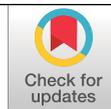


# EFICIENCIA DE ENMIENDAS UTILIZADAS COMO CORRECTIVOS DE LA ACIDEZ DEL SUELO EN EL CULTIVO DE CAFÉ EN COLOMBIA

Vanessa Catalina Díaz-Poveda \*, Siavosh Sadeghian Khalajabadi \*

Díaz-Poveda, V., & Sadeghian K., S. (2022). Eficiencia de enmiendas utilizadas como correctivos de la acidez del suelo en el cultivo de café en Colombia. *Revista Cenicafé*, 73(1), e73103. <https://doi.org/10.38141/10778/73103>



En la zona cafetera de Colombia se emplea una variedad amplia de productos para corregir la acidez del suelo, sin que se disponga de suficiente información acerca de su calidad. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de las enmiendas de uso común en la caficultura colombiana para corregir la acidez del suelo. Se seleccionaron 30 productos, clasificados como cales agrícolas, dolomíticas y apagadas, rocas fosfóricas, yeso agrícola y productos obtenidos a partir de la mezcla de varios compuestos. Se evaluaron las variables: poder de neutralización (PN), eficiencia granulométrica (EG), contenido de humedad (H), calcio (Ca), magnesio (Mg) y poder relativo de neutralización total (PRNT); adicionalmente, mediante la prueba de incubación se determinó el efecto de los productos en la corrección de la acidez de un suelo y el aporte Ca y Mg. Las cales agrícolas, dolomíticas y apagadas presentaron valores de H entre 0,0% y 0,6%, PN entre 93% y 120%, EG entre 62% y 96% y PRNT entre 62% y 115%. Las rocas fosfóricas mostraron baja capacidad para corregir la acidez (PN entre 3% y 22%, PRNT entre 9% y 16%), al igual que el yeso agrícola (PN de 32%, PRNT de 23%). Se presentó una alta correlación entre el pH del suelo, evaluado en la prueba de incubación y el PRNT de los productos ( $R^2=0,92$ ), resultado que sugiere el uso de este parámetro para establecer la eficiencia de enmiendas empleadas como correctivos de la acidez del suelo.

**Palabras clave:** Calidad de enmiendas, eficiencia granulométrica, poder de neutralización.

## EFFICIENCY OF AMENDMENTS USED TO CORRECT SOIL ACIDITY IN COFFEE CROPS IN COLOMBIA

A wide variety of products are used in the coffee-growing area of Colombia to correct soil acidity, but the information about their quality is insufficient. This research aimed to evaluate the efficiency of commonly used amendments applied on coffee plots in Colombia to correct soil acidity. Thirty products, classified as agricultural, dolomitic and quenched limestones, phosphoric rocks, agricultural gypsum and those obtained from the mixture of various compounds, were selected. The variables evaluated were: neutralization power (PN), particle size efficiency (EG), moisture content (H), calcium (Ca), magnesium (Mg) and total relative neutralization power (PRNT); additionally, the incubation test determined the effect of the products on the correction of soil acidity and the contribution of Ca and Mg. Agricultural, dolomitic and quenched limestones showed H values between 0.0% and 0.6%, PN between 93% and 120%, EG between 62% and 96% and PRNT between 62% and 115%. Phosphoric rocks showed low capacity to correct acidity (PN between 3% and 22%, NRP between 9% and 16%), as well as agricultural gypsum (PN of 32%, NRP of 23%). The soil pH, evaluated in the incubation test, and the PRNT of the products showed high correlation ( $R^2=0.92$ ), a result that suggests the use of this parameter to establish the efficiency of amendments used to correct soil acidity.

**Keywords:** Amendments quality, granulometric efficiency, neutralization power.

\* Asistente de Investigación e Investigador Científico III, respectivamente. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-4875-2258>, <https://orcid.org/0000-0003-1266-0885>



La acidificación del suelo es un proceso natural, acelerado por la actividad humana y considerado como uno de los principales problemas de la agricultura en el ámbito mundial. Bajo esta condición se presentan altas concentraciones de iones hidrogeniones ( $H^+$ ) y de aluminio intercambiable ( $Al^{3+}$ ) que inhiben la absorción de bases intercambiables ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $K^+$ ), disminuyen la actividad microbiana del suelo y reducen la solubilidad del fósforo (P) (Casierra-Posada & Aguilar-Avendaño, 2007; Havlin et al., 2014; Sánchez, 2012; Upjohn et al., 2005). En Colombia, particularmente en la zona cafetera, cerca del 59% de las muestras de suelo analizadas en los últimos 30 años, presentaron valores de  $pH < 5,0$  (Sadeghian, 2016).

La práctica por excelencia para corregir la acidez del suelo es el encalamiento (Bolan & Hedley, 2003; Athanase et al., 2013), que consiste en la aplicación de sales básicas que aumentan el pH, neutralizan el  $Al^{3+}$  y aportan simultáneamente nutrientes como Ca y Mg (Fageria & Moreira, 2011; Álvarez & Ribeiro, 1999; Espinosa & Molina, 1999). Los materiales que se emplean son principalmente carbonatos, óxidos e hidróxidos de calcio y/o magnesio y sulfato de calcio (yeso agrícola), los cuales de acuerdo con su naturaleza química presentan una capacidad variable de neutralización (Bernier & Alfaro, 2006).

Para el cultivo de café se han estudiado los efectos de diferentes enmiendas. Sadeghian (2016) demostró que la incorporación de cal dolomita (carbonato de calcio y magnesio,  $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ) antes de la siembra favorece el crecimiento de las plantas; a su vez, Sadeghian & Díaz-Marín (2020a, 2020b) corroboraron los efectos positivos de la aplicación de cal agrícola en el suelo y en el crecimiento de plantas de café en la etapa de almácigo, donde hubo aumento de materia seca de las plantas, como resultado de las alteraciones químicas

ocurridas en el suelo, entre las que sobresalen cambios en el pH,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , capacidad de intercambio catiónico (CIC),  $Al^{3+}$ , hierro ( $Fe^{2+}$ ), manganeso ( $Mn^{2+}$ ) y nitratos ( $NO_3^-$ ).

De acuerdo con Athanase et al. (2013), Haby y Leonard (2002), Fageria y Baligar (1997) y Espinosa y Molina (1999), la eficiencia y calidad de los materiales de encalado depende de su composición química y reactividad, medida en función de los factores: equivalente químico (EQ), eficiencia granulométrica (EG) y poder de neutralización (PN). El EQ también conocido como valor de neutralización (VN), permite conocer la pureza del material con relación a los contenidos de Ca y Mg, y se expresa como la capacidad para neutralizar la acidez comparada con el poder de neutralización del carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) químicamente puro, al cual se le asigna un valor de 100%. La EG, basada en la fineza de las partículas, permite definir la velocidad de reacción del material, pues en general, las enmiendas poseen una baja solubilidad en agua, por lo que su reactividad puede ser mejorada significativamente cuando se aumenta su superficie de contacto (Bernier & Alfaro, 2006). Por último, el PN, que establece la capacidad que tiene una enmienda para neutralizar la acidez del suelo, depende a su vez de la capacidad de la reacción de los aniones presentes, expresada también con base al  $CaCO_3$  con un valor de 100%. La valoración del PN se realiza por neutralización directa con una solución de ácido clorhídrico, en la que se mide el potencial químico del producto en condiciones ideales de acción (Chaves, 1993; De Filipo & Ribeiro., 1997). Cabe mencionar que tanto el EQ y el PN permiten establecer la capacidad de una enmienda para neutralizar la acidez; sin embargo, el EQ se determina según los contenidos de Ca y Mg, cationes que pueden estar combinados con aniones de reacción neutra, de manera que el EQ puede sobreestimar el PN (Duarte et al., 1993). A partir de los parámetros mencionados, puede calcularse el

poder relativo de neutralización total (PRNT), a través del cual se evalúa la eficiencia de las enmiendas a partir de su pureza química, fineza del material y contenido de humedad. Para el caso del cultivo de café, Malavolta (1993) recomienda el uso de productos que tengan un PRNT mínimo del 75%.

