

Poder Reactivo de Alcalinización de la Cal Producida en las Canteras del Municipio
de Málaga Santander, Colombia

Diego Ferney Quintero Roa, Sebastián Armando Jaimes Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Zootecnista

Director

Botero Londoño Julián Mauricio

PhD en Ciencias Agrarias

Codirectora

Elsa Judith Macías Bermúdez

Geóloga

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia - IPRED

Programa de Zootecnia

Málaga

2019

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Planteamiento del problema.....	15
2.1 Definición del problema	15
2.2 Justificación	15
2.3 Hipótesis	16
3. Marco Referencial.....	16
3.1 Marco teórico.....	16
3.2 Marco conceptual.....	21
3.2.3 Propiedades físicas del suelo. De acuerdo con su clasificación son las siguientes:	24
3.3 Marco histórico de la investigación	28
3.4 Marco Jurídico, Normativo e Institucional	31
4. Metodología	32
4.1 Fase 1: Caracterización del suelo.....	32
4.2 Fase 2: Determinación de las características del material alcalizante	32
4.3 Fase 3: Determinación de los tratamientos	33
4.4 Fase 4: Diseño experimental.....	34

4.5 Fase 5: Aplicación de tratamientos	34
4.6 Fase 6: Determinación de pH de los tratamientos	34
4.7 Fase 7: Determinación de Aluminio intercambiable en los tratamientos	34
4.8 Fase 8. Análisis estadístico	35
5. Resultados	35
5.1 Fase 1: Caracterización del suelo.....	35
5.1.1 Análisis químico del suelo. Se encontraron los siguientes resultados.	36
5.1.2 Análisis físico del suelo. Se clasifican de acuerdo a la siguiente manera:	38
5.1.3 Clasificación taxonómica del suelo.	42
5.2 Fase 2: Características del material alcalinizante	43
5.2.1 Características químicas del material alcalinizante	43
5.2.2 Pureza química de la cal.	44
5.2.3 Tamaño de la partícula.....	44
5.2.4 Poder relativo de la neutralización.....	45
5.3 Fase 3: Determinación de los tratamientos	46
5.4 Fase 4: Diseño experimental.....	47
5.5 Fase 6: Determinación de pH de los tratamientos.	47
5.6 Etapa de cuantificación	55
5.6.1 Acidez intercambiable.	55
5.6.2 Diferenciación entre aluminio e hidrógeno intercambiable.....	55

6. Conclusiones.....	58
7. Recomendaciones.....	58
Referencias bibliográficas	60
Apéndices	65

Lista de Tablas

Tabla 1. Escala de valores de pH en el suelo	19
Tabla 2. Factores de corrección en base de la temperatura de suspensión.	25
Tabla 3. Análisis químico del suelo	36
Tabla 4. Saturación de bases	38
Tabla 5. Relaciones iónicas.....	38
Tabla 6. Informe de resultados laboratorio químico de consultas Industriales matriz de la muestra Cal Caliza Cal Travertino.....	43
Tabla 7. Tamaño de la partícula de Cal Caliza y Cal Travertino.....	44
Tabla 8. Diseño experimental	47
Tabla 9. Medición de pH	48
Tabla 10. Tratamientos PT100 y PC100 en referencia a la variable pH.....	49
Tabla 11. Tratamientos PT200 y PC200 en referencia a la variable pH.....	49
Tabla 12. Tratamientos PT300 y PC300 en referencia a la variable pH.....	50
Tabla 13. Tratamientos PT400 y PC400 en referencia a la variable pH.....	51
Tabla 14. Tratamientos T100 y C100 en referencia a la variable pH.....	52
Tabla 15. Tratamientos T200 y C200 en referencia a la variable pH.....	52
Tabla 16. Tratamientos T300 y C300 en referencia a la variable pH.....	53
Tabla 17. Tratamientos T400 y C400 en referencia a la variable pH.....	54
Tabla 18. Medición de Aluminio Intercambiable.	57

Lista de Figuras

Figura 1. Disponibilidad de los nutrientes en el suelo en función del pH.	20
Figura 2. Triángulo de las diversas texturas del suelo.	26
Figura 3. Tratamientos PT100 y PC100 en referencia a la variable pH.	49
Figura 4. Tratamientos PT200 y PC200 en referencia a la variable pH.	50
Figura 5. Tratamientos PT300 y PC300 en referencia a la variable pH.	50
Figura 6. Tratamientos PT400 y PC400 en referencia a la variable pH.	51
Figura 7. Tratamientos T100 y C100 en referencia a la variable pH	52
Figura 8. Tratamientos T200 y C200 en referencia a la variable pH.	53
Figura 9. Tratamientos T300 y C300 en referencia a la variable pH.	53
Figura 10. Tratamientos T400 y C400 en referencia a la variable pH.	54

