que aquellos tratamientos en los que se aplicaron mayores cantidades de fertilizantes cálcico-magnésicos no se correspondieron con mayores valores de pH con respecto al testigo. Esto podría estar causado por la variabilidad de la medida para un mismo tratamiento, la que podría ser atribuida a la heterogeneidad del pH en las muestras de suelo debido al empleo de yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y sulfato de magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) como neutralizantes. Estas sales son de mediana solubilidad (yeso: 2,23 g/l en agua a 20°C; sulfato de magnesio: 35,5 g/100 ml en agua a 20°C), tal como lo indican Gentiletti y Gutierrez Boem (2004); y Gutiérrez Boem *et al.* (2004), los cuales sugieren que los sulfatos de calcio bihidratados tienen una solubilidad significativamente menor en los suelos que otros fertilizantes azufrados. Paralelamente, estos productos fueron aplicados superficialmente con escasa incorporación. Al respecto, Molina (1998) y Alonzo Torres y De Pedro (2015) hacen alusión a la mayor eficiencia de esta práctica cuando los mismos son incorporados, sobre todo cuando se trata de suelos arcillosos. Otro aspecto que mencionan estos autores es la distribución del producto, la cual debe realizarse uniformemente. En el ensayo realizado en este trabajo, esto podría no haberse logrado debido a las bajas cantidades aplicadas en cada una de las microparcelas. Lo explicado anteriormente habría incidido particularmente en los resultados de las muestras de 20-40 cm de profundidad. A pesar de ello, existiría una tendencia a mayores niveles de pH actual en los tratamientos T100C, U50C y U100C.

En lo que respecta al pH potencial, se observan resultados con similares tendencias que las halladas para pH actual, en los cuales aquellos tratamientos en los que se aplicaron fertilizantes cálcico-magnésicos como correctores tendieron a presentar menores niveles de acidez (Figuras N° 3 y 4). Sin embargo, la diferencia de pH potencial es de menor

magnitud que la de pH actual, y estaría en el orden de 0,20 unidades de pH para la capa superficial (0-20 cm) y de 0,25 para la subsuperficial (20-40 cm). Al respecto, Pellegrini *et al.* (2016) en un ensayo sobre evaluación de protocolos para la determinación de pH en 2 suelos de la Provincia de Buenos Aires, sometidos a diferentes dosis de enmiendas básicas, encontraron que el pH actual (1:2,5) sería el más eficiente en la discriminación de la dosis de correctores empleada, lo que podría relacionarse con la menor variación de pH potencial descripta anteriormente en comparación con el pH actual (manteniendo en ambos diluciones suelo agua 1:2,5).

Las variables capacidad de intercambio catiónica y cationes intercambiables no arrojaron diferencias significativas entre tratamientos y mostraron una marcada heterogeneidad en los resultados (Figuras N° 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14), lo cual podría estar sustentado por lo hallado por Millán *et al.* (2010) y Pellegrini *et al.* (2016). En ambos trabajos se realiza una evaluación de 2 métodos de determinación de la capacidad de intercambio catiónica utilizando distintos extractantes: CIC bufferada (con acetato de amonio 1N pH 7) y CIC no bufferada (con cloruro de amonio 0,2 M a pH del suelo) sobre distintos suelos de la Región Pampeana, a los cuales se les aplicaron diferentes dosis de enmiendas básicas. Los resultados de los mismos determinan que la CIC bufferada arroja valores más altos de capacidad de intercambio con respecto a la CIC no bufferada, lo cual ocurriría por un aumento de las cargas negativas del tipo variable, a causa del pH de la solución de acetato de amonio, valor superior al pH del suelo. Este fenómeno sería de mayor magnitud en aquellos suelos con mayor contenido de arcilla y materia orgánica. Considerando que en el presente trabajo la CIC y los cationes intercambiables fueron determinados con el método del acetato de amonio a pH 7, podría decirse que la sobrevaloración de la capacidad de intercambio producida conduciría también a una subestimación de la saturación básica obtenida con la misma metodología. Pellegrini *et al.*

(2016) señalan también que ninguna de las dos metodologías de determinación de CIC (bufferada y no bufferada) evaluadas permitió registrar un aumento de la medida ante la aplicación de enmiendas básicas, ni discriminar el efecto de la dosis empleada. A partir de ello se podría deducir que ni la CIC ni los cationes tienen una adecuada capacidad de diagnóstico de la residualidad del agregado de enmiendas básicas, en particular cuando se trata de suelos arcillosos y con gran contenido de materia orgánica. Debe destacarse que Pellegrini *et al.* (2016) utilizaron dosis de hasta 2.000 kg ha⁻¹, muy superiores a las evaluadas en este trabajo, por lo que podría afirmarse que estas determinaciones serían aún menos sensibles a los tratamientos usados en la presente investigación.

