

Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales



Trabajo Final de Carrera

***EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BUFFER DE SUELOS ÁCIDOS DE LA PRADERA PAMPEANA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA NECESIDAD DE CORRECTOR***

Carrera: Ingeniería Agronómica

DÍAZ GOROSTEGUI, AGUSTINA

DNI: 36.943.918

N° de legajo: 26693/2

E-mail: [agustina.dg@hotmail.com](mailto:agustina.dg@hotmail.com)

Teléfono: 0221155990753

Directora del trabajo: Dra. Mabel Vázquez

Co-director del trabajo: Dr. Daniel Bennardi

Lugar de trabajo propuesto: Cátedra de Edafología de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales/UNLP

Fecha de entrega: 7 de Octubre 2016.

## CONTENIDO

RESUMEN.....	2
INTRODUCCIÓN .....	2
HIPÓTESIS DEL TRABAJO .....	6
OBJETIVOS .....	7
MATERIALES Y METODOS.....	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	10
CONCLUSIONES .....	16
BIBLIOGRAFÍA.....	17
ANEXO TABLAS .....	23
ANEXO GRÁFICOS.....	28

## **RESUMEN**

La capacidad tampón o buffer de un suelo es un factor clave para determinar la dinámica de la acidificación y por ende, de la necesidad de tratamiento. Una de las formas de determinar este poder regulador es a través de curvas de titulación. Objetivos: evaluar la evolución del pH de diferentes suelos ácidos representativos de taxones de amplia difusión areal de la Región Pampeana, ante el agregado de dosis crecientes de álcali y ácido, a los fines de brindar pautas científicas para su tratamiento, a la vez que desarrollar funciones que permitan la estimación de la dosis de corrector y la evolución de la acidificación mediante propiedades edáficas de fácil determinación. Se seleccionaron diez suelos, a los que se les efectuaron evaluaciones químicas y fisicoquímicas, y sobre los que se llevaron a cabo curvas de titulación alcalina y de titulación ácida. En todos los suelos estudiados, el pH se relacionó linealmente con el agregado de álcali y de ácido. Ambos tipos de curvas señalan la existencia de suelos cuyo poder amortiguador puede agruparse de acuerdo a la condición textural, y en consecuencia su capacidad de intercambio catiónica y contenido de materia orgánica. Para ambos casos pudo establecerse modelos de regresión lineal multivariada con la finalidad de predecir las pendientes de las curvas. Las variables independientes de dichos modelos fueron contenido de materia orgánica y de arcilla dichas determinaciones de rutina en laboratorios de suelos pueden ser una herramienta simple para la toma de decisión acerca de la dosis a emplear en la práctica del encalado y su periodicidad, previa calibración en condiciones de campo.

## **INTRODUCCIÓN**

**Causas y consecuencias de la acidificación en ámbitos templados con producción extensiva**

En las últimas décadas la acidificación de los suelos en las regiones templadas se ha acelerado debido a la exportación a través de la producción de granos, carne o leche, de nutrientes básicos sin reposición, a la aplicación de fertilizantes nitrogenados amoniacales en dosis altas y crecientes (Burle *et al.*, 1997; Limousin & Tessier, 2007; Xu *et al.* 2012) como así también, a la expansión de la siembra directa, con su acumulación de materia orgánica en superficie (Burle *et al.*, 1997; Tang, 1998). A este proceso antrópico se le adiciona la lixiviación natural de las bases presentes en el suelo (Na, K, Ca y Mg), particularmente alta en suelos de textura gruesa, y las deposiciones ácidas derivadas de la actividad industrial. Si bien los suelos de textura gruesa fueron los primeros en manifestar esta problemática debido a su baja reserva de bases, la misma hoy se encuentra difundida en suelos de otras clases texturales, a causa de los antecedentes de uso antes citados (Vázquez, 2005).

Desde el punto de vista de la nutrición vegetal, los perjuicios puestos de manifiesto por una reducción del pH, son la disminución de la reserva de los nutrientes básicos, así como desbalances entre los mismos, igualmente perjudiciales para el crecimiento de las plantas, siendo las leguminosas las especies más afectadas, entre ellas la alfalfa (*Medicago sativa* L), otros tréboles forrajeros y cultivos de cosecha como la soja (*Glycine max* L) (Pellegrini *et al.*, 2002; Pellegrini *et al.*, 2004; Vázquez *et al.*, 2003). Este fenómeno se cataliza progresivamente, pues la reducción de pH trae como consecuencia una merma en la capacidad de intercambio catiónica por reducción de cargas variables negativas de los coloides, y en consecuencia menores posibilidades de retener las reducidas bases existentes (Blake *et al.*, 1999).

Asimismo cuando los valores descienden por debajo de 5,3-5,5, comienzan a manifestarse toxicidades de aluminio y manganeso en las plantas (Oorts *et al.* 2004; Millán *et al.* 2010; Xu *et al.* 2012).

## **Tratamiento de suelos ácidos para la producción extensiva**

El tratamiento del problema se basa en el empleo de productos básicos, generalmente derivados de la minería, como caliza y dolomita, entre otros.