Lista de Apéndices

Apéndice A. Material alcalizante en la zona de estudio	65
Apéndice B. Determinación de pH	66
Apéndice C. Determinación de acidez intercambiable	67
Apéndice D. Análisis físico	68

RESUMEN

TÍTULO: PODER REACTIVO DE ALCALINIZACIÓN DE LA CAL PRODUCIDA EN LAS CANTERAS DEL MUNICIPIO DE MÁLAGA SANTANDER, COLOMBIA*

AUTOR: DIEGO FERNEY QUINTERO ROA
SEBASTIÁN ARMANDO JAIMES RODRÍGUEZ**

PALABRAS CLAVES: SUELOS ÁCIDOS, CAL CALIZA, CAL TRAVERTINO, POTENCIAL DE HIDRÓGENO, ACIDEZ

DESCRIPCIÓN:

El proceso de encalado constituye una de las principales prácticas más utilizadas para corregir los suelos que presentan acidez y alto porcentaje de saturación de aluminio, en la presente investigación se emplearon dos tipos de alcalizante, Cal Calcita y Cal Travertino obtenidos de las canteras de Málaga - Santander, determinando su poder reactivo y sus características químicas para ser aplicadas a diferentes concentraciones y con dos tipos de incorporación (superficial y a 10 cm de profundidad), teniendo en cuenta las propiedades químicas, físicas y tipo de suelo que presentaba el área de estudio.

El comportamiento de estos materiales se determinó a través de ocho análisis realizados quincenalmente para cuantificar el Potencial de Hidrógeno (pH) y cuatro procedimientos tomados mensualmente para establecer el grado de acidez ya sea definido por Hidrógeno o por Aluminio intercambiables; El tratamiento picoteado con caliza (PC400) fue el tratamiento que mejor tuvo respuesta 120 días después de su aplicación a 10 cm de la capa superficial del suelo con la concentración más alta de Cal Calcita y el tratamiento picoteado con Travertino (PT100) fue el tratamiento que registro el valor más alto de acidez en el día 30 después de su aplicación incorporado a 10 cm y con la concentración más baja de Cal Travertino.

*Trabajo de grado

**Instituto de Proyección Regional y a Distancia IPRED. Programa de Zootecnia
Director: Julián Mauricio Botero Londoño, PhD en Ciencias Agrarias.

ABSTRACT

TITLE: REACTIVE POWER OF ALKALINISATION OF THE CAL PRODUCED IN THE QUARRIES OF THE MUNICIPALITY OF MÁLAGA SANTANDER, COLOMBIA^{*}

AUTHOR: DIEGO FERNEY QUINTERO ROA
SEBASTIÁN ARMANDO JAIMES RODRÍGUEZ^{**}

KEYWORDS: SOIL ACIDS, CALIZA LIME, TRAVERTINO LIME, HYDROGEN POTENTIAL, ACIDITY

DESCRIPTION:

The liming process is one of the most used practices to correct soils that have acidity and a high percentage of aluminum saturation, in this investigation two types of alkalizing agents were used, Cal Calcita and Cal Travertino require the quarries of Malaga - Santander , determining its reactive power and its chemical characteristics to be applied to different substances and with two types of specification (superficial and 10 cm deep), taking into account the chemical, physical and soil type properties of the study area.

The behavior of these materials is determined through eight biweekly analyzes to quantify Hydrogen Potential (pH) and four procedures taken monthly to establish the degree of acidity and sea defined by interchangeable Hydrogen or Aluminum; The treatment pecked with limestone (PC400) was the treatment that had the best response 120 days after its application to 10 cm of the surface layer of the soil with the highest concentration of Cal Calcite and the treatment pecked with travertine (PT100) was the treatment which records the highest value of acidity on day 30 after its application incorporated to 10 cm and with the lowest concentration of Travertine Lime.

^{*}Bachelor Thesis

^{**}Instituto de Proyección Regional y a Distancia IPRED. Programa de Zootecnia
Director: Julián Mauricio Botero Londoño, PhD en Ciencias Agrarias.

Introducción

La acidez es uno de los problemas más frecuentes en los suelos del oriente del sur de Santander, este factor incide en los procesos fisicoquímicos y en la fertilidad del suelo reduciendo la solubilidad de los nutrientes para la vegetación e incrementa la intoxicación en los animales presentes en la zona (Zapata, 2004).

