

# Efectividad de cales granuladas en el manejo de dos suelos ácidos

Juan Hirzel<sup>1</sup>, Roberto Lecannelier<sup>2</sup>, Emilio Cuevas<sup>2</sup> y Francisco Rodríguez<sup>3</sup>

- La hipótesis de este estudio fue que el uso de  $\text{CaCO}_3$  granulado es una alternativa eficiente para corregir acidez en suelos volcánicos agrícolas.
- Los resultados mostraron que, en suelos Andisoles y Ultisoles, el uso de  $\text{CaCO}_3$  granulado aumentó el pH en forma similar al  $\text{CaCO}_3$  en polvo, pero con el uso de una dosis menor.
- En términos cuantitativos hubo mayor efecto del  $\text{CaCO}_3$  granulado en el suelo Andisol respecto del Ultisol.

## Introducción

La fertilidad de un suelo es un concepto amplio que involucra propiedades físicas, químicas y biológicas (Havlin et al., 1999; Baldi et al., 2006). El uso continuo del suelo sin prácticas de conservación conduce a la pérdida paulatina de sus propiedades; entre ellas, un menor contenido de bases o incremento de la acidez, y de otros nutrientes esenciales como P, N, S y micronutrientes (Hirzel et al., 2007; Hirzel et al., 2010; Castro y Crusciol, 2013). La acidez del suelo está asociada con las concentraciones de Al e  $\text{H}^+$ , y la disponibilidad de bases de intercambio como Ca, Mg, K y Na, las cuales contrarrestan esta acidez (Castro y Crusciol, 2013; Fageria y Nascente, 2014; Fageria et al., 2014; Moreira et al., 2015).

La superficie mundial afectada por la acidez del suelo se estima en 30% del área total cultivada y corresponde a  $4 \times 10^9$  ha (Sumner y Noble, 2003). Esta acidificación es el resultado de varios factores, dentro de los cuales se señalan: la lixiviación de bases (asociada a la pluviometría y el riego); deposición ácida desde la atmósfera (la combustión de derivados del petróleo contamina la lluvia con ácido sulfúrico y nítrico); uso de fertilizantes amoniacales (producción de  $\text{H}^+$  a través del proceso de nitrificación) (Caires et al., 2015); generación de protones en el suelo (derivados del ciclo del C, N, y S); acidez fisiológica (proceso inducido por la planta asociado al consumo de bases y liberación de  $\text{H}^+$  como reemplazo de carga en el suelo); fijación de N en plantas leguminosas (exportación de  $\text{H}^+$  en la zona rizosférica durante el proceso de fijación simbiótica); mineralización de la materia orgánica (MO) (liberación de ácidos orgánicos como resultado del proceso de mineralización); y reducción y oxidación de sulfatos (transformación de sulfatos y sulfuros en pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y luego en ácido sulfúrico) (Fageria y Nascente, 2014).

La acidez del suelo se puede dividir en tres componentes: (a) acidez activa que corresponde a la actividad de los

iones  $\text{H}^+$  en la solución del suelo expresados en una escala logarítmica; (b) acidez intercambiable definida por la cantidad de  $\text{Al}^{3+}$  adsorbida a coloides del suelo; y (c) acidez potencial ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ), que corresponde a la suma de la acidez activa y de la acidez intercambiable (Havlin et al., 1999; Ebeling et al., 2011; Moreira et al., 2015).

La principal estrategia de manejo y control de la acidez es el encalado, es decir la aplicación de carbonato ( $\text{CO}_3$ ) de calcio, el cual además tiene otros beneficios directos, como el incremento en la concentración de bases y nutrientes disponibles como N, P, S y Mo. Además, el encalado mejora la fijación simbiótica de  $\text{N}_2$ , y reduce la disponibilidad de iones que en alta concentración son tóxicos para las plantas como el Al, Fe y Mn (Bachiega et al., 2007; Fageria y Nascente, 2014; Moreira et al., 2015).

Para conseguir una rápida solubilidad y disponibilidad del carbonato, y también dar facilidad de aplicación, se han desarrollado productos granulados que facilitan la aplicación con equipos convencionales de fertilización, y que, en contacto con agua, presentan una rápida solubilidad y control de la acidez.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de dosis crecientes de dos enmiendas calcáreas granulares comerciales en el aumento de pH y concentración de bases, y en la disminución del Al intercambiable y extractable en dos suelos ácidos de la zona sur de Chile. La hipótesis de este estudio fue que el uso de  $\text{CaCO}_3$  granulado es una alternativa eficiente para corregir acidez en suelos volcánicos.

## Materiales y métodos

Los suelos empleados en el experimento fueron colectados a una profundidad de 0 a 20 cm, en el sur de Chile cultivados con rotación de trigo (*Triticum aestivum* L.) y avena (*Avena sativa* L.). El primer suelo colectado fue Andisol con textura franco limosa (Melanudands) ( $39^{\circ}02'18''$  N y  $72^{\circ}30'18''$  O), y el segundo un Ultisol

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Quilamapu. Chillán, Chile  
Correo electrónico: jhirzel@inia.cl

<sup>2</sup> Empresa ANAGRA S.A., Departamento de Desarrollo e Investigación. Santiago, Chile  
Correo electrónico: rlecannelier@anagra.cl, ecuevas@anagra.cl

<sup>3</sup> Universidad del Bío-Bío, Facultad de Educación y Humanidades, Departamento Ciencias de la Educación, Chillán, Chile  
Correo electrónico: frodriguez@ubiobio.cl

(38°59'14" N y 73°02'20" O), con textura franco arcillosa (Rhodudults). La determinación de las propiedades químicas fue realizada de acuerdo a la metodología indicada por la Comisión Nacional de Acreditación de Análisis de Suelo de Chile (Sadzawka et al., 2006). La textura del suelo fue determinada a través del método del hidrómetro de Bouyoucos, la humedad fue determinada por gravimetría expresando los resultados en base a peso seco, y la densidad aparente fue determinada a través del método del cilindro (**Tabla 1**).

El experimento fue desarrollado en condiciones aeróbicas controladas, con incubación de suelos a 25 °C y 80% de la humedad aprovechable, como una modificación del método señalado por Laos et al. (2000). Se emplearon potes plásticos de 500 ml de capacidad, a los cuales se les agregaron 300 g de suelo seco y tamizado a 2 mm, y los tratamientos de enmiendas calcáreas y calcáreas-magnésicas, con reposición de humedad cada 2 días. El periodo de incubación fue de 32 días en una cámara incubadora refrigerada (FOC 225E, Velp Scientifica, Usmate, Italia). Las dosis de cada tratamiento empleado fueron determinadas por regla de tres simple, considerando la masa de cada suelo en los primeros 20 cm de profundidad, ajustando por la densidad aparente específica (**Tabla 1**).

Los tratamientos evaluados fueron:

- 1) Control sin enmienda cálcica (Control).
- 2) CaCO<sub>3</sub> granulado (CaCO<sub>3</sub>-G) (Calciprill® 110-SZ, 91% de CaCO<sub>3</sub>; 2% de MgCO<sub>3</sub> y 5% de H<sub>2</sub>O) en dosis equivalente a 250 kg ha<sup>-1</sup> (CaCO<sub>3</sub>-G 250).
- 3) CaCO<sub>3</sub>-G (Calciprill® 110-SZ) en dosis equivalente a 500 kg ha<sup>-1</sup> (CaCO<sub>3</sub>-G 500).
- 4) CaCO<sub>3</sub>-G (Calciprill® 110-SZ) en dosis equivalente a 1000 kg ha<sup>-1</sup> (CaCO<sub>3</sub>-G 1000).
- 5) CaCO<sub>3</sub>\*MgCO<sub>3</sub> granulado (CaMgCO<sub>3</sub>-G) (Magprill® 90-SZ, 68% de CaCO<sub>3</sub>, 25% de MgCO<sub>3</sub> y 2% de H<sub>2</sub>O) en dosis equivalente a 250 kg ha<sup>-1</sup> (CaMgCO<sub>3</sub>-G 250).