Para determinar la dosis de producto a utilizar se han usado diferentes determinaciones analíticas. La literatura científica ha citado en muchas oportunidades rangos de pH del suelo óptimos para el crecimiento de cada cultivo. Este rango varía en valores y amplitud con las diferentes especies. En general es ampliamente aceptado que condiciones de neutralidad o ligera acidez son apropiadas para el crecimiento de la mayoría de las plantas. Cabe aclarar que los valores de pH son sólo orientativos, ya que el nivel crítico de las diferentes especies vegetales informado por distintos autores es variable y posiblemente esté relacionado con otras propiedades edáficas como los niveles de Al y Mn, el contenido de materia orgánica y particularmente, el material genético utilizado (Vázquez y Pagani, 2015). El pH actual es generalmente utilizado para decir si un suelo necesita o no corrección mediante la aplicación de enmiendas básicas, pero no para determinar los requerimientos de encalado, es decir la dosis de enmienda necesaria para elevar el pH del suelo a un valor dado. Por esta razón, se han desarrollado métodos analíticos tendientes a determinar la cantidad de enmienda necesaria para neutralizar la acidez edáfica.

### **Definición de Capacidad buffer edáfica**

La capacidad reguladora o buffer de un suelo se define como la cantidad de ácido o base necesaria para cambiar su pH en una unidad (Sá Mendonça *et al.* 2006). Es la resistencia que tiene el suelo a cambiar el pH cuando se le adicionan sustancias ácidas o básicas. Esta propiedad se debe a la habilidad de los pares conjugados

ácido-base presentes de transferir protones entre ellos; pares que pueden estar tanto en la solución como en los sólidos edáficos (Zapata Hernández, 2004; Van Rensburg *et al.* 2009). Es un factor clave para determinar la dinámica de la acidificación y por ende, la necesidad y características técnicas de los tratamientos a emplear. Puede ser utilizada para evaluaciones cuantitativas del requerimiento de correctores básicos (mayor capacidad buffer indica mayor cantidad de enmienda necesaria para neutralizar la acidez del suelo bajo similares valores de pH actual) (Xu *et al.* 2012).

Este poder amortiguador depende del contenido y tipo de acidez, el tipo de arcilla, presencia de sales, contenido de materia orgánica, y del pH inicial que tiene el suelo (Zapata Hernández, 2004; Van Rensburg *et al.* 2009). La capacidad buffer se incrementa, entre otros factores, con el aumento de la valencia de los cationes y la fuerza iónica de la solución edáfica. Las arcillas 2:1 tienen una gran capacidad para adsorber o ceder protones, mientras que en las de tipo 1:1 como la caolinita sucede lo contrario (Xu *et al.* 2012). Con respecto a la materia orgánica, los grupos funcionales ácidos débiles pueden actuar, asimismo, como pares conjugados ácido-base, otorgándole una alta capacidad amortiguadora al suelo. La diversidad de estos grupos (carboxílicos, fenólicos y otros) provee a la materia orgánica la posibilidad de actuar como un buffer en un amplio rango de pH (Zapata Hernández, 2004; Van Rensburg *et al.* 2009). Por otro lado se han efectuado estudios en suelos australianos donde se correlaciona la capacidad de intercambio catiónica (CIC) con la capacidad buffer, aspecto puesto de manifiesto en otros trabajos para otros tipos de suelos (Aitken *et al.* 1990).

## **Metodologías para evaluar la capacidad buffer edáfica. Curvas de titulación**

Existen diversas metodologías para determinar la capacidad amortiguadora del suelo. Entre ellas pueden citarse aquellas que se basan en el empleo de soluciones buffer (Shoemaker *et al.*, 1961; Adams and Evans, 1962; Mehlich, 1976; Machacha, 2004; Sikora, 2012), el método del hidrógeno de cambio (Conti *et al.* 1983), técnicas electrocinéticas (Vázquez *et al.* 2007; Vázquez *et al.* 2008) y curvas de titulación (Sakala *et al.* 2004; Sá Mendonça *et al.* 2006; Huang *et al.* 2009; Nelson y Su, 2010; Xu *et al.* 2012; Kissel *et al.* 2007). Estas últimas describen los valores de pH alcanzados con cantidades crecientes de álcali o ácido agregadas a una suspensión de suelo.

Las curvas de titulación básica permiten determinar el requerimiento de correctores básicos, mientras que las curvas de titulación ácida permitirían conocer la velocidad o evolución de la acidificación posterior al encalado (y por lo tanto la residualidad de la práctica, habilitando a la estimación de la periodicidad de los reencalados).

## **HIPÓTESIS DEL TRABAJO**

Ante la necesidad de un manejo más eficiente en la práctica de corrección de la acidez de los suelos de la región pampeana y de ajustar la recomendación del encalado se plantea la hipótesis que diferentes suelos ácidos del área templada argentina tienen diferente capacidad de amortiguar los cambios de pH y por lo tanto requieren distintas dosis y periodicidad de encalado. La capacidad amortiguadora (alcalina y ácida)

puede ser estimada mediante distintas propiedades edáficas asociadas de fácil determinación.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Brindar pautas científicas para el tratamiento de suelos ácidos de producción agropecuaria de amplia difusión areal de la Pradera Pampeana

### **Objetivos específicos**

- Evaluar la evolución del pH de diferentes suelos ácidos representativos de taxones de amplia difusión areal de la región pampeana ante el agregado de dosis crecientes de álcali y ácido
- Desarrollar funciones que permitan predecir dicha evolución mediante el empleo de variables de simple determinación
- Desarrollar funciones que permitan la estimación de la dosis de corrector y la evolución de la acidificación posterior a la aplicación de las enmiendas, sobre bases científicas.