Debido a los problemas de la acidez del suelo en países como Brasil, Chile y Costa Rica, se ha determinado la eficiencia de las enmiendas y su efecto en el suelo y en cultivos específicos. A partir de las diversas investigaciones se ha establecido la importancia del proceso, dado que permite dar una interpretación agronómica más apropiada (Alcarde & Rodella, 1996; Pinochet et al., 2005; Chaves, 1993), además, de que puede elegirse la enmienda más adecuada, de acuerdo con su viabilidad económica (Araújo et al. 2009). Como resultado, se ha concluido que a pesar de que el PN es fundamental en los correctivos de acidez, debido a la baja solubilidad en agua de algunos productos, la granulometría ejerce un papel relevante una vez que su disolución depende del contacto con el suelo (Coelho, 2004). Investigaciones desarrolladas por Bellingieri et al. (1989), Viadé et al. (2011) y Deus et al. (2014), quienes evaluaron la efectividad del tamaño de partícula de las enmiendas, concluyeron que la fracción más fina reacciona más y eleva el pH del suelo en menor tiempo; no obstante, el efecto residual se mantiene durante un período más corto en comparación con las partículas de mayor tamaño.

A pesar de la necesidad de aplicar un producto con la eficiencia y calidad suficiente para corregir los problemas de acidez en café, es limitada la información en lo referente al tema en Colombia. Las enmiendas que se ofrecen en el mercado nacional presentan una amplia diversidad en sus propiedades fisicoquímicas, además, se hace referencia indistintamente a que cualquier producto catalogado como

tal, tiene la capacidad para corregir la acidez del suelo. Por consiguiente, el objetivo de esta investigación fue evaluar la eficiencia de los productos de uso común en la caficultura colombiana para corregir la acidez del suelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Selección de las enmiendas.** Se evaluaron 30 productos, entre los que se encuentran carbonatos de calcio, carbonatos de calcio y magnesio, hidróxidos de calcio, rocas fosfóricas, sulfato de calcio dihidratado (yeso agrícola) y mezclas de productos que contienen además de calcio y magnesio, silicio y azufre, entre otros elementos (Tabla 1). Estos fueron seleccionados de acuerdo con la información suministrada por el Servicio de Extensión de 14 departamentos cafeteros de Colombia, pertenecientes a la Federación Nacional de Cafeteros (FNC). Los criterios utilizados fueron el volumen de venta y uso, así como la composición química de los productos, de los que primaron dolomitas.

**Eficiencia de las enmiendas.** Se estimaron por triplicado los siguientes parámetros:

**Humedad (H).** En estufa se ubicaron 5,0 g del material a 105°C por 24 h; tiempo después del cual se pesó la muestra seca y se determinó su contenido de agua (Asociación Española de Normalización y Certificación, 1997).

**Contenidos de calcio y magnesio.** Para la determinación de los contenidos de Ca y Mg, se tomaron 0,5 g de enmienda seca y tamizada a 60 mesh, la muestra se dispuso en un crisol de porcelana, al cual se adicionaron 10 mL de HCl al 37%. La mezcla se calentó hasta ebullición y evaporación de la misma a sequedad. Posteriormente, se adicionaron 20 mL de HCl 6 M y 100 mL de agua desionizada caliente. La mezcla obtenida se transvasó a un balón aforado de 250 mL. A partir de esta solución, por espectrometría de absorción

**Tabla 1.** Enmiendas seleccionadas para evaluar su eficiencia como correctivos de acidez del suelo.

| Producto                      | Composición química                                                                           | Fórmula química                                                                                                                                                                            | Número |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Cal agrícola                  | Carbonato de calcio                                                                           | CaCO <sub>3</sub>                                                                                                                                                                          | 4      |
| Cal dolomita                  | Carbonato de calcio y magnesio                                                                | CaCO <sub>3</sub> .MgCO <sub>3</sub>                                                                                                                                                       | 9      |
| Cal apagada                   | Hidróxido de calcio                                                                           | Ca(OH) <sub>2</sub>                                                                                                                                                                        | 2      |
| Cal magnesiana                | Carbonato de calcio + silicato de magnesio                                                    | CaCO <sub>3</sub> + Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>                                                                                                      | 1      |
| Cal dolomita + roca fosfórica | Carbonato de calcio y magnesio + apatitas                                                     | CaCO <sub>3</sub> .MgCO <sub>3</sub> + Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F,Cl,OH)                                                                                           | 1      |
| Escorias Thomas               | Anhídrido fosfórico + óxidos de calcio, magnesio, manganeso, cobalto, molibdeno, cobre y zinc | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +CaO+MgO                                                                                                                                                     | 1      |
| Roca fosfórica                | Apatitas                                                                                      | Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F,Cl,OH)                                                                                                                                  | 8      |
| Producto integral             | Cal agrícola + silicato de magnesio + sulfato de calcio dihidratado + apatitas                | CaCO <sub>3</sub> + Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> + Ca(SO <sub>4</sub> ).2H <sub>2</sub> O + Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F,Cl,OH) | 2      |
| Cal dolomita calcinada        | Carbonato de calcio y magnesio + óxido de calcio y magnesio                                   | CaCO <sub>3</sub> .MgCO <sub>3</sub> + CaMgO <sub>2</sub>                                                                                                                                  | 1      |
| Yeso agrícola                 | Sulfato de calcio dihidratado                                                                 | Ca(SO <sub>4</sub> ).2H <sub>2</sub> O                                                                                                                                                     | 1      |

atómica, se cuantificaron las concentraciones de Ca y Mg (ICONTEC, 2011; Comisión Venezolana de Normas Industriales, 1981).

**Poder de neutralización (PN).** Para determinar el PN, la mezcla de 1,0 g de enmienda y 25 mL de HCl 1M se calentó por 30 min; posteriormente, se adicionaron 100 mL de agua desionizada, dejando en calentamiento por 5 min. Al cabo de este tiempo, la muestra se enfrió a temperatura ambiente y se tituló con

una solución de NaOH 1M, usando fenolftaleína como indicador (De Filipo & Ribeiro, 1997).

**Eficiencia granulométrica (EG).** De cada producto se tamizaron 100 g en la siguiente secuencia de mallas: 8, 20, 40 y 60 mesh. La cantidad de material retenido se pesó teniendo en cuenta que los diferentes tamaños de partícula poseen una eficiencia relativa, como se presenta en la Tabla 2 (Espinosa & Molina, 1999).