**Tabla 1. Propiedades físico-químicas de los suelos (0 - 20 cm) previo al inicio del experimento.**

Parámetro	Andisol	Ultisol
Arcilla (%)	14.8	37.9
Limo (%)	52.1	32.5
Arena (%)	33.1	29.6
Humedad gravimétrica a 0.33 bares	26.8	27.4
Humedad gravimétrica a 15.00 bares	13.7	17.2
Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	0.85	1.05
pH <sub>(suelo:agua 1:5)</sub>	5.55	5.66
MO (g kg <sup>-1</sup> )	186.0	88.0
N disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	62.7	28.8
P Olsen (mg kg <sup>-1</sup> )	25.2	24.3
K intercambiable (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	0.85	0.42
Ca intercambiable (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	5.09	5.23
Mg intercambiable (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	1.20	1.01
Na intercambiable (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	0.07	0.10
Suma de bases de intercambio (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	7.21	6.76
Al intercambiable (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	0.130	0.126
Saturación de Al (%)	1.77	1.83
Fe disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	104.4	44.3
Mn disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	20.7	31.5
Zn disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	1.3	0.6
Cu disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	1.8	1.4
B disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	0.4	0.5
S disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	24.3	29.6

**Tabla 2. Grado de fineza y solubilidad de las enmiendas calcáreas y calcáreas-magnésicas empleadas.**

Grado de fineza mm	Distribución de partículas dentro de cada grado de fineza, %			
	CaCO <sub>3</sub> -G	CaMgCO <sub>3</sub> -G	CaCO <sub>3</sub> polvo	CaMgCO <sub>3</sub> polvo
> 4	44.20	11.20	0.00	0.00
3.9 - > 2	55.41	86.91	0.94	0.10
1.9 - > 1	0.17	1.00	1.04	0.42
0.9 - > 0.5	0.11	0.71	2.00	3.96
0.49 - > 0.25	0.07	0.08	72.18	31.12
< 0.25	0.04	0.10	23.84	64.40
Solubilidad (g l <sup>-1</sup> )*	0.5	0.3	0.2	0.2

\* Gramos por litro en agua destilada a 17 °C.

**Tabla 3. Niveles de significancia para los parámetros evaluados en el experimento.**

Parámetro	Suelo S	Tratam. F	Interacción S*F
pH	**	**	*
Ca (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	**	**	*
Mg (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	**	**	*
K (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	**	ns	**
Na (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	**	ns	ns
SB* (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	**	**	**
Al int** (cmol <sub>+</sub> kg <sup>-1</sup> )	**	**	**
Sat. Al*** (%)	**	**	**
Al ext**** (mg kg <sup>-1</sup> )	**	**	**

\* SB: Suma de bases (Ca + Mg + K + Na)

\*\* Al int: Al de intercambio

\*\*\* Sat. Al: Saturación de Al = [Al/(SB + Al)] \* 100

\*\*\*\* Al ext: Al extractable

- 6) CaMgCO<sub>3</sub>-G (Magprill® 90-SZ) en dosis equivalente a 500 kg ha<sup>-1</sup> (CaMgCO<sub>3</sub>-G 500).
- 7) CaMgCO<sub>3</sub>-G (Magprill® 90-SZ) en dosis equivalente a 1000 kg ha<sup>-1</sup> (CaMgCO<sub>3</sub>-G 1000).
- 8) CaCO<sub>3</sub> polvo (Soprocal®, 91% de CaCO<sub>3</sub> y 0,5% de H<sub>2</sub>O) en dosis equivalente a 1000 kg ha<sup>-1</sup> (CaCO<sub>3</sub> 1000).
- 9) CaCO<sub>3</sub>\*MgCO<sub>3</sub>(CaMgCO<sub>3</sub>) polvo (Dolomita comercial, 58% de CaCO<sub>3</sub>, 37% de MgCO<sub>3</sub> y 1% de H<sub>2</sub>O) en dosis equivalente a 1000 kg ha<sup>-1</sup> (CaMgCO<sub>3</sub> 1000).

La fineza (mallaje) y solubilidad de cada una de las enmiendas calcáreas que se utilizó se indica en la **Tabla 2**. Las enmiendas de CaCO<sub>3</sub> y CaMgCO<sub>3</sub> en polvo presentaron una proporción mayor a 95% de partículas < 1 mm, en tanto las enmiendas de CaCO<sub>3</sub>-G y CaMgCO<sub>3</sub>-G (granuladas) presentaron una proporción mayor a 98% de granulometría > 2 mm (**Tabla 2**). La mayor solubilidad en agua destilada se presentó en CaCO<sub>3</sub>-G seguido de CaMgCO<sub>3</sub>-G, y la menor solubilidad se presentó en las enmiendas calcáreas en polvo (**Tabla 2**).

Después de la aplicación de cada tratamiento se mezcló homogéneamente el suelo dentro de cada pote. Cada tratamiento contó con tres réplicas. Los parámetros analizados al término de la incubación, fueron pH al agua, concentración de Ca, Mg, K, Na y Al intercambiable, suma de bases (SB) (Ca + Mg + K + Na intercambiables), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe = SB + Al intercambiable), saturación de Al (Al intercambiable/CICe \* 100) y Al extractable. Los análisis químicos fueron realizados de acuerdo a la metodología indicada por la Comisión Nacional de Acreditación de Análisis de Suelo de Chile (Sadzawka et al., 2006).

El diseño experimental fue de parcelas divididas, donde la parcela principal fue el suelo y la sub-parcela el tratamiento

de enmienda calcárea. Los resultados fueron sometidos a análisis de varianza y las diferencias de medias fueron analizadas con el test de Tukey para un 5% de significancia. Se incluyó también un análisis de regresión para las asociaciones Al extractable-pH, Saturación de Al-pH y pH-SB. Para todos estos análisis se empleó el software SAS System versión 6.0 (SAS Institute, 1989). Para estimar el poder relativo neutralizante total (PRNT) de los productos CaCO<sub>3</sub>-G y CaMgCO<sub>3</sub>-G en cada suelo se evaluó el aumento de pH logrado con las dosis equivalentes a 1000 kg ha<sup>-1</sup>, respecto del control y respecto del aumento logrado con el uso de CaCO<sub>3</sub> comercial de referencia (presentación en polvo). La fórmula de cálculo para estimar el PRNT se presenta en la siguiente ecuación (**Ec. 1**):

$$\text{PRNT} = \frac{[(\text{pH tratamiento}(1000 \text{ kg ha}^{-1}) - \text{pH control}) / (\text{pH CaCO}_3 \text{ polvo}(1000 \text{ kg ha}^{-1}) - \text{pH control})] \times 100}{\text{Ec. 1}}$$

## Resultados y discusión

### Características de acidez de cada suelo evaluado

Los suelos Andisol y Ultisol empleados presentaron un nivel moderado y levemente ácido de pH, respectivamente (**Tabla 1**), y en ambos casos una saturación de Al<sup>+3</sup> sin limitación para la mayoría de las plantas cultivadas (Havlin et al., 1999). Esta baja saturación de Al<sup>+3</sup> está asociada a la suma de bases moderada presentada en ambos suelos (**Tabla 1**), la cual permite contrarrestar el efecto del Al intercambiable en el suelo (Fageria y Nascente, 2014).