## **MATERIALES Y METODOS**

**Suelos:** Se seleccionaron 10 suelos ácidos de diferentes ámbitos de la región pampeana, caracterizados por representar diferentes taxones de importante difusión areal, propiciando la participación de condiciones texturales distintas. Los mismos fueron muestreados de 0-20 cm mediante muestra compuesta de 10 submuestras/muestra sobre superficies de 50 ha. Las muestras, previamente secadas a 40°C con circulación forzada, fueron tamizadas según los distintos protocolos correspondientes a las determinaciones efectuadas.

### **Determinaciones de caracterización general:**

- materia orgánica (dicromatometría, muestra tamizada por 0.5 mm)
- pH actual: relación suelo:agua de 1:2,5 (potenciometría, muestra tamizada por 2 mm)
- pH potencial: relación suelo:KCl 1N de 1:2,5 (potenciometría, muestra tamizada por 2 mm)
- textura (densimetría de Bouyucos, muestra tamizada por 2 mm)
- Capacidad de intercambio catiónica y cationes intercambiables (extracción con  $\text{NH}_4\text{AcO}$  1 M, determinación por destilación Kjeldahl de la CIC, Ca y Mg por quelatometría, muestra tamizada por 2 mm)

Todos los análisis se realizaron mediante metodología standarizada por la SAGPyA de la Nación Argentina (SAMLA, 2004).

**Curvas de titulación:** para cada suelo se llevaron a cabo 2 curvas. En una se efectuó agregados crecientes de álcali hasta alcanzar un valor de pH de 7. En la otra curva, primeramente se adicionó álcali con el fin de elevar el pH del suelo al valor máximo alcanzado en la curva anterior, para luego agregar cantidades crecientes de ácido.

*Curva de titulación alcalina (Sadzawka et al. 2006):* se pesaron porciones de 10 g de suelo (3 repeticiones) en frascos de plástico de 100 ml, a las que se agregaron volúmenes crecientes de una solución de KOH/KCl (0,2 M en KOH y 1 M en KCl). Luego se añadieron volúmenes variables de una solución de KCl 1 M con el fin de igualar los volúmenes y la concentración de KCl en todas las porciones de suelo, minimizando así las variaciones en fuerza iónica. Se adicionan 2 gotas de cloroformo para inhibir la actividad de los microorganismos que podría modificar la condición de pH (Xu et al. 2012), se mezcló manualmente y taparon los frascos, incubándose los en estufa a 60 °C durante 24 horas. Posteriormente se agregaron 15 ml de solución de KCl 1 M, y se agitó durante 1 hora a temperatura ambiente en un agitador vaivén. Luego se efectuó la determinación potenciométrica del pH.

*Curva de titulación ácida:* se pesaron porciones de 10 g de suelo (3 repeticiones) en frascos de plástico de 100 ml a las que se agregó solución de KOH/KCl (0,2 M en KOH y 1 M en KCl) con el fin de alcanzar el valor de pH máximo obtenido en la curva de titulación alcalina. Se adicionaron 2 gotas de cloroformo, se mezcló manualmente y se taparon los frascos, incubándose los en estufa a 60 °C durante 24 horas, condiciones comparables a las utilizadas en la curva de titulación alcalina. A continuación se añadieron cantidades crecientes de una solución de HNO<sub>3</sub>/KCl (0,2 M en HNO<sub>3</sub> y 1 M en KCl) y volúmenes variables de una solución de KCl 1 M a fin de igualar los volúmenes y la concentración de KCl en todas las porciones de suelo. Nuevamente se adicionaron 2 gotas de cloroformo, se mezcló y taparon los frascos, incubándose los en

estufa a 60 °C por un lapso de 7 días. Tras este período se procedió a la medición del pH.

**Evaluación estadística:** se efectuó un análisis de regresión lineal y no lineal de las curvas de titulación alcalina y ácida con las correspondientes pruebas de significancia de los modelos que se obtuvieron a los fines de seleccionar la función de mejor ajuste. Se compararon las pendientes de las curvas entre suelos (curvas de titulación ácida y de titulación alcalina por separado) y dentro de cada suelo (curva de titulación ácida vs curva de titulación alcalina), mediante un análisis de la varianza de modelos múltiples. Se llevaron a cabo análisis de regresión lineal multivariada con el fin de obtener modelos que relacionen las pendientes de las curvas con las distintas propiedades edáficas (CIC, pH actual, pH potencial, MO y contenido de arcilla). Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el software Statgraphics Centurion XV.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados de los análisis de los suelos empleados se presentan en la Tabla 1. Los suelos poseían pH actual entre 5,27 y 6,03, y pH potencial entre 4,62 y 5,04. Los valores alcanzados por la CIC fueron de 7,6 a 22,5 cmolc kg<sup>-1</sup>, mientras que el contenido de MO tuvo un rango de 10,6 a 50,0 g kg<sup>-1</sup>. Las clases texturales estuvieron comprendidas entre franco-arcilloso y franco-arenoso. Todas estas propiedades muestran la variabilidad de la población analizada.