**Tabla 2.** Eficiencia relativa de fracciones granulométricas.

| Número de malla (mesh) | Tamaño de orificios (mm) | Eficiencia relativa (%) |
|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| < 8                    | > 2,36                   | 0                       |
| 8–20                   | 2,36–0,85                | 20                      |
| 20–40                  | 0,85–0,42                | 40                      |
| 40–60                  | 0,85–0,25                | 60                      |
| > 60                   | < 0,25                   | 100                     |

**Poder relativo de neutralización total (PRNT).** De acuerdo con los resultados obtenidos, se estimó el PRNT para cada producto según la Ecuación <1>.

$$PRNT = \frac{EG \times PN}{100} \times \frac{(100 - H)}{100} \quad <1>$$

Donde

EG: eficiencia granulométrica (%)

PN: poder de neutralización (%)

H: humedad (%)

**Prueba de incubación.** Con el fin de corroborar la información obtenida a través de la estimación del PRNT, se incubó una muestra de suelo con las enmiendas evaluadas. El suelo presentó las siguientes características: pH 4,86, acidez intercambiable (A.I.) 0,43 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, Al<sup>3+</sup> 0,33 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, K<sup>+</sup> 0,22 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, Ca<sup>2+</sup> 3,50 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, Mg<sup>2+</sup> 0,64 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, CICE 5,12 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, CIC 27,97 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, materia orgánica (MO) 10,97%, nitrógeno total (N) 0,44%, P 19,18 mg kg<sup>-1</sup>, arena 53,64%, arcilla 13,66% y limo 32,70%. Se mezclaron 5 g dm<sup>-3</sup> de cada producto con un volumen de 0,34 dm<sup>3</sup> de suelo, procedimiento que se realizó por triplicado; adicionalmente, se contó con un testigo sin aplicación de enmienda. Durante 45 días y a temperatura ambiente, se mantuvo la

humedad del suelo entre el 60% y 70% de su capacidad de campo, determinada previamente según el método de olla de presión, mediante la adición de agua Tipo II (conductividad < 1 μS cm<sup>-1</sup>) a intervalos regulares. Al finalizar este período, las muestras se secaron a 40°C y se determinaron Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup>.

**Análisis estadístico.** Se calcularon los promedios y los límites de confianza al 95% de los parámetros evaluados para cada producto (H, contenidos de Ca y Mg, PN, EG y PRNT). En cuanto a la incubación del suelo, mediante la prueba de Tukey (*p* < 0,05) se compararon los promedios de pH, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup> de todos los tratamientos; así mismo, se comparó el testigo sin enmienda con respecto a los demás tratamientos (prueba de Dunnett al 5%). Con el fin de determinar la relación entre el PRNT y el pH del suelo incubado, se empleó la regresión lineal. Para el procesamiento estadístico se utilizaron los programas Rbio versión 106 (Bhering, 2017) y SigmaPlot versión 10.0.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Humedad.** Los contenidos promedio de humedad de las cales estuvieron entre 0,0% y 0,6%, en las rocas fosfóricas entre 0,6% y 5,7%, en los productos integrales entre 2,15%

y 5,3% y en el yeso agrícola el porcentaje fue de 4,0% (Tabla 3). Algunos autores establecen que este parámetro puede reducir la eficiencia del material en función del peso (Mullins et al., 2019), mientras otros establecen que, al menos en la cal agrícola, la humedad no influye en su efectividad (Carey et al., 2006); no obstante, coinciden en que contenidos de humedad entre 4,0% y 5,0% pueden mejorar la uniformidad en el esparcimiento del producto y reducir el movimiento fuera del sitio de partículas muy finas (< 100 mesh).

En Colombia no se encuentra regulado un valor máximo permisible de humedad para las enmiendas inorgánicas; sin embargo, esta información debe estar incluida en la etiqueta del producto (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2017). En el caso de las rocas fosfóricas, consideradas como abonos o fertilizantes, la normativa colombiana establece un contenido máximo de humedad del 5,0% (ICONTEC, 2000).

**Contenidos de Ca y Mg.** Las concentraciones de CaO variaron entre 5,0% y 63,0% y las de MgO entre 0,1% y 23,0% (Tabla 3). Como consecuencia de su composición química, las cales presentaron los mayores contenidos de Ca y, en el caso de las dolomitas, de Mg. Las rocas fosfóricas, compuestas por fosfatos de Ca, presentaron contenidos comparables de este elemento con algunas cales, entre 5,0% y 36,0%.

**Poder de neutralización.** El PN de las cales agrícolas fue igual o ligeramente inferior al máximo alcanzable para el carbonato de calcio (100%), desde 96% hasta 100%; entretanto, las dolomitas y apagadas estuvieron entre 93% y 103% y 116% y 120%, respectivamente. Estos valores fueron parcialmente más bajos que los rangos teóricos: 95%–108% y 120%–135%, respectivamente (Mullins et al., 2019). Los productos clasificados como cal magnesiana,

dolomita mezclada con roca fosfórica y escorias Thomas exhibieron en su orden un PN de 86%, 95% y 69%; destacándose que estos materiales contienen en su composición química compuestos con poder alcalinizante, es decir, carbonatos y óxidos de calcio y magnesio. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Deus et al. (2014) y Araújo et al. (2009), quienes reportan un PN entre 91% y 106% para dolomitas y entre 71% y 87% para escorias.

En las rocas fosfóricas, el PN estuvo entre 3,0% y 38,0%, siendo el mayor valor para el termofosfato, resultado que tiene su origen en el tratamiento térmico al que es sometida la roca fosfórica, con el que se alcanza una mayor solubilidad del fósforo presente (Fernández & Noguera, 2003) y mayor capacidad para neutralizar la acidez (Galindo-López et al., 2018). Los productos integrales presentaron porcentajes cercanos a 60%; resultado que puede ser explicado con base en su composición química, en la que el sulfato de calcio dihidratado, el silicato de magnesio y la roca fosfórica, son compuestos con baja capacidad para corregir la acidez y, los porcentajes alcanzados obedecen principalmente al efecto del carbonato de calcio presente en las enmiendas. Este resultado concuerda con el PN obtenido de 32% para el yeso agrícola, el cual resulta ser alto teniendo en cuenta que el anión sulfato no puede generar iones hidroxilo y de esta manera, neutralizar la acidez activa del suelo (Primavesi & Primavesi, 2004), razón por la que el resultado obtenido puede deberse a que el producto, resultado de una roca molida, contenga otro compuesto presente en bajas cantidades como una cal, por ejemplo; lo anterior fue confirmado experimentalmente. Así, se midió el PN de dos muestras de yeso agrícola, una comercial obtenida como producto de la purificación del ácido cítrico y otra, tipo reactivo analítico, obteniéndose un PN de 5,5% y 5,3%, respectivamente. Se resalta

**Tabla 3.** Valores promedio y límites de confianza al 95% de humedad (H) y contenidos de Ca y Mg medidos en las enmiendas evaluadas.