Cabe destacar también, que la no incorporación y la distribución heterogénea en las parcelas de los productos aplicados podría haber incidido negativamente en la eficiencia de la práctica (Molina, 1998) y en los resultados obtenidos en los análisis de suelo.

CONCLUSIÓN

Los tratamientos con aplicación urea (U100, U50) fueron los que causaron mayores niveles de acidez actual y potencial en el suelo para ambas profundidades evaluadas (0-20, 20-40 cm).

La aplicación de urea conjuntamente con sus respectivas dosis de fertilizantes neutralizadores produjo una tendencia al aumento del pH actual y potencial. La magnitud de dicho aumento sería mayor para el pH actual que para el pH potencial. Esto podría sugerir las bondades de la práctica de la fertilización cálcico-magnésica conjuntamente con la nitrogenada para prevenir procesos de acidificación.

No se evidenció una mejora en el complejo de cambio (CIC, Ca⁺² y Mg⁺²) como consecuencia de la aplicación de yeso y sulfato de magnesio.

BIBLIOGRAFÍA

- **Adams F.** 1984. Crop response to lime in the southern United States. *In: Soil Acidity and Liming*. F. Adams (ed.). Madison, Wisconsin: ASA-CSSA-SSSA. p. 211-265.
- **Albuquerque J.A., C. Bayer, P.R. Ernani, A.L. Mafra, y E.C. Fontana.** 2003. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 27 (5): 799-806.
- **Alonzo Torres M. y F. De Pedro.** 2015. El uso del yeso agrícola como mejorador de suelos. Instituto Universitario de Formosa, boletín técnico N° 19. 14 p.
- **Azcarate P., N. Kloster y G. Pérez Habiag.** 2012. Reacción del suelo: pH. En: *Manual de Fertilidad y Evaluación de Suelos*. Alberto Quiroga y Alfredo Bono (editores). Ed. INTA. Anguil. p. 19-24.
- **Chan K.Y., y D.P. Heenan.** 1999. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 63:1841-1844.
- **Chien S.H., M.M. Gearhart y D.J. Collamer.** 2008. The effect of different ammoniacal nitrogen sources on soil acidification. *SoilSci.* 173:544-551.
- **Cruzate G.A. y R. Casas.** 2004. Balance de Nutrientes. *Revista Fertilizar INTA Año 8 Número Especial "Sostenibilidad"*, p. 7-13.
- **Estelrich C., J. Ossola, L. Juan, M. Vázquez y G. Millán.** 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el pH en dos suelos de la Pradera Pampeana. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16-20/4/12. Mar del Plata, Argentina. En soporte CD.
- **Gambaudo S., L. Picco, P. Soldano y A. Cervetti.** 2007. Fertilización compuesta con calcio, magnesio y azufre en soja. Resultados experiencias campaña 2006/2007. INTA. EEA Rafaela. Información técnica cultivos de verano. Publicación Miscelánea N°108

- **García M.G. y M. E. Vázquez.** 2012. Valoración económico-ecológica de la pérdida de nutrientes básicos de los suelos santafesinos. Revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica (Revibec) 19: 29-41.
- **Gelati P. y M. Vázquez.** 2004. Exportación agrícola de nutrientes básicos en la zona norte de la Provincia. de Buenos Aires y el costo de su remediación. Acta Segundas Jornadas de la Asociación Argentino Uruguaya de Economía Ecológica (ASAUEE), 12-13/11, Lujan, Argentina. p. 28-29.
- **Gentiletti A. y F.H. Gutierrez Boem.** 2004. Fertilización azufrada del cultivo de soja en el centro-sur de Santa Fe. Informaciones agronómicas, N° 24. 9 p.
- **Gonzalez B., S. Gambaudo, D. Bersano, D. Tenorio, J. Neifert, y D. Osenda.** 2001. Enmiendas en trigo. Fertilizar 6(23): 18-19.
- **Gutiérrez Boem F., P. Prystupa y G. Ferraris.** 2004. Fuentes de azufre en el cultivo de soja. Simposio "Fertilidad 2004". Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sustentable. Posters, pp 54.
- **Havlin J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale y W.L. Nelson.** 2005. Soil acidity and alkalinity. En J.L. Havlin, J.D. Beaton, S.L. Tisdale, W.L. Nelson (ed.) Soil fertility and fertilizers. Pearson Prentice Hall. New Jersey. 7th ed, p. 45-96.
- **Iturri L. A.** 2015. Evidencias de acidificación de suelos loessicos agrícolas de Argentina. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. 173 p.
- **Lanfranco J.W.** 1988. Carta de suelos de la Estación Experimental Central. Facultad de Agronomía, UNLP. (Inédito).
- **Lemenih M., Karltonb E. y M. Olssonb.** 2004. Assessing soil chemical and physical propert y responses to deforestation and subsequent cultivation in small holders farming system in Etiopía. Agriculture, Ecosystems & Environment 81:103-112.