### Análisis de significancia

Se observó un efecto altamente significativo de cada suelo sobre todos los parámetros evaluados ( $p < 0.01$ ) (**Tabla 3**). Los tratamientos de enmiendas calcáreas afectaron todos los parámetros evaluados ( $p < 0.01$ ), excepto las concentraciones de K y Na intercambiable ( $p > 0.05$ ). Las interacciones entre suelos y tratamientos también fueron significativas ( $p < 0.05$ ) para todos los parámetros evaluados, excepto para el Na intercambiable ( $p > 0.05$ ), lo cual indica un comportamiento diferente de cada suelo frente a los tratamientos evaluados. Por tanto, para separar el efecto significativo del suelo y de la interacción Suelo x Tratamiento, se evaluó el efecto de las enmiendas calcáreas en cada suelo por separado como un diseño de bloques al azar.

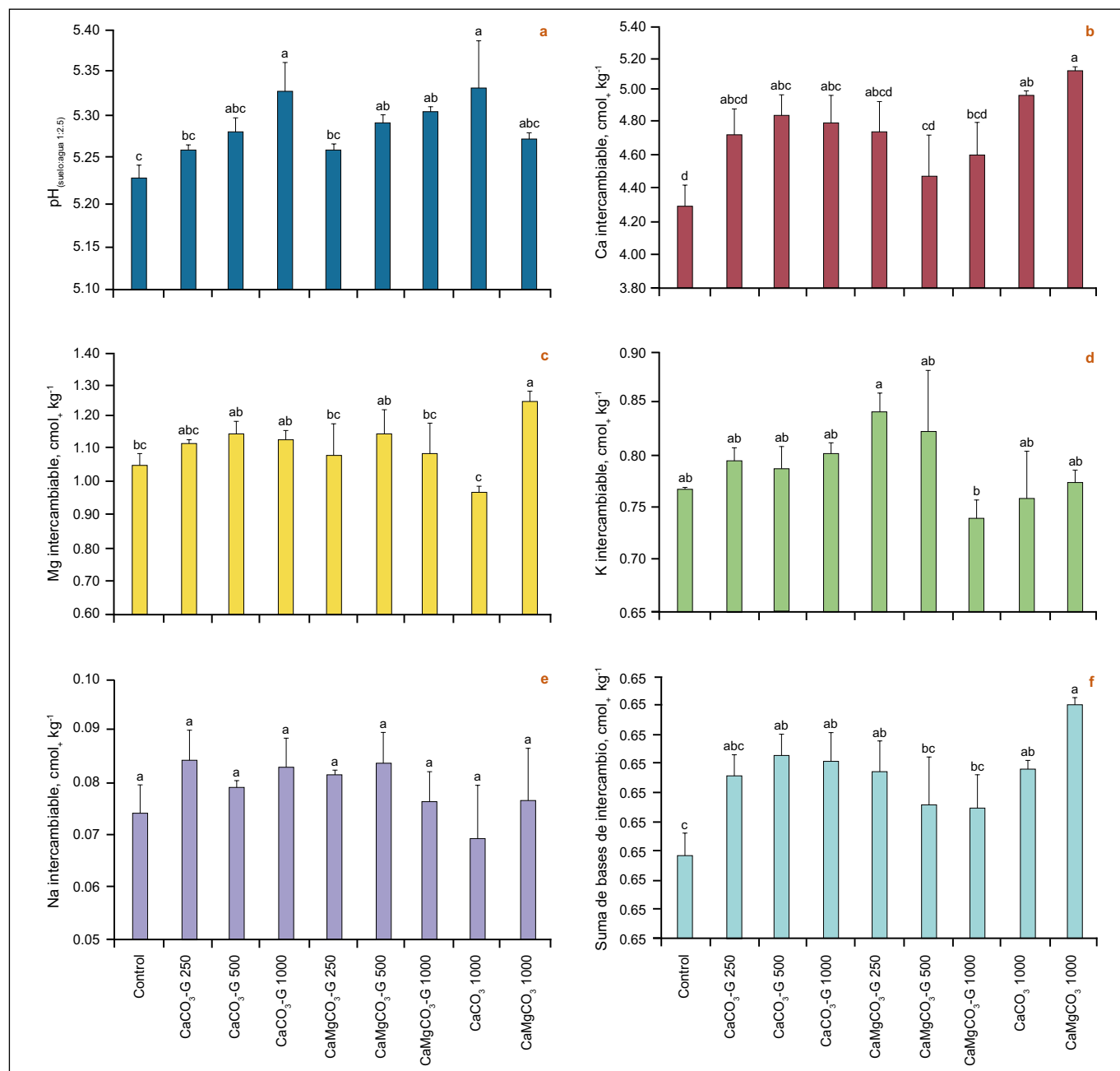
### Suelo Andisol

En general, el pH obtenido en todos los tratamientos al término del periodo de incubación fue inferior en relación al valor inicial (**Tabla 1 y Figura 1a**). Al respecto, se ha descrito que el proceso de mineralización de la MO presente en el suelo durante un periodo de incubación, libera ácidos orgánicos y protones H<sup>+</sup>, los cuales contribuyen a reducir el pH respecto del valor inicial (Fageria y Nascente, 2014), y este efecto es particularmente mayor en un suelo Andisol asociado su alto contenido de MO. El pH del suelo presentó un incremento cuantitativo directamente proporcional a las dosis de enmiendas calcáreas empleadas, excepto con el

uso de  $\text{CaMgCO}_3$  1000 (Figura 1a) y un alto error estándar en algunas medias. Los tratamientos que lograron el mayor pH y que a su vez superaron al control fueron  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  1000,  $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$  500,  $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$  1000 y  $\text{CaCO}_3$  1000 ( $p < 0.05$ ) (Figura 1a). A su vez, el pH obtenido con el uso de  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  500 y  $\text{CaMgCO}_3$  1000 fue similar al logrado con los tratamientos antes mencionados. Estos resultados indican que el uso de  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  y  $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$  ambos en dosis de 500  $\text{kg ha}^{-1}$ , permiten lograr el mismo pH que se obtuvo con la cal de referencia comercial ( $\text{CaCO}_3$ ) en dosis de 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ . Este efecto puede estar explicado por la mayor solubilidad y reactividad de ambas enmiendas calcáreas granuladas, como ha sido reportado por Castro

y Cruciol (2013).

La concentración de Ca intercambiable (Figura 1b) también presentó un incremento cuantitativo directamente proporcional a las dosis de enmiendas calcáreas empleadas, sin embargo, sólo el uso de  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  en dosis de 500 y 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , y el uso de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaMgCO}_3$  en polvo (ambas en dosis de 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ ) lograron superar al control ( $p < 0.05$ ). Este incremento está asociado a la solubilidad y dosis empleadas de las enmiendas calcáreas granuladas y en polvo. Resultados similares han sido reportados por Castro y Cruciol (2013) y Moore y Quimet. (2014).