**(Tabla 1, aquí)**

En la Figura 1 se ilustran las curvas de titulación (básica y ácida) obtenidas. Como puede apreciarse en ellas los cambios de pH son paulatinos a través de todo el rango estudiado, en todos los casos entre valores de pH cercanos a 5 y 7. Esto se diferencia de lo que se observa en los diagramas característicos de ácidos polipróticos, donde se aprecian mesetas, alternando con pendientes pronunciadas (Zapata Hernández, 2004; Van Rensburg *et al.* 2009). Cuando se adiciona una base a un suelo, se neutralizan las diferentes fuentes responsables de la acidez: óxidos, oxihidróxidos de Al y Fe, arcillas, grupos funcionales de la materia orgánica como carboxilos e hidroxilos fenólicos (Sokolova *et al.* 2016). Cada una de estas fuentes de protones está asociada a una constante de acidez ( $K_a$ ), y dada la cercanía de los valores de éstas, pueden existir casos en que las curvas no presenten cambios bruscos de pendiente cuando se pasa de una fuente de protones a otra. La variabilidad de fuentes de protones en los Molisoles utilizados en el trabajo, caracterizados por materia orgánica de alto grado de humificación, a la vez que variabilidad mineralógica (Terugi, 1957) podría ser la responsable de la forma de las curvas obtenidas.

Puede observarse que ambos tipos de curvas se comportan linealmente en todo el rango de trabajo. Este hecho ha sido comprobado por otros investigadores (Sá Mendonça *et al.* 2006; Van Rensburg *et al.* 2009; Xu *et al.* 2012). Para cada caso se analizaron diferentes funciones de ajuste a través de regresión lineal y no lineal (Tablas 2 y 3). Debido a que la diferencia entre el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) del modelo no lineal (de mayor  $R^2$ ) y el de la función lineal fue pequeña en todos los casos, a la vez que el modelo no lineal de mayor  $R^2$  no fue el mismo para todos los suelos, se optó por ajustar regresiones de tipo lineal. Esto permitió, además, comparar las pendientes para establecer tipologías de suelos y posibilidad de tratamiento.

**(Figura 1, aquí)**

**(Tabla 2, aquí)**

**(Tabla 3, aquí)**

Se obtuvo así la correspondiente expresión  $y = a + b \cdot x$  ( $y = \text{pH}$ ,  $x = \text{mmoles de base menos mmoles de ácido agregado por kg de suelo}$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Como puede verse en la Figura 1, para el caso de las curvas de titulación alcalina los coeficientes de determinación estuvieron comprendidos entre 0,9826 y 0,9967, mientras que para las curvas de titulación ácida oscilaron entre 0,9772 y 0,9985, demostrando las bondades del ajuste lineal.

Las pendientes “b” correspondientes a las funciones obtenidas para ambos tipos de curvas arrojaron valores desde 0,0204 a 0,0579 unidades de  $\text{pH mmoles}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ . Cuando se analizan estadísticamente las diferencias para cada suelo entre las pendientes de la curva alcalina y respectiva ácida, en 6 de los 10 suelos (C. Casares, Bolívar, G. Moreno, 25 de Mayo, Verónica y Bavio) no existen diferencias estadísticamente significativas. En los 4 casos en la que sí existe esta diferencia (Los Hornos, Norberto de la Riestra, Lincoln y Gral. Belgrano), puede apreciarse en la Figura 1, que se trata de variaciones de poca trascendencia desde el punto de vista práctico. Considerando que la recíproca de “b” es la capacidad buffer del suelo (Xu et al. 2012), se observa en todos los casos que el poder regulador alcalino es similar al ácido. Los suelos estudiados se caracterizan por poseer arcillas de tipo 2:1, fundamentalmente illita y montmorillonita, y materia orgánica con abundancia de ácidos húmicos y fúlvicos, lo que confiere a estos suelos amplias fuentes de variabilidad cuali y cuantitativa del poder amortiguador. La concordancia de la pendiente de ambas curvas señalaría que estas fuentes no serían afectadas por los cambios de pH o estarían compensando sus efectos.

Se efectuó una comparación de las pendientes “b” de cada tipo de curva entre suelos mediante un análisis de la varianza de modelos múltiples (Tablas 4 y 5).

**(Tabla 4, aquí)**

**(Tabla 5, aquí)**

Los resultados de las Tablas 4 y 5 no permiten hacer una asociación estricta de la pendiente “b” con la condición textural. Sin embargo, si se toma un punto de inflexión en el valor promedio de las pendientes (curvas alcalinas y ácidas),  $b = 0,030$ , los suelos con valores de pendiente “b” de ambas curvas  $< 0,030$  (25 de Mayo, Verónica, Los Hornos, Lincoln, Bavio y Gral. Belgrano) y, por lo tanto mayor capacidad buffer alcalina y ácida, son aquellos que, de acuerdo a la Tabla 1, tienen valores de CIC por encima de  $14 \text{ cmolc kg}^{-1}$  y contenidos de MO mayor a  $30 \text{ g kg}^{-1}$ , y de arcilla (a) y limo (L) superiores a  $200$  y  $310 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente. Mientras que el contenido de arena en dichos suelos es inferior al  $400 \text{ g kg}^{-1}$ . Estos suelos poseen una clase textural Fr, Fr-a o Fr-L-a, quedando fuera de la condición los suelos F-A. Estos resultados permitirían agrupar los suelos en 2 grandes categorías de capacidad buffer, explicada ésta por la condición textural y las variables mencionadas asociadas.