| <b>Producto</b>                         | <b>H (%)</b> | <b>CaO (%)</b> | <b>MgO (%)</b> |
|-----------------------------------------|--------------|----------------|----------------|
| Cal agrícola                            | 0,0          | 56,6 ± 0,7     | 3,0 ± 0,6      |
|                                         | 0,0          | 56,2 ± 1,0     | 2,0 ± 0,1      |
|                                         | 0,1 ± 0,3    | 52,9 ± 5,0     | 2,1 ± 0,3      |
|                                         | 0,4 ± 0,5    | 55,4 ± 1,2     | 1,6 ± 0,1      |
| Cal dolomita                            | 0,1 ± 0,3    | 34,7 ± 4,4     | 16,3 ± 0,8     |
|                                         | 0,4 ± 0      | 34,9 ± 0,8     | 14,0 ± 0,7     |
|                                         | 0,1 ± 0,3    | 21,7 ± 9,7     | 11,7 ± 5,3     |
|                                         | 0,1 ± 0,3    | 36,4 ± 1,6     | 5,3 ± 0,3      |
|                                         | 0,0          | 34,5 ± 0,4     | 16,4 ± 0,5     |
|                                         | 0,0          | 59,0 ± 7,0     | 2,3 ± 0,0      |
|                                         | 0,1 ± 0,3    | 34,9 ± 1,4     | 9,9 ± 0,6      |
|                                         | 0,0          | 35,7 ± 0,0     | 15,4 ± 1,7     |
| Cal apagada                             | 0,6          | 35,5 ± 1,2     | 15,3 ± 1,1     |
|                                         | 0,0          | 62,8 ± 2,8     | 4,0 ± 0,4      |
|                                         | 0,0          | 62,9 ± 0,7     | 0,3 ± 0,0      |
| Cal magnesiana                          | 0,1 ± 0,3    | 34,7 ± 0,6     | 17,1 ± 0,7     |
| Cal dolomita + P                        | 0,2 ± 0,5    | 18,9 ± 0,8     | 10,8 ± 1,6     |
| Escorias Thomas                         | 0,6 ± 0,5    | 35,8 ± 1,2     | 2,8 ± 0,6      |
| Roca fosfórica parcialmente acidulada   | 5,7 ± 0,56   | 30,5 ± 13,3    | 0,6 ± 0,3      |
| Termofosfato (roca fosfórica calcinada) | 0,7 ± 0,3    | 22,2 ± 0,3     | 10,4 ± 0,3     |
| Roca fosfórica                          | 1,2 ± 0,0    | 5,2 ± 0,2      | 5,2 ± 1,2      |
|                                         | 1,0 ± 0,9    | 34,2 ± 1,6     | 0,2 ± 0,0      |
|                                         | 1,0 ± 0,5    | 36,3 ± 0,8     | 0,2 ± 0,0      |
|                                         | 0,6 ± 0,9    | 35,6 ± 0,6     | 0,3 ± 0,3      |
|                                         | 1,2 ± 0,5    | 33,9 ± 1,7     | 0,2 ± 0,0      |
|                                         | 0,8 ± 0,5    | 25,9 ± 3,5     | 0,1 ± 0,1      |
| Producto integral                       | 2,1 ± 0,3    | 20,5 ± 0,4     | 11,9 ± 1,7     |
|                                         | 5,3 ± 0,3    | 18,9 ± 0,7     | 17,9 ± 4,7     |
| Dolomita calcinada                      | 0,3 ± 0,6    | 51,4 ± 0,5     | 22,6 ± 2,6     |
| Yeso agrícola                           | 4,0 ± 0,5    | 24,1 ± 0,2     | 4,4 ± 0,6      |

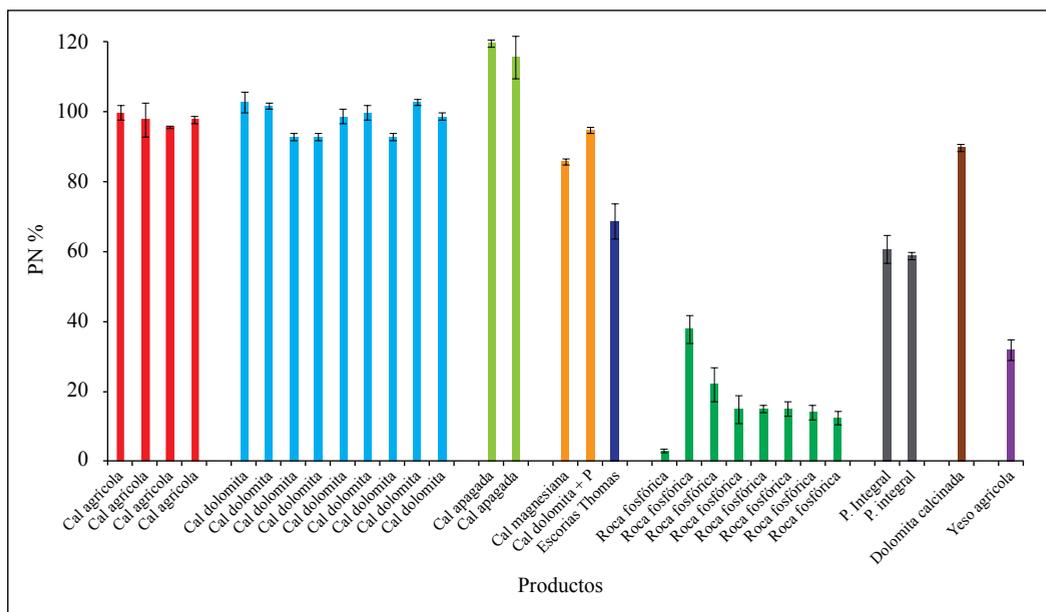
que el anión sulfato permite neutralizar el  $Al^{3+}$ , al formar pares iónicos como  $Al(SO_4)_4^+$ , forma química del aluminio que no es tóxico para las plantas (Fageria & Baligar, 2003).

Los resultados obtenidos confirman que los contenidos de Ca y Mg de las enmiendas no son un indicativo de su capacidad para corregir la acidez del suelo, ya que esta es dependiente del anión que acompaña estos elementos, los cuales no necesariamente pueden producir iones hidroxilos, capaces de aumentar el pH. Es así como las dolomitas y las rocas fosfóricas, productos con contenidos de Ca semejantes, presentaron valores de PN tan diferentes.

Internacionalmente se ha establecido que enmiendas con un PN inferior al 70% son de baja calidad (Alcarde, 1983; Chaves, 1993); al respecto, a pesar de que el PN medido en las

cales fue parcialmente bajo en comparación con los valores teóricos, todas demostraron alta capacidad para neutralizar la acidez como consecuencia de los aniones presentes en ellas: carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) e hidroxilo ( $OH^-$ ) (Primavesi & Primavesi, 2004).

**Eficiencia granulométrica.** La EG de las enmiendas analizadas varió entre 62% y 96% con excepción de tres productos granulados, una cal agrícola, una dolomita y una roca fosfórica (Figura 2). Entre los productos evaluados se destaca cómo algunos a pesar de tener un alto PN, presentaron una baja EG. Este fue el caso de una cal agrícola, para la que fue medida una eficiencia de 62%, resultado que puede considerarse bajo en comparación con las otras cales evaluadas, y con el valor de 100% indicado por Deus et al. (2014). Por su parte, las dolomitas variaron entre 75% y 80%, valores parcialmente más bajos que

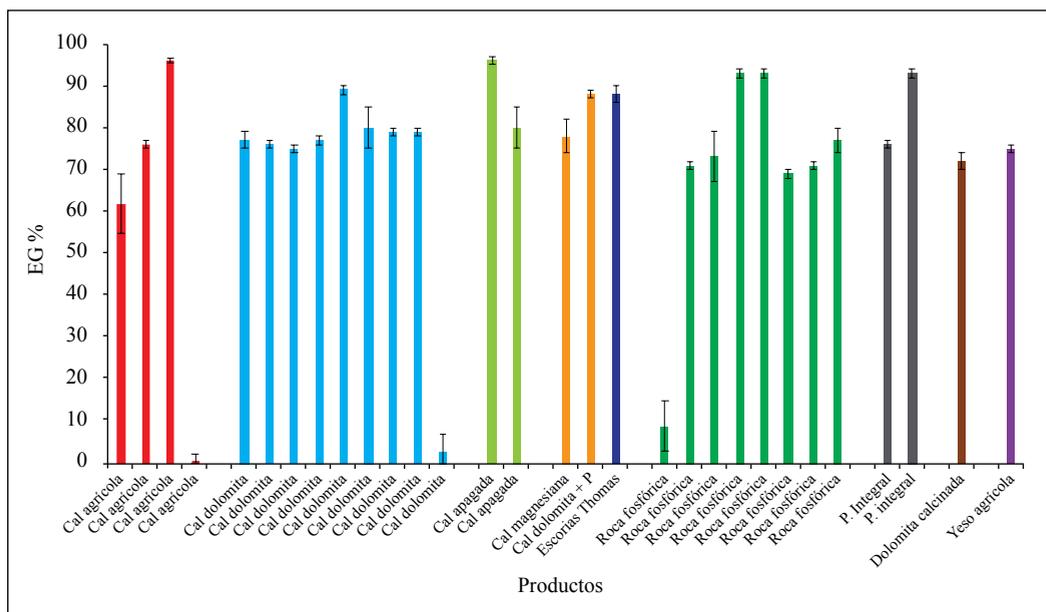


**Figura 1.** Valores promedio del poder de neutralización (PN) de las 30 enmiendas evaluadas. Las barras corresponden a los límites de confianza al 95%.

los medidos por Araújo et al. (2009), quienes reportaron rangos entre 84% y 99%. En cuanto a las escorias Thomas, el producto analizado alcanzó un 88%, para el que Deus et al. (2014) indican entre 107% y 117%. En general, no hubo tendencia por el tipo de material, de manera que este parámetro resulta ser totalmente dependiente del proceso de molienda llevado a cabo por cada empresa.