**Figura 1. Propiedades químicas del suelo Andisol al término del periodo de incubación en condiciones aeróbicas controladas (25 °C y 80% humedad aprovechable): a) pH, b) Ca intercambiable, c) Mg intercambiable, d) K intercambiable, e) Na intercambiable, f) suma de bases, g) Al intercambiable, h) saturación de Al, y i) Al extractable. Letras distintas sobre las barras indican diferencia significativa según el test de Tukey ( $p < 0.05$ ). Líneas verticales sobre las barras indican el error estándar.  $\text{CaCO}_3\text{-G}$ :  $\text{CaCO}_3$  granulado en dosis de 250, 500 y 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ ;  $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$  250:  $\text{CaMgCO}_3$  granulado en dosis de 250, 500 y 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ ;  $\text{CaCO}_3$  1000:  $\text{CaCO}_3$  polvo en dosis de 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ ;  $\text{CaMgCO}_3$  1000:  $\text{CaCO}_3$  polvo en dosis de 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ .**

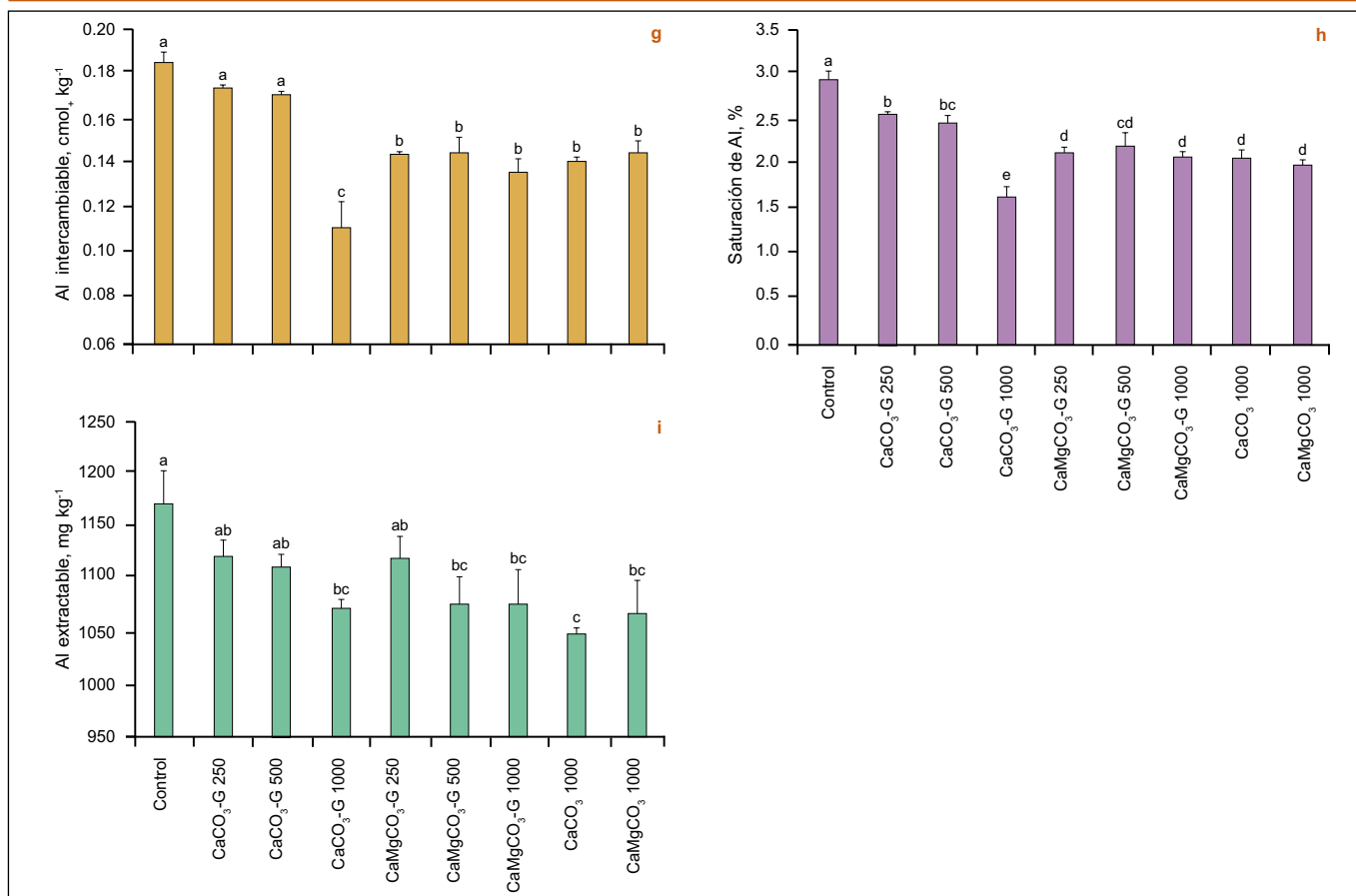


Figura 1. Continuación ...

Para la concentración de Mg intercambiable (**Figura 1c**) se observó un aumento cuantitativo asociado a la dosis empleada en la mayoría de las enmiendas calcáreas que aportan este elemento (CaCO<sub>3</sub>-G, CaMgCO<sub>3</sub>-G y CaCO<sub>3</sub> polvo). No obstante, sólo el uso de CaMgCO<sub>3</sub> polvo (1000 kg ha<sup>-1</sup>) logró superar la concentración de Mg intercambiable del control, probablemente asociado a la dosis de Mg aplicada (37% de MgCO<sub>3</sub>). Incrementos en la concentración de Mg con el uso de cal dolomítica han sido también reportados por Bachiega et al. (2007) y Moore y Ouimet (2014). También hubo una reducción de la concentración de Mg intercambiable en algunos tratamientos respecto del valor inicial (**Tabla 1**). Esta reducción fue más pronunciada con el uso de CaCO<sub>3</sub> 1000, probablemente asociado a la competencia Ca-Mg y a la reducción del pH (generación de H<sup>+</sup>) producto de los procesos de mineralización de MO (Fageria y Nascente, 2014).

La concentración de K intercambiable (**Figura 1d**) sólo presentó diferencias entre los tratamientos CaMgCO<sub>3</sub>-G 250 y CaMgCO<sub>3</sub>-G 1000, siendo mayor en el primero de éstos (p < 0.05). En general, la aplicación de dosis crecientes de enmiendas calcáreas genera una reducción en la concentración de K intercambiable del suelo, asociado a procesos de intercambio de cationes (Havlin et al., 1999; Bachiega et al., 2007; Moore y Ouimet, 2014). Esta reducción fue también observada en la mayoría de los tratamientos respecto del valor inicial del suelo (**Tabla 2**). En contraste a lo anterior, Castro y Cruciol

(2013) indican un incremento en la concentración de K intercambiable sólo en la zona superficial de un suelo oxisol ácido de Brasil, después de 18 meses de aplicadas dos enmiendas calcáreas (silicato de Ca y dolomita).

Para la concentración de Na intercambiable (**Figura 1e**) no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (p < 0.05), probablemente asociado al alto error estándar obtenido. A su vez, las concentraciones de Na fluctuaron entre 0.07 y 0.08 cmol<sub>+</sub> kg<sup>-1</sup> (**Figura 1e**), lo cual fue muy similar a la concentración inicial presente en el suelo (**Tabla 1**). Moore y Ouimet (2014) reportaron resultados similares.

La SB (**Figura 1f**) presentó un comportamiento muy similar al obtenido para el Ca intercambiable (**Figura 1b**), dado que el Ca es el principal catión en términos cuantitativos en la SB de este suelo Andisol (70.6% de la SB) (**Tabla 1**). La mayor SB se obtuvo en los tratamientos CaMgCO<sub>3</sub> polvo, CaCO<sub>3</sub> polvo, CaCO<sub>3</sub>-G 500, CaCO<sub>3</sub>-G 1000 y CaMgCO<sub>3</sub>-G 250 (**Figura 1f**), que fueron mayores al control (p < 0.05). A su vez, llama la atención la diferencia obtenida entre el control y el uso de CaMgCO<sub>3</sub>-G 250 por la baja dosis de enmienda empleada, probablemente asociado al error estándar obtenido. Incrementos en la SB frente al uso de enmiendas calcáreas han sido también reportados por Castro y Cruciol (2013).