Para el caso del encalado, si se plantea la situación de una capa arable de  $2.000 \text{ Mg ha}^{-1}$ , un suelo con una pendiente “b” de  $0,020$ , es decir alta capacidad buffer, para provocar, por ejemplo, un aumento de  $0,5$  unidades de pH, serían necesarios  $2.500 \text{ kg}$  de  $\text{CaCO}_3$ . Esta cuenta es simplista, pues no tiene en cuenta, por razones de trabajarse en suspensiones en ausencia de actividad microbiana, otros aspectos secundarios de la práctica. Por ejemplo, acidez o alcalinidad producida por procesos biológicos en el campo (Wang *et al.* 2015), la disolución de las enmiendas, o eventualmente, el aumento de la impedancia mecánica cuando se superan dosis en

general de 1.500 kg ha<sup>-1</sup>, comprobados para suelos de esta región por otros autores, posiblemente por recristalizaciones del CaCO<sub>3</sub> (Vázquez *et al.* 2009). Sin embargo, este procedimiento simple permitiría estimar la magnitud de la cantidad necesaria de corrector, cuando el objetivo es el incremento de pH. Es menester, por los argumentos citados, que este cálculo teórico sea calibrado con experiencias en condiciones reales, donde además, se tengan en consideración estos otros efectos secundarios. Paralelamente, este cálculo demostraría que aún en suelos de alta capacidad buffer de la región, las dosis requeridas son sustancialmente menores que las empleadas en ámbitos subtropicales/tropicales (3,5 t/ha en Oxisoles de Brasil (Espinosa y Molina, 1999)), a la vez que la periodicidad de la práctica de mayor plazo.

A los fines de facilitar el diagnóstico en laboratorios de rutina, se procedió a la selección del mejor modelo de regresión lineal multivariado que relacione la pendiente “b” de las curvas de titulación con las distintas propiedades edáficas (CIC, pH actual, pH potencial, MO y contenido de arcilla) de determinación sencilla y habitual en este tipo de laboratorios. Se utilizó el criterio del coeficiente de determinación R<sup>2</sup> (ajustado por el número de variables del modelo), significancia de los coeficientes de regresión parciales y valor del Cp de Mallows. Para el caso de la capacidad buffer alcalina el mejor modelo obtenido fue:

$$b = 0,0813207 - 0,000759628 \text{ MO (g kg}^{-1}\text{)} - 0,000101423 \text{ a (g kg}^{-1}\text{)} \quad R^2 = 89,10 \%$$

El modelo permite constatar la incidencia de la MO y del contenido de arcilla. Sin embargo, la MO presenta un mayor coeficiente de variación que esta última (Tabla 1). Dado el proceso de agriculturización de las últimas décadas de esta región, y en particular la difusión del cultivo de soja (*Glycine max* L Merr), los contenidos de MO han disminuido considerablemente. De manera que sería ésta la variable que desde el

punto de vista práctico estaría condicionando el proceso de acidificación y la necesidad de corrector. A título de ejemplo, si consideramos un aumento de 20 a 30 g kg<sup>-1</sup> de MO, a igualdad de contenido de arcilla, por ejemplo 208,5 g kg<sup>-1</sup> (que es el valor promedio de los suelos estudiados para esta variable), significaría que la pendiente “b” pase de 0,045 a 0,037. Si se repitiera el cálculo para elevar 0,5 unidades de pH una capa arable de 2.000 Mg ha<sup>-1</sup>, esto significaría tener que incrementar la dosis teórica de CaCO<sub>3</sub> de 1.111 a 1.351 kg ha<sup>-1</sup>.

Para el caso de la capacidad buffer ácida el mejor modelo obtenido fue:

$$b = 0,0805806 - 0,000741231 \text{ MO (g kg}^{-1}\text{)} - 0,0000951267 \text{ a (g kg}^{-1}\text{)} \quad R^2 = 95,93 \%$$

El modelo que explica la pendiente de las curvas ácidas incluye a las mismas variables independientes. Los elevados coeficientes de determinación general de ambos modelos propuestos, la significancia estadística de los coeficientes parciales y la sencillez de la determinación de las variables independientes incluidas en ellos, sugieren que su empleo puede ser de ayuda en la toma de decisión de la dosis de enmienda a aplicar y la periodicidad de la práctica del encalado en suelos del ámbito templado argentino.

## CONCLUSIONES

- La evolución del pH de los suelos de la Región Pampeana argentina ensayados ante el agregado de álcali y de ácido se ajustó significativamente por medio de funciones de regresión lineal en todos los casos estudiados.
- Considerando que la recíproca de la pendiente de cada curva alcalina y ácida es la capacidad buffer del suelo, se observó en todos los casos estudiados que el poder regulador alcalino es similar al ácido
- Tanto las curvas de titulación alcalina como de titulación ácida señalan la existencia de suelos cuyo poder amortiguador puede agruparse en 2 categorías de acuerdo a la condición textural, y contenido de materia orgánica y en consecuencia su capacidad de intercambio catiónica.
- Tanto para las curvas de titulación alcalina como para las de titulación ácida pudo establecerse modelos de regresión lineal multivariado con la finalidad de predecir las pendientes de las curvas. Las variables independientes de estos modelos fueron el contenido de materia orgánica y de arcilla.
- Las determinaciones de contenido de materia orgánica y arcilla, de rutina en laboratorios de análisis de suelos y utilizadas para predecir el comportamiento buffer (alcalino y ácido), pueden ser una herramienta simple para la toma de decisión acerca de la dosis a emplear en la práctica del encalado y su periodicidad, previa calibración en condiciones de campo.

## BIBLIOGRAFÍA

Adams, F. and C. E. Evans. 1962. A rapid method for measuring lime requirement of red-yellow podzolic soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 26:355-357

Aitken R., Moody P., McKinley, P. 1990. Lime requirement of acidic Queensland soils. I. Relationships between soil properties and pH buffer capacity. *Australian Journal of Soil Research* 28:695-701.