En términos específicos de reactividad, parámetro asociado al tamaño de partícula, no deben emplearse productos que contengan cantidades altas de fracciones gruesas, ya que van a tener baja reactividad y, por consiguiente, poco efecto para corregir la acidez del suelo. En relación con lo anterior, Prado et al. (2004) indican que las fracciones con tamaño de partícula mayor a 2,0 mm no tienen eficiencia de reacción (Tabla 2). Por otro lado, productos que en su totalidad estén conformados por fracciones

demasiado finas, las cuales reaccionan en su totalidad en corto tiempo, no tendrán efecto residual (Chaves, 1993; Viadé et al., 2011). En períodos más largos, partículas grandes pueden llegar a reaccionar; sin embargo, son las finas las que influyen inmediatamente en las propiedades del suelo y, el efecto del tamaño de partícula de las enmiendas en la corrección de la acidez, puede diferir según el tipo de suelo (Deus et al., 2014). En este sentido, es recomendable que las enmiendas tengan un tamaño de partícula variable, en las que no haya presencia de fracciones no reactivas. En el caso de Colombia, la normativa indica que “*las enmiendas inorgánicas pulverizadas deben pasar en su totalidad por el tamiz No. 20 (841 μm) y en un 50% mínimo por el tamiz No. 100 (149 μm)*” (ICONTEC, 2006), pese a ello, a diferencia del PN, no se ha establecido un mínimo de EG con el que se establezca eficiencia y calidad en estos materiales.

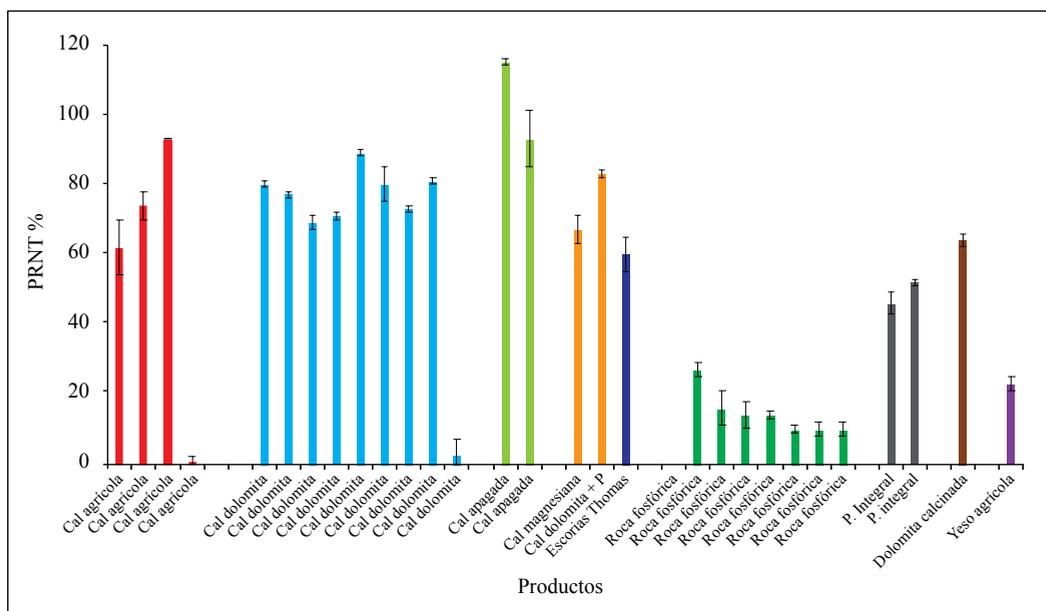


**Figura 2.** Valores promedio de la eficiencia granulométrica (EG) medida en las 30 enmiendas evaluadas. Las barras corresponden a los límites de confianza al 95%.

**Poder relativo de neutralización total.** El PRNT de las cales agrícolas varió entre 62% y 93%, con excepción del producto granulado; el de las dolomitas entre 69% y 89%, con excepción del producto granulado, y el de las cales apagadas entre 93% y 115% (Figura 3), porcentajes cercanos a los descritos por Araújo et al. (2009) y Deus et al. (2014), quienes reportan para la cal agrícola un PRNT de 105% y para las dolomitas entre 76% y 105%. En el caso de las rocas fosfóricas, este parámetro no superó el 27% y el mayor valor calculado correspondió al termofosfato, el cual presentó un PN mayor a las demás rocas fosfóricas. Por su parte, los productos integrales variaron entre 46% y 52% y el yeso agrícola alcanzó un 23%. En el ámbito general, las cales fueron los productos con mayor PRNT, destacándose como los más eficientes para corregir la acidez del suelo.

Varios productos, a pesar de tener un alto PN, se vieron afectados negativamente como consecuencia de su EG; se resalta que el PRNT asigna un mismo peso a los dos parámetros (Ecuación <1>). De acuerdo con lo descrito anteriormente, se evidencia cómo muchos de los productos comercializados en la zona cafetera para corregir la acidez del suelo, no poseen la eficiencia suficiente para ser empleados en los procesos de encalamiento; a este respecto, de los 30 productos, solo diez cumplieron con un PRNT mínimo del 75%, recomendado por Malavolta (1993), los cuales fueron en su totalidad productos con una composición química en la que hay presencia de carbonatos e hidróxidos de Ca y/o Mg.

**Prueba de incubación.** Como se esperaba, según la estimación del PRNT, las cales fueron los productos que permitieron elevar en mayor proporción el pH del suelo, hasta 6,57



**Figura 3.** Valores promedio de poder relativo de neutralización total (PRNT) calculado para las 30 enmiendas evaluadas. Las barras corresponden a los límites de confianza al 95%.

unidades partiendo de una muestra con un pH de 4,86 (Tabla 5). Lo anterior indica que todo producto que en su composición contenga un compuesto alcalinizante, ya sea carbonato, óxido o hidróxido, y que presente una granulometría adecuada, como es el caso de las escorias Thomas y los productos compuestos, tendrá la capacidad para aumentar el pH del suelo; sin embargo, el cambio no será igual en proporción a las enmiendas que sólo contengan este tipo de compuestos, como es el caso de las cales. Por su parte, las rocas fosfóricas no contribuyeron al aumento del pH, pudiéndose establecer que, como consecuencia de su composición química, estos productos no reaccionan y poseen baja solubilidad (Fernández & Noguera, 2003), de allí que sean considerados como abonos o fertilizantes por su aporte de fósforo y no acondicionadores de suelos (ICONTEC, 2000).

En cuanto a las dos enmiendas granuladas, se demostró que, a pesar de tratarse de cales con una adecuada pureza química, no permitieron el aumento del pH del suelo debido a su granulometría, pues no reaccionaron en el tiempo establecido para el ensayo (45 días); esto se evidenció al finalizar la prueba de incubación, cuando se observaron los gránulos de los productos en el suelo.