El Al de intercambio (**Figura 1g**) presentó una concentración inferior al control (p < 0.05) sólo con el uso de CaCO<sub>3</sub>-G 1000, CaMgCO<sub>3</sub>-G en todas sus dosis, CaCO<sub>3</sub>

polvo y  $\text{CaMgCO}_3$  polvo. La menor concentración de Al se logró con el uso de  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  1000, que a su vez fue inferior a los valores obtenidos con  $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$  en todas sus dosis,  $\text{CaCO}_3$  polvo y  $\text{CaMgCO}_3$  polvo ( $p < 0.05$ ). El uso de  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  en dosis de 250 y 500  $\text{kg ha}^{-1}$  no logró diferir del control ( $p > 0.05$ ), probablemente asociado a la dosis empleada y al menor poder corrector de la acidez que presenta el Ca respecto del Mg, como ha sido señalado por Fageria y Nascente (2014). Reducciones en la concentración de Al de intercambio asociado al encalado de suelo han sido reportadas también por Caires et al. (2015), con un efecto significativo hasta 40 cm de profundidad.

La saturación de Al (Figura 1h) presentó un comportamiento similar al observado en el Al de intercambio (Figura 1g). Todos los tratamientos lograron reducir la saturación de Al respecto del control ( $p < 0.05$ ), sin embargo el menor valor se logró con el uso de  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  1000, probablemente asociado a la mayor solubilidad respecto de las enmiendas de referencia (Tabla 2). Un aumento en la saturación de Al respecto del valor inicial (Tabla 1) fue observado principalmente en el control, y en algunos tratamientos con baja y moderada dosis de enmienda cálcica, asociado a la generación de acidez con el proceso de incubación de suelo (Fageria y Nascente, 2014), anteriormente ya discutido.

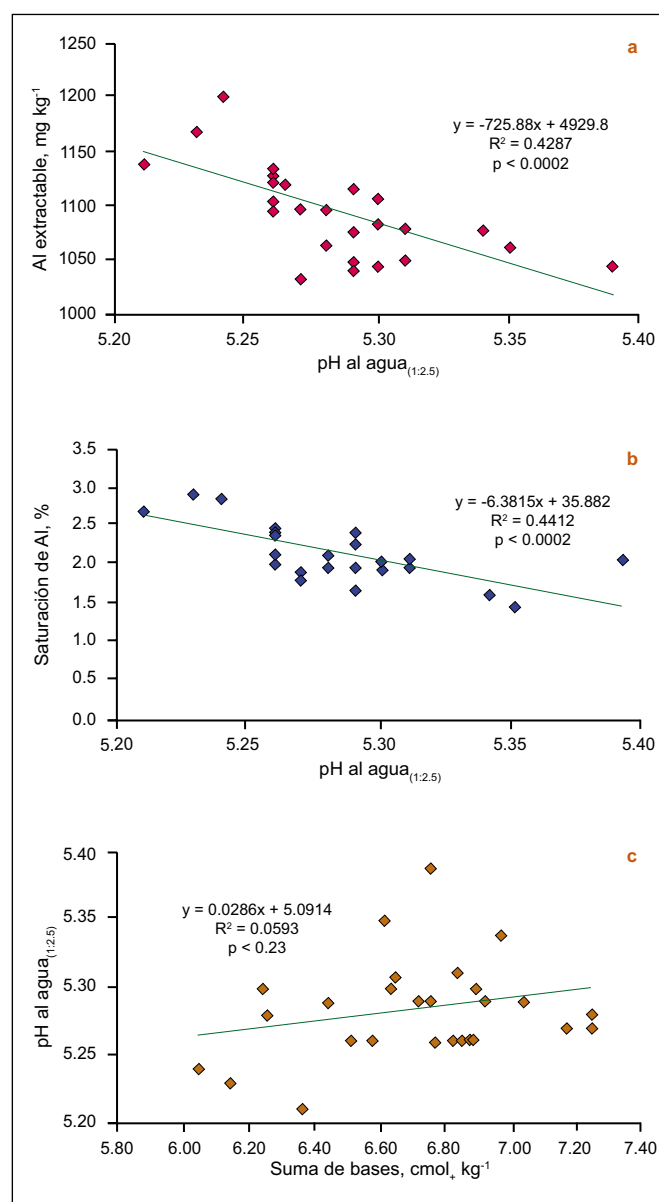
Para el Al extractable (Figura 1i), la menor concentración se obtuvo con el uso de  $\text{CaCO}_3$  1000 (polvo),  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  1000,  $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$  250 y 500, y  $\text{CaMgCO}_3$  1000 (polvo), que fueron diferentes del control ( $p < 0.05$ ) (Figura 1i). Se habría esperado un efecto similar al obtenido en el Al de intercambio (Figura 1g), sin embargo el Al extractable presentó un relación más estrecha con las dosis de enmiendas calcáreas utilizadas (Figura 1i).

Las relaciones Al extractable-pH y saturación de Al-pH fueron inversamente proporcionales, altamente significativas y con coeficientes de determinación moderados que validan el modelo lineal planteado (Figuras 2a y 2b), mostrando la dependencia entre estas variables en este suelo Andisol. En contraste, no hubo correlación lineal entre el pH y la SB para este suelo (Figura 2c). Lo anterior puede estar explicado porque el pH determinado en este experimento (pH al agua) es una medida de la acidez activa del suelo (actividad de los iones  $\text{H}^+$  en la solución del suelo), en tanto que la SB tiene mayor relación con la acidez potencial ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ) (Havlin et al., 1999; Ebeling et al., 2011; Moreira et al., 2015). Como ejemplo de lo anterior, Fageria y Nascente (2014) presentan un estudio descriptivo y comparativo de suelos desde dos valles de Brasil, en los cuales el pH al agua es similar (5.2 y 5.3), en tanto que la saturación de bases (SB/capacidad de intercambio catiónico \* 100) es muy diferente (17% y 50%, respectivamente).

### Suelo Ultisol

Al igual que en el suelo Andisol (Figura 1a), para el suelo Ultisol se observó un incremento de pH directamente

proporcional a las dosis de las enmiendas calcáreas empleadas (Figura 3a). No obstante, en el suelo Ultisol se obtuvo un aumento de pH respecto al control mayor al observado en el suelo Andisol (Figuras 1a y 3a), asociada a la diferencia de capacidad tampón de cada suelo (Havlin et al., 1999; Fageria y Nascente, 2014) (Tabla 1 y Tabla 3). Los tratamientos que lograron el mayor pH y que a su vez superaron al control fueron  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  500 y 1000,  $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$  1000,  $\text{CaCO}_3$  1000, y  $\text{CaMgCO}_3$  1000 ( $p < 0.05$ ) (Figura 3a). A su vez, el pH obtenido con el uso de  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  en dosis de 500 y 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , y  $\text{CaMgCO}_3$  en dosis de 500 y 1000  $\text{kg ha}^{-1}$  fue similar al logrado con  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaMgCO}_3$  en polvo, ambos en dosis de 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ . Estos resultados indican que el uso de  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  y  $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$ , ambos en dosis de 500  $\text{kg ha}^{-1}$ , permiten lograr el mismo pH que se obtuvo con la cal de referencia comercial ( $\text{CaCO}_3$ ) en dosis de 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , efecto anteriormente discutido.