Blake, L., Goulding, K.W.T., Mott, C.J.B. y A.E. Johnston. 1999. Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100 years under woodlandygrass at Rothamsted Experimental Station, UK. *Eur. J. Soil Science*, 50:401-412.

Burle M.L., Mielniczuck A., Focchi S. 1997. Effect of cropping systems on soils chemical characteristics, with emphasis in soil acidification. *Plant Soil* 190:309-316.

Conti M., Maccarini G., González, M. 1983. Método rápido de corrección de suelos ácidos. *Ci. Suelo (Argentina)* 1:15-20.

Espinosa, J., Molina, E. 1999. *Acidez y encalado de los suelos*. Primera edición. IPNI. 42 p.

Huang P., Zhang J., Zhu A., Zhang C. 2009. Acid and Alkali Buffer Capacity of Typical Fluvor-Aquic Soil in Huang-Huai-Hai Plain. *Agricultural Sciences in China* 8:1378-1383.

Kissel D., Isaac R., Hitchcock R., Sonon L., Vendrell P. 2007. Implementation of soil lime requirement by a single-addition titration method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38:1341-1352.

Limousin G., Tessier D. 2007. Effects of no-tillage on chemical gradients and topsoil acidification. *Soil & Tillage Research* 92:167-174.

Machacha S. 2004. Comparison of laboratory pH buffer methods for predicting lime requirement for acidic soils of eastern Botswana. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35:2675-2687.

Millán G., Vázquez, M., Terminiello A., Santos Sbuscio D. 2010. Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la región pampeana. *Ci. Suelo (Argentina)* 28:131-140.

Mehlich, A. (1976). A new buffer pH method for rapid estimation of exchangeable acidity and lime requirement of soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 7: 637-652

Nelson P., Su N. 2010. Soil pH buffering capacity: A descriptive function and its application to some acidic tropical soils. *Australian Journal of Soil Research*, 48:201-207.

Oorts K., Vanlauwe B., Pleysier J., Merckx R. 2004. A new method for the simultaneous measurement of pH-dependent cation exchange capacity and pH buffering capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1578–1585.

Pellegrini A., Lanfranco J., Millán G., Vázquez M. 2002. Efecto del tratamiento de suelos ácidos sobre el cultivo de alfalfa- XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn, Argentina. *Actas*: 58.

Pellegrini A., Lanfranco J., Millán G., Vázquez M. 2004. Calcio y magnesio en el suelo. Efecto sobre el cultivo de alfalfa. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Argentina. *Actas*: 191. ISBN 987-21419-0-8.

Sá Mendonça E., Rowell D., Martins da Silva, A. 2006. Effect of pH on the development of acidic sites in clayey and sandy loam Oxisol from the Cerrado Region, Brasil. *Geoderma* 132:131-142.

Sadzawka A.R., Carrasco M., Grez R., Mora M., Flores H., Neaman A. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Serie *Actas INIA N°34*. Chile.

SAGPyA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación). Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos (SAMPLA). 1ª ed , Dirección de Producción Agrícola. 2004

Sakala G., Rowell D., Pilbeam C. 2004. Acid–base reactions between an acidic soil and plant residues. *Geoderma* 123:219–232.

Sikora F. 2012. Double-buffer methods revisited with focus on ionic strength and soil/solution ratio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76:718-732.

Shoemaker, H. E., E. O. McLean, and P. F. Pratt. 1961. Buffer methods of determining lime requirements of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25:274-277

Sokolova, T. A., Tolpeshta, I., Rusakova, E. 2016. Contributions of separate reactions to the acid–base buffering of soils in brook floodplains (Central Forest State Reserve). *Eurasian Soil Sci.* 49:399–411.

Tang C. 1998. Factors affecting soil acidification under legumes I. Effect of potassium supply. *Plant Soil* 199:275-282.

Teruggi, M., 1957. The nature and origin of Argentine loess. *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 322-332.

Van Rensburg H., Claassens A., Beukes D. 2009. Relationships between soil buffer capacity and selected soil properties in a resource-poor farming area in the Mpumalanga Province of South Africa. *South African Journal of Plant and Soil* 26:237-243.

Vázquez M. 2005. Calcio y Magnesio del suelo. Encalado y enyesado. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ed. Echeverría H., García F. INTA, Cap. 8, 525 p. ISBN 987-521-192-3.

Vázquez M., Piro A., Millán G., Lanfranco J. 2003. Corrección de suelos ácidos de la Pampa húmeda para la producción de alfalfa. *Revista de la Asociación Argentina de la Producción Animal* 23(2): 69 – 80. (ISSN 326-0550).

Vázquez M., Hernández-Luis F., Benjumea D., Grandoso D., Lemus M., Arbelo C. 2007. Electrokinetic determination of the buffer capacity of Andisols. *Science of the Total Environment* 378:214–217.

Vázquez M., Vasco D., Hernández-Luis F. 2008. Effect of time and electrical potential gradient on the buffer capacity of soils, as measured using an electrokinetic method. *Land Contamination and Reclamation* 16:249-260.

Vázquez, M., Terminiello A., Duhour A., García M., Guilino F. 2009. Efecto de correctores de acidez sobre las propiedades físicas de un Argiudol típico de la pradera pampeana. *Cienc Suelo (Argentina)* 27 (1):67-76.

Vázquez M., Pagani A. 2015. Calcio y Magnesio del suelo. Manejo de fertilización y enmiendas. *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Ed. Echeverría H., García F. INTA, Cap. 11: 317-356. 904 p.