La correlación entre el pH alcanzado con la aplicación de las enmiendas y el PRNT calculado para las mismas se muestra en la Figura 4. El valor alto del coeficiente de determinación de la regresión lineal ( $R^2 = 0,92$ ) y la significancia de los parámetros ( $p < 0,0001$ ), indican que el PRNT permite describir de manera adecuada la calidad y eficiencia de las enmiendas para corregir la acidez del suelo, medido como cambios en el pH del suelo (Figura 3).

**Tabla 5.** Valores promedio del pH del suelo en respuesta a la aplicación de los productos en la prueba de incubación. Medias acompañadas de diferentes letras indican diferencias significativas según la prueba de Tukey al 5%.

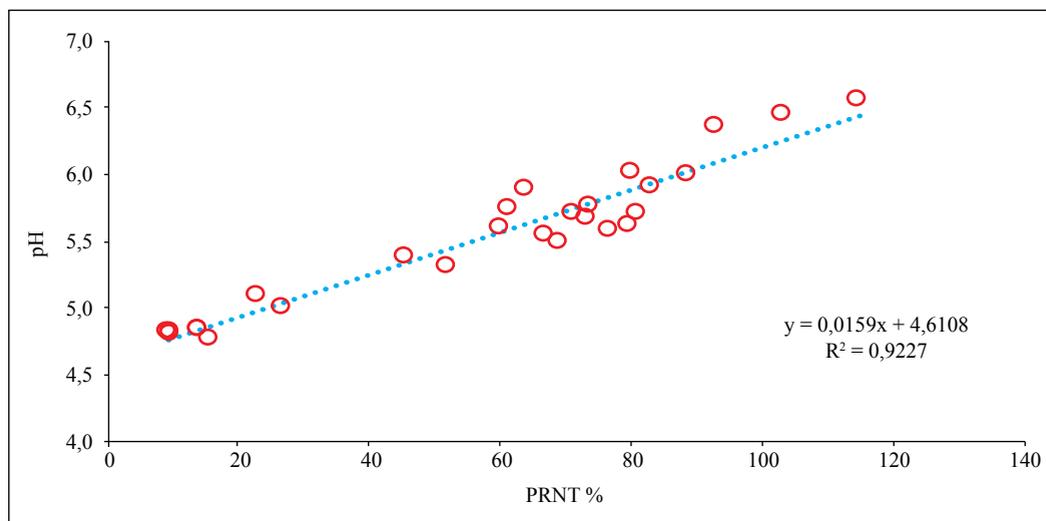
| Producto           | pH      |
|--------------------|---------|
| Cal apagada        | 6,57 a  |
| Cal apagada        | 6,37 b  |
| Cal agrícola       | 6,16 c  |
| Cal dolomita       | 6,02 d  |
| Cal dolomita       | 6,00 d  |
| Cal dolomita + P   | 5,91 d  |
| Dolomita calcinada | 5,90 d  |
| Cal agrícola       | 5,76 e  |
| Cal agrícola       | 5,76 e  |
| Cal dolomita       | 5,71 ef |
| Cal dolomita       | 5,71 ef |
| Cal dolomita       | 5,68 ef |
| Cal dolomita       | 5,62 fg |
| Escorias Thomas    | 5,61 fg |
| Cal dolomita       | 5,59 fg |
| Cal magnesiana     | 5,54 g  |
| Cal dolomita       | 5,50 gh |
| Producto integral  | 5,39 hi |
| Producto integral  | 5,31 i  |
| Yeso agrícola      | 5,10 j  |
| Roca fosfórica     | 5,01 j  |
| Cal dolomita       | 5,01 j  |
| Roca fosfórica     | 4,86 k  |
| Roca fosfórica     | 4,85 k  |
| Roca fosfórica     | 4,84 k  |
| Roca fosfórica     | 4,83 k  |
| Roca fosfórica     | 4,82 k  |
| Roca fosfórica     | 4,82 k  |
| Cal agrícola       | 4,80 k  |
| Roca fosfórica     | 4,78 k  |
| Testigo            | 4,86 k  |

Lo anterior corrobora que el PRNT, como parámetro químico, permite medir la capacidad que tiene una enmienda para neutralizar la acidez del suelo, al tener en cuenta tanto la reactividad del producto como su composición química. Un producto, a pesar de tener muy buena fineza, no podrá neutralizar la acidez del suelo si su composición química no es la apropiada y viceversa, pues a pesar de que un producto tenga la composición adecuada si no posee la fineza necesaria (EG) no reaccionará y, por ende, no podrá aumentar el pH del suelo y neutralizar el  $Al^{3+}$ .

Con relación a las demás variables que se midieron al finalizar la prueba de incubación (Tabla 6), puede comentarse que, el  $Al^{3+}$  disminuyó en conformidad al aumento del pH, hasta llegar a no detectarse analíticamente para pH mayores a 5,31. Por otro lado, las concentraciones de calcio y magnesio aumentaron con base en los contenidos de estos elementos en las enmiendas (Tabla 3). Por lo general, todos los productos, con

excepción de las rocas fosfóricas aportaron calcio al suelo, de modo que se alcanzaron concentraciones de hasta  $21,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Estos resultados confirman lo descrito anteriormente sobre las rocas fosfóricas, las cuales no logran reaccionar ni solubilizarse, de manera que no aportan Ca al suelo a pesar de que presentaron contenidos semejantes al de las dolomitas.

Los aportes de magnesio por su parte, fueron principalmente provenientes de las dolomitas, para cuyo caso se registraron valores hasta  $6,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Estos resultados demuestran las bondades de la aplicación de carbonatos e hidróxidos de Ca y/o Mg, productos que además de corregir la acidez del suelo, son fuentes de ambos elementos. Cabe comentar que es probable que no todo el calcio y el magnesio cuantificados sean intercambiables, esto como consecuencia de las limitaciones de la metodología analítica empleada, en las que se puede estar sobreestimando la fracción intercambiable del suelo (Sadeghian & Díaz-Marín, 2020b; Soratto & Crusciol, 2008).



**Figura 4.** Relación entre el pH del suelo analizado en la prueba de incubación y el PRNT. La gráfica incluye 27 datos correspondientes a productos no granulados, a los que aplica la determinación de la EG y el cálculo del PRNT.