- **Millán G., M. Vázquez, A. Terminiello y D. Santos Sbuscio.** 2010. Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la región pampeana. Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo 28(2): 141-154.
- **Molina E.** 1998. Encalado para la corrección de acidez del suelo. ACCS, San José, Costa Rica. 45 p.
- **Pellegrini A., F.A. Sucunza, G. Millán y M.E. Vázquez.** 2016. Comparación de metodologías analíticas para diagnosticar suelos con enmiendas básicas en el ámbito templado argentino. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, Argentina. 12 p.
- **Roth C.H. y M.A. Pavan.** 1991. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of Brazilian Oxisol. Geoderma 48: 351-361..
- **Sainz Rozas H.R., E. Echeverria, P. Barbieri y M. Eyherabide.** 2014. Relevamiento y mapeo de la fertilidad en suelos agrícolas de la Región Pampeana. Fertilizar Asociación Civil. Revista N°29. p. 5-8.
- **Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca - Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.** 2004. SAMLA (Sistema de Apoyo Metodológico de Laboratorios de Análisis de Suelos y Aguas).
- **Software estadístico InfoStat – Versión estudiantil.** 2011. Descarga gratuita en sitio web: www.infostat.com.ar. Último acceso: mayo 2017.
- **Terminiello A., M. Vázquez, M. García y F. Guilino.** 2006. Efecto de correctores de acidez sobre propiedades físicas de un suelo de la Pradera Pampeana. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 18-22/9. Salta, Argentina. Acta (trabajo completo): versión electrónica. Acta (resumen): 393.

- **Vázquez M.** 2007. Calcio y Magnesio del suelo. Encalado y enyesado. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Echeverría H., García F. Eds. Ed. INTA, 1º Edición, Reimpresión. Cap. 8: 161-185. 525 p.
- **Vázquez M.E., E. Baridon, J. Lanfranco y G. Malagrina.** 2000. Evaluación de la potencialidad de la problemática de acidez en la región norte de la provincia de Buenos Aires. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 11 – 14 abril, Mar del Plata, Argentina.
- **Vázquez M., A. Piro, G. Millán, y J. Lanfranco.** 2002. Pautas para el diagnóstico de la problemática asociada a suelos ácidos de zonas templadas subhúmedas. Revista de la Asociación Argentina de la Producción Animal 23(2): 69-80. (ISSN 326-0550)
- **Vázquez M., A. Piro, G. Millán y J. Lanfranco.** 2004. Corrección de suelos ácidos de la pampa húmeda para la producción de alfalfa - Informaciones Agronómicas del Cono Sur. INPOFOS. 23: 14-20.
- **Vázquez M. y R. Rotondaro.** 2005. Acidificación de suelos en el sur de Santa Fe y el norte bonaerense. Revista de la Asociación de Cooperativas Argentinas Acaecer 350: 26 – 32.
- **Vázquez M., A. Termiello, M. García, G. Ardanaz, D. Casciani, J. Garcia, M. Mur, J. Marinier, F. Guilino, P. Gelati y G. Millán.** 2009. Evolución del efecto de las enmiendas básicas sobre una pastura de alfalfa en el S de Córdoba. Actas Congreso de Ingeniería Rural (CADIR). Rosario. En soporte CD.
- **Vázquez M., A. Terminiello, A. Casciani, G. Millán, D. Cánova, P. Gelati, F. Guilino, A. Dorronzoro, Z. Nicora, L. Lamarche y García M.** 2012. Respuesta de la soja (*Glycine max* L. merr) a enmiendas básicas en algunos suelos de las

provincias de Buenos Aires y Santa Fe. Revista de la Ciencia del Suelo 30(1): 43-56.

- **Vázquez M. y A. Pagani.** 2015. Calcio y Magnesio del suelo. En: Manejo de fertilización y enmiendas. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ed. Echeverría H., García F. INTA, Cap. 1: 317-356. 904 p.
- **Viglizzo E.F. y E. Jobbágy.** 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico ambiental. Ediciones INTA. 100 p.
- **Vivas H.S., H. Fontanetto y R. Albrecht.** 2001. Fertilización con calcio, magnesio y azufre sobre la producción de maíz en dos sitios del centro de Santa Fe. Información Técnica de Cultivos de Verano. EEA Rafaela, INTA. Publicación miscelánea N° 95, N° 4: 1-5.
- **Zapata Hernández R.** 2004. Origen de la acidez. Capítulo 2. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 197 p.