Wang, X., Tang, C., Mahony, S. J . A . Baldock, J., Butterly, C. 2015. Factors affecting the measurement of soil pH buffer capacity: approaches to optimize the methods. *European Journal of Soil Science* 66:53–64.

Xu R., Zhao A., Yuan J., Jiang J. 2012. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars. *J Soils Sediments* 12:494–502.

Zapata Hernández, R. 2004. *Química de la acidez del suelo*. Cali, Colombia. ISBN 958-33-6712-5. 208 p.

## ANEXO TABLAS

Tabla 1. Características generales de los suelos ensayados.

SUELO	pH	pH	CIC	Ca	Mg	MO	a	L	A	Clase textural
	actual	potencial								
				cmolc kg <sup>-1</sup>			g kg <sup>-1</sup>			
Carlos	5,82	4,98	10,8	6,7	0,9	28,7	200	280	520	Fr-A-a
Casares										
González	6,03	4,67	7,6	3,7	0,8	10,6	160	120	720	Fr-A
Moreno										
Bolívar	5,90	4,83	9,1	5,1	1,5	22,5	180	100	720	Fr-A
25 de										
Mayo	5,35	4,70	14,4	7,1	1,7	38,6	250	390	360	Fr
Verónica	5,98	4,86	17,5	10,5	1,6	53,7	220	500	280	Fr
Los										
Hornos	5,90	4,99	18,2	12,6	2,9	37,6	270	510	220	Fr-a
Norberto										
de la	5,27	4,62	12,9	7,0	0,8	30,0	200	200	600	Fr-A
Riestra										
Lincoln	5,76	4,95	16,3	9,9	1,6	35,0	290	310	400	Fr
Bavio	5,77	4,76	22,5	15,4	2,6	36,2	300	520	180	Fr-L-a
Belgrano	5,79	5,04	16,4	11,6	1,3	50,0	200	480	320	Fr
CV (%)	5,7	3,1	30,2	39,2	42,7	37,1	23,4	48,8	44	

Referencias: a: arcilla, L: limo, A: arena, Clase textural: Fr: franco, A: arenoso, a: arcilloso, CV: coeficiente de variación.

Tabla 2: Curvas de titulación alcalina. Comparación de modelos lineales y no lineales\*

<b>Suelo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Coefficiente de determinación (R<sup>2</sup>)(%)</b>
Carlos Casares	Lineal	99,52
	Raíz Cuadrada de Y	99,43
Bolívar	Lineal	99,31
	Raíz Cuadrada de Y	99,20
González Moreno	Lineal	98,26
	Cuadrado de Y	98,66
25 de Mayo	Lineal	99,51
	Raíz Cuadrada de Y	99,40
Verónica	Lineal	99,67
	Cuadrado de Y	99,61
Los Hornos	Lineal	98,44
	Cuadrado de Y	98,63
Norberto de la Riestra	Lineal	99,43
	Cuadrado de Y	99,42
Lincoln	Lineal	99,31
	Cuadrado de Y	99,68
Bavio	Lineal	99,30
	Cuadrado de Y	99,63
Gral. Belgrano	Lineal	99,25
	Raíz Cuadrada de Y	99,24

\*El modelo no lineal de mayor R<sup>2</sup>

Tabla 3: Curvas de titulación ácida. Comparación de modelos lineales y no lineales\*

<b>Suelo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Coefficiente de determinación (R<sup>2</sup>)(%)</b>
Carlos Casares	Lineal	98,95
	Cuadrado de Y	99,16
Bolívar	Lineal	97,72
	Raíz Cuadrada de Y	97,68
González Moreno	Lineal	98,41
	Cuadrado de Y	99,08
25 de Mayo	Lineal	99,33
	Cuadrado de Y	99,41
Verónica	Lineal	99,03
	Exponencial	99,17
Los Hornos	Lineal	98,87
	Cuadrado de Y	99,49
Norberto de la Riestra	Lineal	99,39
	Raíz Cuadrada de Y	99,45
Lincoln	Lineal	99,07
	Cuadrado de Y	99,39
Bavio	Lineal	98,77
	Cuadrado de Y	98,83
Gral. Belgrano	Lineal	99,85
	Raíz Cuadrada de Y	99,80