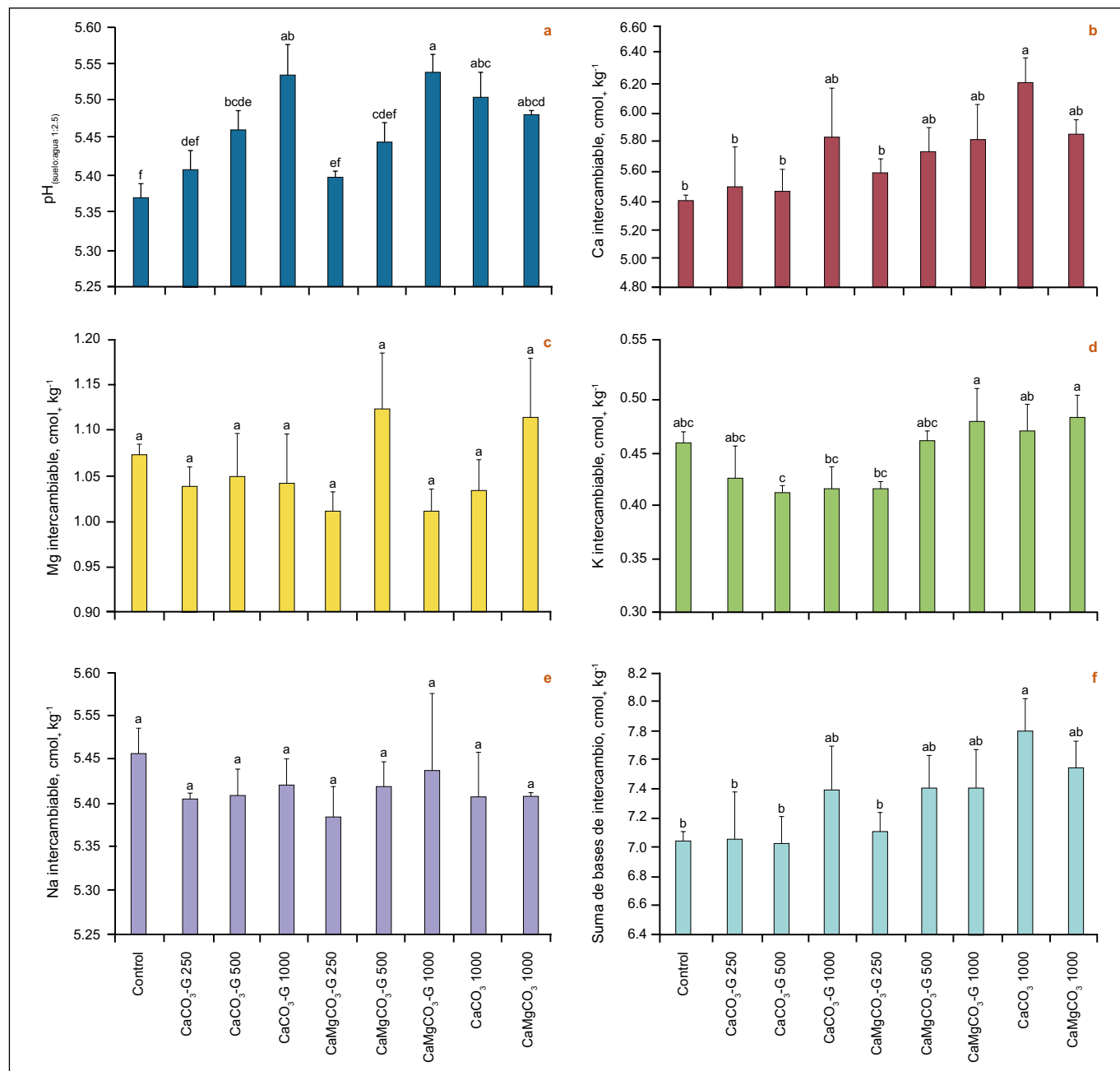
**Figura 2. Regresiones lineales entre: a) Al extractable-pH, b) saturación de Al-pH, y c) pH-suma de bases, en el suelo Andisol al término del periodo de incubación en condiciones aeróbicas controladas (25 °C y 80% humedad aprovechable).**

La mayor concentración de Ca intercambiable (**Figura 3b**) se obtuvo con el uso de  $\text{CaCO}_3$  1000, que sólo superó al control y a las enmiendas  $\text{CaCO}_3$ -G en dosis de 250 y 500  $\text{kg ha}^{-1}$ , y  $\text{CaMgCO}_3$ -G en dosis de 250  $\text{kg ha}^{-1}$  ( $p < 0.05$ ). Al respecto, Moore y Ouimet (2014) reportaron que no hubo diferencia significativa en las concentraciones de Ca intercambiable en la zona superficial de un suelo franco arenoso de uso forestal en Canadá, después de 15 años de la aplicación de  $\text{CaMgCO}_3$  (22% de Ca y 12% de Mg) en dosis de 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ .

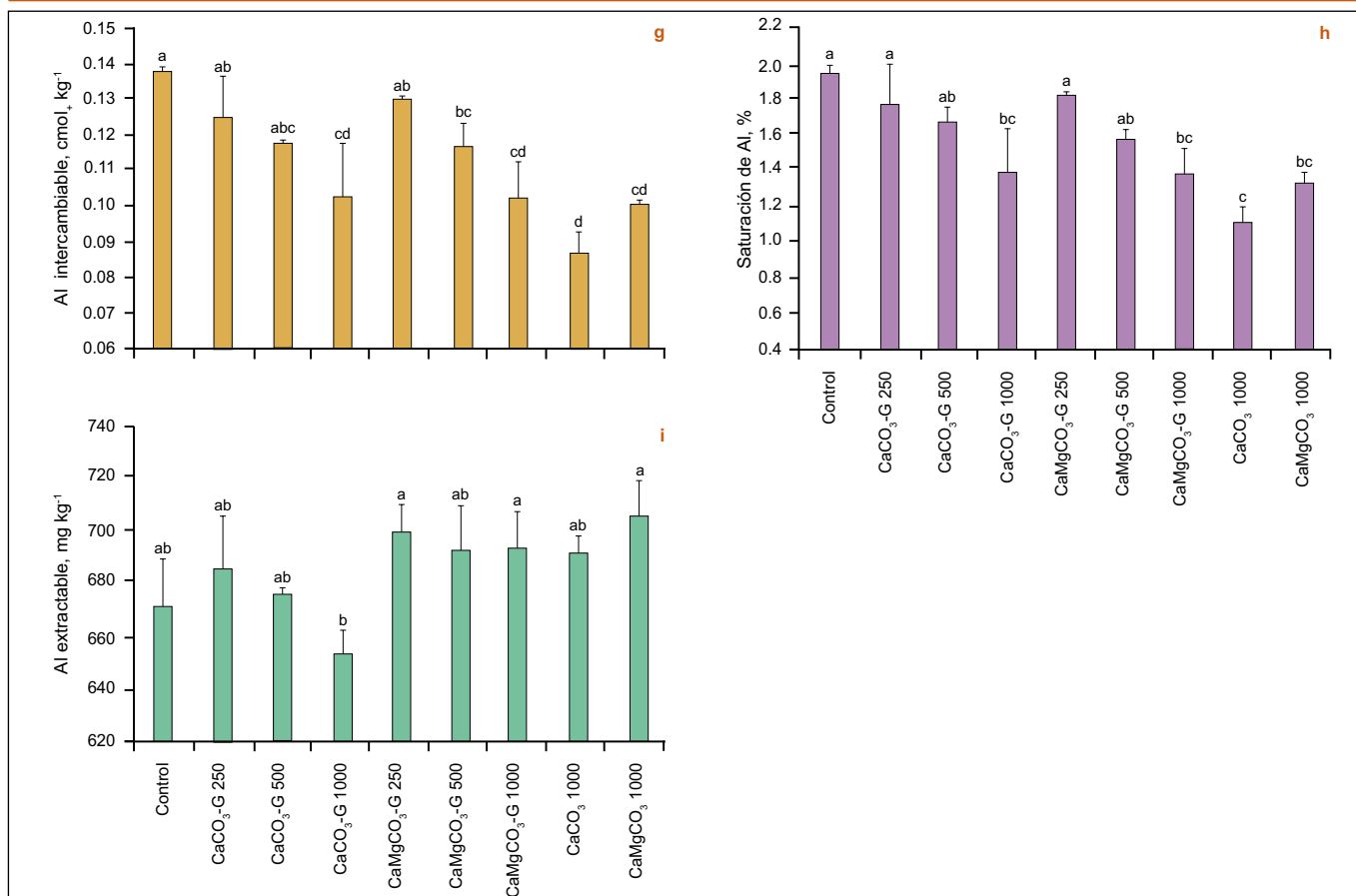
El Mg intercambiable (**Figura 3c**) no presentó diferencias entre tratamientos ( $p > 0.05$ ). En general, con el uso de enmiendas calcáreas que aportaron Mg en cantidades