**Tabla 6.** Valores promedio de acidez, aluminio y bases intercambiables ( $K^+$ -  $Ca^{2+}$ -  $Mg^{2+}$ ).

| Producto     | A.I. |     |   | $Al^{3+}$ |    |   | $K^+$ |       |   | $Ca^{2+}$ |     |   | $Mg^{2+}$ |     |   |
|--------------|------|-----|---|-----------|----|---|-------|-------|---|-----------|-----|---|-----------|-----|---|
| Testigo      | 0,43 | abc |   | 0,33      | ab |   | 0,22  | bcdef |   | 3,50      | l   |   | 0,64      | lm  |   |
| Cal agrícola | 0,08 | ghi | * | 0,00      | f  | * | 0,22  | defg  |   | 11,20     | ef  | * | 0,96      | hij | * |
|              | 0,08 | ghi | * | 0,00      | f  | * | 0,22  | cdefg |   | 11,40     | ef  | * | 0,92      | ij  | * |
|              | 0,08 | ghi | * | 0,00      | f  | * | 0,24  | ab    | * | 13,75     | d   | * | 1,16      | gh  | * |
|              | 0,27 | e   | * | 0,17      | d  | * | 0,23  | bcde  |   | 4,54      | kl  |   | 0,65      | klm |   |
| Cal dolomita | 0,08 | ghi | * | 0,00      | f  | * | 0,22  | defg  |   | 8,67      | hi  | * | 2,81      | cd  | * |
|              | 0,07 | hi  | * | 0,00      | f  | * | 0,22  | cdefg |   | 10,12     | fg  | * | 2,64      | d   | * |
|              | 0,08 | ghi | * | 0,00      | f  | * | 0,24  | abc   | * | 9,03      | ghi | * | 1,99      | e   | * |
|              | 0,07 | hi  | * | 0,00      | f  | * | 0,21  | defg  |   | 11,34     | ef  | * | 1,19      | gh  | * |
|              | 0,07 | hi  | * | 0,00      | f  | * | 0,20  | fg    | * | 10,00     | fgh | * | 4,32      | b   | * |
|              | 0,07 | hi  | * | 0,00      | f  | * | 0,20  | fg    | * | 15,38     | c   | * | 1,13      | ghi | * |
|              | 0,07 | hi  | * | 0,00      | f  | * | 0,20  | fg    | * | 10,47     | efg | * | 2,03      | e   | * |
|              | 0,07 | hi  | * | 0,00      | f  | * | 0,20  | efg   | * | 9,40      | ghi | * | 3,03      | c   | * |
|              | 0,30 | e   | * | 0,18      | d  | * | 0,22  | defg  |   | 4,35      | kl  |   | 0,89      | ijk | * |
| Cal apagada  | 0,07 | hi  | * | 0,00      | f  | * | 0,20  | fg    | * | 20,96     | a   | * | 1,52      | f   | * |
|              | 0,06 | i   | * | 0,00      | f  | * | 0,20  | g     | * | 19,08     | b   | * | 0,66      | klm |   |

Continúa...

... Continuación.

| Producto           | A.I. |     |   | Al <sup>3+</sup> |    |   | K <sup>+</sup> |       |   | Ca <sup>2+</sup> |     |   | Mg <sup>2+</sup> |     |   |
|--------------------|------|-----|---|------------------|----|---|----------------|-------|---|------------------|-----|---|------------------|-----|---|
| Cal magnesiana     | 0,08 | ghi | * | 0,00             | f  | * | 0,20           | efg   | * | 9,39             | ghi | * | 1,62             | f   | * |
| Cal dolomita + P   | 0,07 | hi  | * | 0,00             | f  | * | 0,21           | defg  |   | 11,40            | ef  | * | 2,75             | d   | * |
| Escorias Thomas    | 0,08 | ghi | * | 0,00             | f  | * | 0,21           | defg  |   | 11,82            | e   | * | 0,65             | klm |   |
| Roca fosfórica     | 0,36 | d   | * | 0,31             | bc |   | 0,21           | defg  |   | 6,27             | j   | * | 0,84             | jkl | * |
| Termofosfato       | 0,30 | e   | * | 0,16             | d  | * | 0,21           | defg  |   | 5,55             | jk  | * | 0,84             | jkl | * |
|                    | 0,45 | a   |   | 0,38             | a  | * | 0,21           | defg  |   | 3,40             | l   |   | 0,57             | m   |   |
|                    | 0,41 | bc  |   | 0,36             | ab |   | 0,21           | defg  |   | 3,67             | l   |   | 0,60             | m   |   |
| Roca fosfórica     | 0,40 | cd  | * | 0,35             | ab |   | 0,22           | bcdef |   | 3,83             | l   |   | 0,62             | lm  |   |
|                    | 0,44 | ab  |   | 0,35             | ab |   | 0,21           | defg  |   | 3,42             | l   |   | 0,57             | m   |   |
|                    | 0,37 | d   | * | 0,27             | c  | * | 0,21           | defg  |   | 3,91             | l   |   | 0,58             | m   |   |
|                    | 0,40 | cd  | * | 0,28             | c  | * | 0,22           | cdefg |   | 3,88             | l   |   | 0,59             | m   |   |
| Producto integral  | 0,11 | gh  | * | 0,00             | f  | * | 0,22           | defg  |   | 10,13            | fg  | * | 0,92             | ij  | * |
|                    | 0,11 | g   | * | 0,00             | f  | * | 0,21           | defg  |   | 8,24             | i   | * | 1,54             | f   | * |
| Dolomita calcinada | 0,09 | ghi | * | 0,00             | f  | * | 0,22           | defg  |   | 10,00            | fgh | * | 5,80             | a   | * |
| Yeso agrícola      | 0,20 | f   | * | 0,07             | e  | * | 0,23           | abcd  |   | 13,42            | d   | * | 1,21             | g   | * |

Letras distintas indican diferencias según la prueba de Tukey.

Los asteriscos (\*) indican significancia de acuerdo con la prueba de Dunnett con respecto al testigo ( $p < 0,05$ ).

Los resultados de esta investigación permiten concluir que:

- Las enmiendas que se comercializan en la zona cafetera de Colombia para corregir la acidez del suelo, aún las que pertenecen a una misma clase, presentaron diferencias considerables en su calidad.
- Pese a que las cales dolomíticas, agrícolas y apagadas poseen un mayor poder de neutralización (PN), su calidad se ve afectada por la granulometría.
- Los productos clasificados como enmiendas integrales exhibieron un PRNT menor que las cales, y las rocas fosfóricas y el yeso agrícola presentaron los valores más bajos.
- Las cales, además de aumentar el pH del suelo y neutralizar el aluminio intercambiable, aportaron calcio y magnesio, según su composición.
- El PRNT se correlacionó significativamente con el pH del suelo, evaluado en la prueba de incubación, lo que sugiere su uso para evaluar la eficiencia de las enmiendas que se emplean para corregir la acidez activa del suelo.
- Teniendo en cuenta los bajos contenidos de magnesio en los suelos de la zona cafetera de Colombia, las dolomitas pueden considerarse una fuente importante para corregir la acidez del suelo.

## LITERATURA CITADA

- Alcarde, J. C. (1983, agosto 30). Características de qualidade dos corretivos de acidez do solo. En Sociedade Brasileira da Ciência do Solo (Organizador), *Simpósio sobre "Acidez e Calagem" Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo* (15ª ed., pp. 11–22). Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, Campinas, São Paulo, Brasil.
- Alcarde, J. C., & Rodella, A. A. (1996). Avaliação química de corretivos de acidez para fins agrícolas: uma nova proposição. *Scientia Agricola*, 53(2–3), 211–216. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161996000200003>
- Álvarez, V. H., & Ribeiro, A. C. (1999). Calagem. En A. C. Ribeiro, P. T. G. Guimarães & V. H. Álvarez (Eds.), *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais–5ª Aproximação* (pp. 43–56). Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais.
- Araújo, S., Demattê, J., & Garbuio, F. (2009). Aplicação de calcário com diferentes graus de reatividade: alterações químicas no solo cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 1755–1764. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000600024>
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (1997). *UNE-EN12048 Fertilizantes sólidos y enmiendas calizas. Determinación del contenido de humedad. Método gravimétrico por desecación a (105±2) °C. (ISO 8190:1992 modificada)*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0010705>
- Athanase, N., Vicky, R., Jayne, M. N., & Sylvestre, H. (2013). Soil acidification and lime quality: sources of soil acidity, its effects on plant nutrients, efficiency of lime and liming requirements. *Agricultural Advances*, 2(9), 259–269. <http://ir-library.ku.ac.ke/handle/123456789/18732>
- Bellingieri, P., Alcarde, J. C., & Souza, E. (1989). Eficiência relativa de diferentes frações granulométricas de calcários na neutralização da acidez dos solos, avaliada em laboratório. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, 46(2), 303–317. <http://dx.doi.org/10.1590/S0071-12761989000200003>
- Bernier, R., & Alfaro, M. (2006). Acidez de los suelos y efectos del encalado. *Boletín INIA*, 151, 1–46. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7075>
- Bhering, L. (2017). Rbio: a tool for biometric and statistical analysis using the R platform. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 17(2), 187–190. <https://doi.org/10.1590/1984-70332017v17n2s29>
- Bolan, N. S., & Hedley, M. J. (2003). Role of carbon, nitrogen, and sulfur cycles in soil acidification. En Z. Rengel (Ed.), *Handbook of soil acidity* (pp. 29–56). CRC Press.