\*El modelo no lineal de mayor R<sup>2</sup>

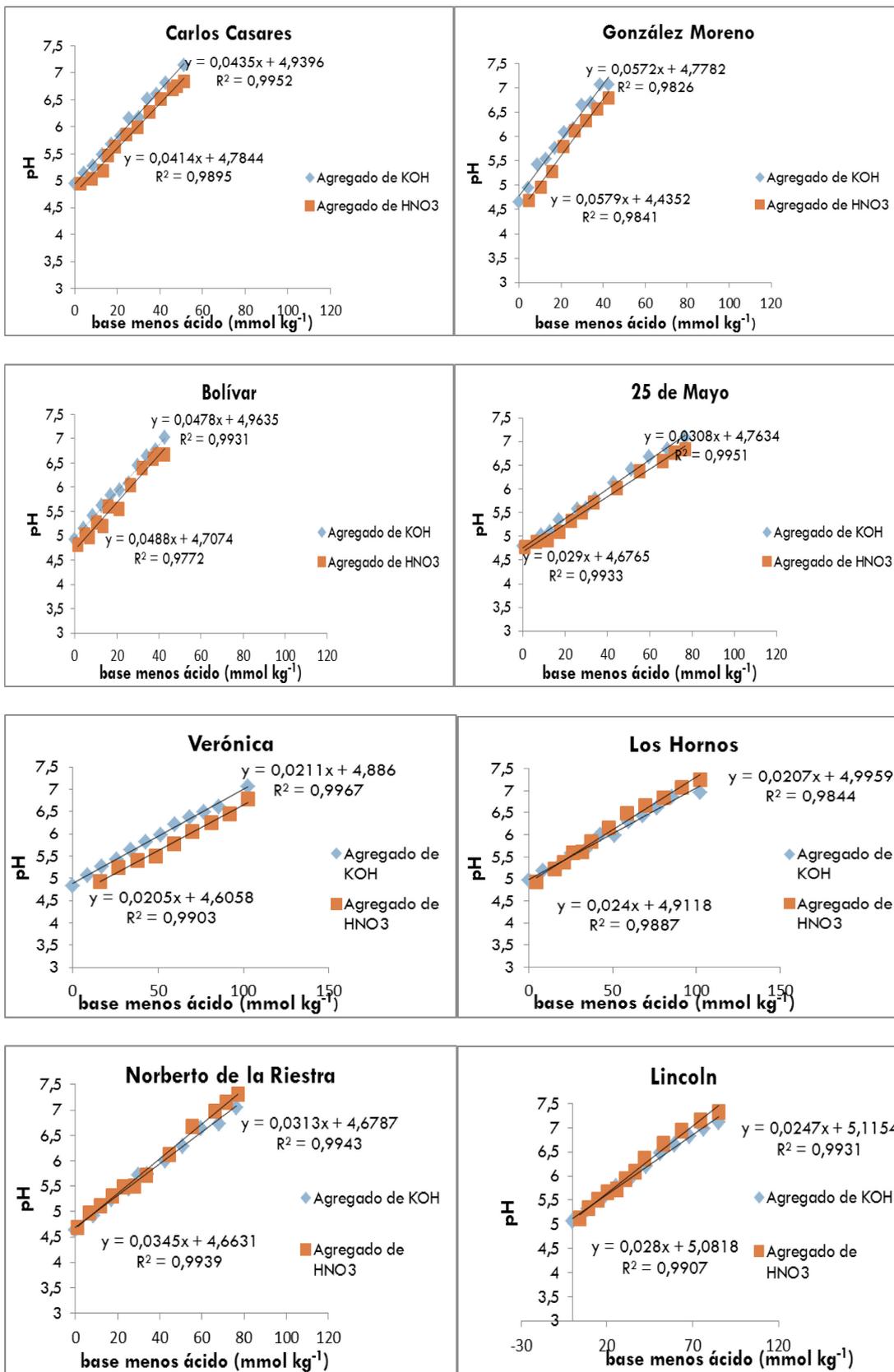
Tabla 4. Pares de suelos cuyas pendientes “b” no tienen diferencias estadísticas significativas en las curvas de titulación alcalina.

<b>Par de suelos</b>	<b>Nivel de confianza</b>
25 de Mayo-N. de la Riestra	p=0,05
Verónica-Los Hornos	
Verónica-Belgrano	
Los Hornos-Belgrano	
Lincoln-Bavio	

Tabla 5. Pares de suelos cuyas pendientes “b” no tienen diferencias estadísticas significativas en las curvas de titulación ácida.

<b>Par de suelos</b>	<b>Nivel de confianza</b>
25 de Mayo-Lincoln	p=0,05
Los Hornos-Belgrano	
Lincoln-Bavio	
Bavio-Belgrano	

## ANEXO GRÁFICOS



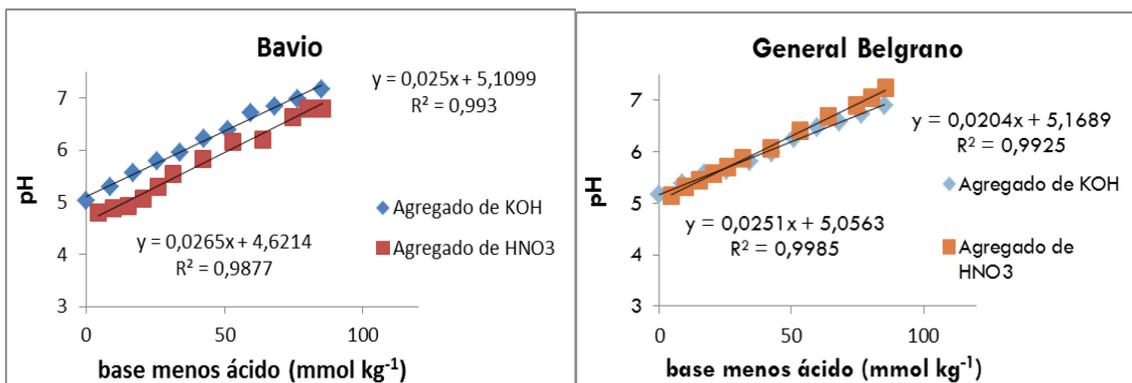


Figura 1. Curvas de titulación alcalina y ácida de los suelos estudiados.

Referencias:  $R^2$ : coeficiente de determinación. Abscisa: en la curva alcalina se consignan los  $\text{mmoles kg}^{-1}$  de KOH agregados, y en la curva ácida los  $\text{mmoles kg}^{-1}$  de KOH –  $\text{mmoles kg}^{-1}$  HNO<sub>3</sub>. Para cada suelo se representa con puntos azules la curva alcalina y con puntos rojos la curva ácida.