considerables ( $\text{CaMgCO}_3$ -G y  $\text{CaMgCO}_3$  en polvo en dosis de 500 y 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente), se observó un incremento cuantitativo de la concentración de Mg intercambiable respecto del valor inicial (**Tabla 1 y Figura 3c**). Sin embargo, no se observó dicho incremento con el uso de  $\text{CaMgCO}_3$ -G en dosis de 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ .

La concentración de K intercambiable (**Figura 3d**) fue mayor en los tratamientos  $\text{CaMgCO}_3$ -G 1000 y  $\text{CaMgCO}_3$  1000, que sólo superaron a  $\text{CaCO}_3$ -G 500,  $\text{CaCO}_3$ -G 1000 y  $\text{CaMgCO}_3$ -G 250 ( $p < 0.05$ ). A su vez, los valores obtenidos fueron similares al valor inicial del suelo (**Tabla 1**). En este suelo no se observó la reducción en la concentración de K constatada en el suelo Andisol (**Figura 1d**), atribuida



**Figura 3. Propiedades químicas en el suelo Ultisol al término del periodo de incubación en condiciones aeróbicas controladas (25 °C y 80% humedad aprovechable); a) pH, b) Ca intercambiable, c) Mg intercambiable, d) K intercambiable, e) Na intercambiable, f) suma de bases de intercambio, g) Al intercambiable, h) saturación de Al, i) Al extractable. Letras distintas sobre las barras indican diferencia significativa según test de Tukey ( $p < 0.05$ ). Líneas verticales sobre las barras indican el error estándar.  $\text{CaCO}_3$ -G:  $\text{CaCO}_3$  granulado en dosis de 250, 500 y 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ ;  $\text{CaMgCO}_3$ -G 250:  $\text{CaMgCO}_3$  granulado en dosis de 250, 500 y 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ ;  $\text{CaCO}_3$  1000:  $\text{CaCO}_3$  polvo en dosis de 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ ;  $\text{CaMgCO}_3$  1000:  $\text{CaCO}_3$  polvo en dosis de 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ .**



**Figura 3. Continuación ...**

a procesos de competencia e intercambio de cationes (Havlin et al., 1999; Bachiega et al., 2007). Dado que las mayores concentraciones de K obtenidas en algunos tratamientos con enmiendas calcáreas fueron similares al control ( $p > 0.05$ ), tampoco se puede inferir efectos de las enmiendas sobre aumentos en este nutriente, como fue reportado por Castro y Cruciol (2013) para un suelo Oxisol ácido de Brasil.

Para el Na intercambiable (**Figura 3e**) y al igual que lo ocurrido en el suelo Andisol (**Figura 1e**), tampoco se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ( $p < 0.05$ ). Resultados similares son reportados por Moore y Ouimet (2014). A su vez, las concentraciones de Na obtenidas fluctuaron entre 0.11 y 0.12  $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$  (**Figura 1e**), valores levemente superiores a la concentración inicial en el suelo (**Tabla 1**).

Para la SB (**Figura 3f**) se presentó el mismo comportamiento observado en el suelo Andisol (**Figura 1f**), asociado al Ca intercambiable (**Figura 3b**) y porcentaje de Ca sobre la SB (77.4%) (**Tabla 1**). La mayor SB se obtuvo en el tratamiento CaCO<sub>3</sub> polvo (**Figura 3f**) que superó al control y a los tratamientos CaCO<sub>3</sub>-G 250, CaCO<sub>3</sub>-G 500 y CaMgCO<sub>3</sub> ( $p < 0.05$ ).

El Al de intercambio (**Figura 3g**) presentó una concentración inferior al control ( $p < 0.05$ ) sólo con el uso de CaCO<sub>3</sub>-G 1000, CaMgCO<sub>3</sub>-G en dosis de 500 y 1000  $\text{kg ha}^{-1}$ , CaCO<sub>3</sub> y CaMgCO<sub>3</sub>. Estos resultados fueron similares a lo obtenido en el suelo Andisol (**Figura 1g**). El uso de

CaCO<sub>3</sub>-G en dosis de 250 y 500  $\text{kg ha}^{-1}$ , y de CaMgCO<sub>3</sub>-G en dosis de 250  $\text{kg ha}^{-1}$  no difirieron del control ( $p > 0.05$ ), efecto anteriormente discutido y asociado tanto a la dosis usada como al menor poder de neutralización del Ca respecto del Mg (Fageria y Nascente, 2014).

La saturación de Al<sup>+3</sup> (**Figura 3h**), al igual que en el suelo Andisol (**Figura 1h**), también presentó un comportamiento similar al observado en el Al de intercambio (**Figura 3g**). Sin embargo, sólo los tratamientos de 1000  $\text{kg ha}^{-1}$  de enmienda calcárea redujeron significativamente la saturación de Al respecto del control ( $p < 0.05$ ). Para el Al extractable (**Figura 3i**), pocas diferencias significativas fueron detectadas entre tratamientos, probablemente asociado al alto error estándar de cada media. A diferencia de lo obtenido para el suelo Andisol (**Figura 1i**), sólo se observó una tendencia inversamente proporcional entre el uso de CaCO<sub>3</sub>-G en dosis crecientes y la concentración de Al extractable (**Figura 3i**). Sin embargo, se habría esperado una reducción del Al extractable frente a la aplicación de las enmiendas calcáreas evaluadas en sus diferentes dosis, como ocurrió en el suelo Andisol (**Figura 1i**), situación que no ocurrió en este suelo Ultisol (**Figura 3i**). Dicho efecto podría ser explicado por la alta capacidad tampón de este suelo Ultisol, asociado a su alto contenido de arcilla (**Tabla 1**) (Havlin et al., 1999; Fageria y Nascente, 2014).