- Carey, P., Ketterings, Q., & Hunter, M. (2006). Liming materials, *Agronomy Fact Sheet Series*, 7, 1–2. <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet7.pdf>
- Casierra-Posada, F., & Aguilar-Avedaño, O. (2007). Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 1(2), 246–257. <https://doi.org/10.17584/rcch.2007v1i2.8701>
- Chaves, M. A. (1993). *Importancia de las características de calidad de los correctivos de acidez del suelo: desarrollo de un ejemplo práctico para su cálculo*. DIECA. <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/FWRvRZBUQIDHbUPBgumMDnGJIQUhHaTo>
- Coelho, A. (2004). Eficiência de calcários de diferentes granulometrias na correção da acidez do solo. *Comunicado Técnico MAPA*, 100, 1–4. <http://docs.agencia.cnptia.embrapa.br/milho/Comunicado100.pdf>
- Comisión Venezolana de Normas Industriales. (1981). *COVENIN 1816-81 Método de determinación de Zinc, Cobre, Hierro, Manganeseo, Calcio y Magnesio por absorción atómica*.
- De Filippo, B., & Ribeiro, A. (1997). *Boletim de Extensão 29: Análise química do solo (metodologia 2ª edição)*. Universidade Federal de Viçosa.
- Deus, A. C., Büll, L., Corrêa J., & Boas, R. (2014). Determination of reactivity rates of silicate particle-size fractions. *Revista Ceres*, 61(2), 265–272. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2014000200015>
- Duarte, A. P., Bognola, I. A., Alvarez, V. H., & Dias, L. E. (1993). Avaliação de métodos de determinação do poder de neutralização e teores de cálcio e magnésio de calcários. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 17(2), 305–310.
- Espinosa, J., & Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos*. International Plant Nutrition Institute.
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (1997). Integrated plant nutrient management for sustainable crop production. An overview. *International Journal of Tropical Agriculture*, 15, 1–18.
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2003). Fertility management of tropical acid soils for sustainable crop production. En Z. Rengel (Ed.), *Handbook of soil acidity* (pp. 359–386). CRC Press.
- Fageria, N. K., & Moreira, A. (2011). The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (1<sup>st</sup> ed., Vol. 110, pp. 251–331). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385531-2.00004-9>
- Fernández, S., & Noguera, R. (2003). Producción de fosfatos térmicos a partir de rocas fosfóricas nacionales. *Agronomía Tropical*, 53(1), 49–58.
- Galindo-López, F., Pinzón-Sandoval, E. H., Quintana-Blanco, W. A., Serrano, P. A., & Galán, M. (2018). Evaluación de un termofosfato en el crecimiento y producción de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) cv. ‘Albiñón’. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(1), 61–69. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n1.2018.663>
- Haby, V. A., & Leonard, A. T. (2002). Limestone Quality and Effectiveness for Neutralizing Soil Acidity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(15–18), 2935–2948. <https://doi.org/10.1081/CSS-120014492>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil Fertility and Fertilizers : an introduction to nutrient management*. (8a ed.). Pearson.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2000). *NTC 1361–Abonos o fertilizantes. Roca fosfórica para aplicación directa al suelo*. <https://tienda.icontec.org/gp-abonos-o-fertilizantes-roca-fosforica-para-aplicacion-directa-al-suelo-ntc1361-2000.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2006). *NTC 5424–Productos químicos básicos para la industria agrícola. Enmiendas inorgánicas*. <https://tienda.icontec.org/gp-productos-quimicos-basicos-para-la-industria-agricola-enmiendas-inorganicas-ntc5424-2006.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2011). *NTC 5167 Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. <https://tienda.icontec.org/gp-productos-para-la-industria-agricola-productos-organicos-usados-como-abonos-o-fertilizantes-y-enmiendas-o-acondicionadores-de-suelo-ntc5167-2011.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017). *NTC 40–Abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. <https://tienda.icontec.org/gp-abonos-o-fertilizantes-y-enmiendas-o-acondicionadores-de-suelo-etiquetado-ntc40-2017.html>

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019). *NTC 1927. Fertilizantes y acondicionadores de suelos. Definiciones y clasificación*. <https://tienda.icontec.org/gp-fertilizantes-y-acondicionadores-de-suelos-definiciones-y-clasificacion-ntc1927-2019.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2000). *NTC 1361–Abonos o fertilizantes. Roca fosfórica para aplicación directa al suelo*. <https://tienda.icontec.org/gp-abonos-o-fertilizantes-roca-fosforica-para-aplicacion-directa-al-suelo-ntc1361-2000.html>
- Malavolta, E. (1993). *Nutrição mineral e adubação do cafeeiro: Colheitas econômicas máximas*. Editora Agronômica Ceres.
- Mullins, G. L., Alley, M. M., Phillips, S. B., & Maguire, R. (2019). Sources of lime for acid soils in Virginia. *Virginia Cooperative Extension. Publications 452-510*, 1–11. <https://www.pubs.ext.vt.edu/452/452-510/452-510.html>
- Upjohn, B., Fenton, G., & Conyers, M. (2005). *Soil acidity and liming* (4<sup>th</sup> ed.). NSW Department of Primary Industries.
- Pinochet, D., Ramírez, F., & Suárez, D. (2005). Evaluación de la calidad agrícola de cuatro enmiendas calcáreas en un suelo ácido derivado de cenizas volcánicas. *Agro Sur*, 33(1), 29–35. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2005.v33n1-04>
- Prado, R. M., Natale, W., Fernandes, F. M., & Corrêa, M. C. (2004). Reatividade de uma escória de siderurgia em um latossolo vermelho distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28(1), 197–205. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100019>
- Primavesi, A., & Primavesi, O. (2004). *Documentos 37. Características de corretivos agrícolas*. Embrapa. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/42323/caracteristicas-de-corretivos-agricolas>
- Sadeghian, S. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 466, 1–12. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/704>
- Sadeghian, S., & Díaz-Marín, C. (2020a). Corrección de la acidez del suelo: Efectos en el crecimiento inicial del café. *Revista Cenicafé*, 71(1), 21–31. <https://doi.org/10.38141/10778/1117>
- Sadeghian, S., & Díaz-Marín, C. (2020b). Corrección de la acidez del suelo: Alteraciones químicas del suelo. *Revista Cenicafé*, 71(1), 7–20. <https://doi.org/10.38141/10778/1116>
- Sánchez, J. D. (2012). Acidez de los suelos y su manejo. *Boletín Técnico Cenibanano*, 3, 1–10.
- Soratto, R., & Crusciol, C. A. (2008). Métodos de determinação de cálcio e magnésio trocáveis e estimativa do calcário residual em um Latossolo submetido à aplicação de calcário e gesso em superfície. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(2), 663–673. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200021>
- Viadé, A., Fernández-Marcos, M., Hernández-Nistal, J., & Álvarez, E. (2011). Effect of particle size of limestone on Ca, Mg and K contents in soil and in sward plants. *Scientia Agrícola*, 68(2), 200–208. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162011000200010>