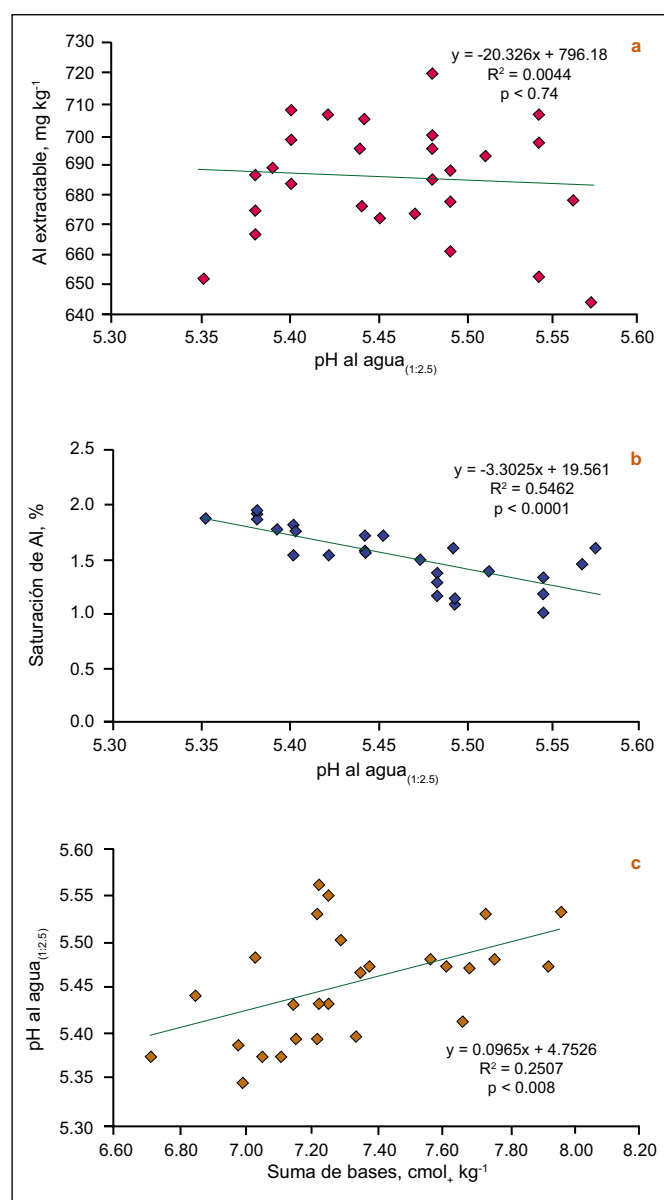
Para las relaciones matemáticas lineales simples entre Al extractable-pH, saturación de Al-pH, y pH-SB, sólo se observó una relación inversamente proporcional y



altamente significativa para la relación saturación de Al-pH, con un coeficiente de determinación moderado (Figura 4a, 4b y 4c). A diferencia del suelo Andisol (Figura 2a), no se observó la relación inversamente proporcional entre Al extractable-pH (Figura 4a), efecto asociado a las pocas diferencias detectadas para el Al extractable cuando se comparó entre tratamientos (Figura 3i), y que podría estar explicado por el contenido de arcilla (Tabla 1) y su efecto sobre la capacidad tampón de este suelo Ultisol (Havlin et al., 1999; Fageria y Nascente, 2014). Al igual que en el suelo Andisol (Figura 2c), aunque con efecto significativo, no hubo correlación lineal entre el pH y la SB para el suelo Ultisol (Figura 4c), efecto anteriormente discutido.

### Poder relativo neutralizante total (PRNT)

Para el suelo Andisol los valores estimados de PRNT en las enmiendas  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  y  $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$  fueron 1.11 y 1.03, respectivamente (Figura 1a). En el suelo Ultisol, los valores



**Figura 4.** Regresiones lineales entre (a) Al extractable-pH, (b) saturación de Al-pH, y (c) pH-suma de bases, en el suelo Ultisol al término del periodo de incubación en condiciones aeróbicas controladas (25 °C y 80% de la humedad aprovechable).

de PRNT para las enmiendas  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  y  $\text{CaMgCO}_3\text{-G}$  fueron de 1.20 y 0.97, respectivamente (Figura 3a). Por su parte, la enmienda calcárea  $\text{CaMgCO}_3$  polvo presentó valores de PRNT en relación al uso de  $\text{CaCO}_3$  polvo, de 0.68 y 0.70 para los suelos Andisol y Ultisol, respectivamente (Figuras 1a y 3a), probablemente asociado a su menor solubilidad respecto del  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  (Tabla 2). De las enmiendas calcáreas granuladas, sólo el uso de  $\text{CaCO}_3\text{-G}$  generó un PRNT estimado mayor que la enmienda calcárea de referencia ( $\text{CaCO}_3$  en polvo) en ambos suelos.

El uso de  $\text{CaCO}_3$  granulado en menor o igual dosis que el  $\text{CaCO}_3$  en polvo es una alternativa a esta cal en polvo para corregir la acidez en los dos suelos volcánicos evaluados. A su vez, en el suelo Andisol, el uso de  $\text{CaCO}_3$  granulado en igual dosis que  $\text{CaCO}_3$  en polvo permitió reducir el Al intercambiable y la saturación de  $\text{Al}^{+3}$ .

El uso de  $\text{CaMgCO}_3$  granulado en menor o igual dosis que el  $\text{CaMgCO}_3$  en polvo es una alternativa a esta cal en polvo para corregir la acidez sólo en el suelo Andisol evaluado.

En ambos suelos de origen volcánico el indicador consistente de reducción de la acidez fue la relación inversamente proporcional obtenida entre la saturación de  $\text{Al}^{+3}$  y pH.

### Bibliografía

- Bachiega, F., L. Ferracciú, y E. Fávero. 2007. Nutrient concentration in soil water extracts and soybean nutrition in response to lime and gypsum applications to an acid Oxisol under no-till system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 79:169-179.
- Baldi, E., M. Toselli, G. Marcolini, y B. Marangoni. 2006. Effect of mineral and organic fertilization on soil chemical, biological and physical fertility in a commercial Peach orchard. *Acta Horticulturae* 721:55-62.
- Caires, E.F., A. Haliski, A.R. Bini, y D.A. Scharr. 2015. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. *European Journal of Agronomy* 66:41-53.
- Castro, G.S.A., y C.A.C. Crusciol. 2013. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. *Geoderma* 195-196:234-242.
- Ebeling, A.G., L.H. Anjos, D.V. Pérez, M.G. Pereira, y G.S. Valladares. 2011. Relationship between acidity and other chemical attributes of soils with high organic matter content. *Bragantia* 70:157-165.
- Fageria, N., y A. Nascente. 2014. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. *Advances in Agronomy* 128:221-275.
- Fageria, N.K., A. Moreira, L.A.C. Moraes, y M.F. Moraes. 2014. Influence of lime and gypsum on yield and yield components of soybean and changes in soil chemical properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 45:271-283.
- Havlin, J.L., S.L. Tisdale, W. Nelson, J. Havlin, y J. Beaton. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. 6th ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

- 
- Hirzel, J., I. Matus, F. Novoa, y I. Walter. 2007. Effect of poultry litter on silage maize (*Zea mays* L.) production and nutrient uptake. *Spain Journal of Agricultural Research* 5:102-109.
- Hirzel, J., P. Undurraga, P., y I. Walter. 2010. Mineralization of nitrogen and nutrients released in a volcanic soil amended with poultry manure. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70:113-121.
- Laos, F., P. Satti, I. Walter, M.J. Mazzarino, y S. Moyano. 2000. Nutrient availability of composted and noncomposted residues in a Patagonian Xeric Mollisol. *Biology and Fertility of Soils* 31:462-469.
- Moore, J., y R. Ouimet. 2014. Effects of two types of Ca fertilizer on sugar maple nutrition, vigor and growth after 7 years. *Forest Ecology and Management* 320:1-5.
- Moreira, A., G.J. Sfredo, L.A.C. Moraes, y N.K. Fageria. 2015. Lime and cattle manure in soil fertility and soybean grain yield cultivated in tropical soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 46:1157-1169.
- Sadzwarka, A., M.A. Carrasco, R. Grez, M.D.L.L. Mora, H. Flores, y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Serie Actas-INIA N° 34.: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.
- Sumner, M.E., y A.D. Noble. 2003. Soil acidification: the world story. In: Rengel, Z. (ed.) *Handbook of soil acidity*. Marcel Dekker, New York. p. 1-28.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.