El proceso de encalamiento es una técnica que se ha implementado a través de los años la cual consiste en la aplicación de compuestos de Calcio y Magnesio que son capaces de reducir la acidez e incrementar el pH (Espinosa y Molina, 1999) este proceso se ha realizado con diversos elementos inorgánicos pero el Carbonato de Calcio (CaCO_3) y la Cal Travertino por su fácil adquisición y efectividad fueron los correctores utilizados en el presente estudio, el poder reactivo y su eficiencia en la zona de estudio se determinó teniendo en cuenta las características químicas de esta y así asegurar la sostenibilidad de la corrección e inhibir la hematuria enzoótica en los bovinos de la zona.

El proceso correctivo se llevó a cabo en la finca Guayacanal ubicada en la Vereda Sagamal del municipio de San José de Miranda, mediante la aplicación de los dos tipos de alcalizante a diferentes concentraciones (1000, 2000, 3000 y 4000 Kg/ha) y en dos tipos de aplicación (superficial e incorporado a 10 cm) realizando análisis de laboratorio cada 15 días para pH y cada 30 días para acidez intercambiable respectivamente con el fin de medir periódicamente su comportamiento y la evaluación de los porcentajes de los elementos químicos que conforman dicho correctivo inorgánico y su efectividad en la zona estudiada.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar el poder reactivo de alcalinización de la cal producida en las canteras del Municipio de Málaga Santander.

1.2 Objetivos específicos

Caracterizar el suelo y cales de piedra caliza y piedra travertino producidas en las canteras del municipio de Málaga- Santander.

Determinar el poder reactivo de alcalinización en relación de pH y el equivalente químico de las cales producidas en las canteras del Municipio de Málaga.

Determinar el poder de neutralización de la acidez intercambiable de la cal producida en las canteras del municipio de Málaga en un Entisol del municipio de San José de Miranda.

2. Planteamiento del problema

2.1 Definición del problema

En la finca Guayacanal ubicada en la vereda Sagamal del municipio de San José de Miranda, predominan suelos con un alto grado de acidez, derivado del clima, condiciones climáticas y material parental; En Colombia el nivel de acidez esta alrededor del 80%, siendo más notorio en zonas donde no se ha racionalizado el uso del suelo, convirtiendo los procesos forestales y agrícolas en imperativos y poco productivos (Alvarado y Fallas, 2004); en plantas la acidez por aluminio reduce la disponibilidad de nutrientes, el crecimiento radicular y el desarrollo de la parte aérea de la planta (Casierra y Aguilar, 2007); en bovinos el consumo de plantas presentes en suelos con este tipo de acidez produce baja fertilidad y hematuria (presencia de sangre en la orina) debido a la aparición de pequeños tumores localizados en la vejiga urinaria.

2.2 Justificación

El alto grado de acidez en los suelos del trópico se ha convertido en una problemática inminente, aunque se han desarrollado procesos de neutralización no se pueden generalizar las enmiendas existentes para todos los suelos debido a las diferentes características químicas que posee cada uno de ellos (Zetina *et al.*, 2002); en respuesta a esto, se debe corregir este fenómeno químico de la manera más particular posible sin excluir la posibilidad de trabajar de la misma manera en zonas donde se presenten las mismas características bióticas y abióticas ya que estos factores mantienen una interacción directa en la evolución de los suelos (Osorno, 2012).

Debido a la inexistencia de estudios relacionados con las características de las cales comercializadas en las canteras durante todos estos años los productores agropecuarios han estado aplicando este tipo de cales sin tener en cuenta el tipo y cantidad de componentes que le están suministrando al suelo, por ello un estudio práctico en la zona contribuirá para que los productores de la región realicen buenas prácticas alcalizantes en sus cultivos sin alterar de manera negativa la composición química del suelo y de esta manera convertirlos en improductivos.

2.3 Hipótesis

Dado la presencia de acidez en los suelos y a su vez el aumento de problemas de salud en bovinos, entonces se precisa determinar el poder reactivo de Cal Calcita y Cal Travertino en fase de campo.

3. Marco Referencial

3.1 Marco teórico

3.1.1 Acidez. Un ácido es una sustancia que tiende a entregar protones (iones de hidrógeno H^+), por ello la acidez de una solución está determinada por la actividad de los iones de este elemento; en este orden de ideas se deduce que la acidez del suelo se expresa como un parámetro denominado potencial de hidrogeno pH (Lukin y Epplin, 2003).

La nitrificación consiste en el paso del ion amonio $-NH_4^+$ a nitrato $-NO_3^-$ en este proceso por cada NH_4^+ se liberan dos H^+ , los cuales aumentan la acidez. De esta manera, la nitrificación es uno de los procesos más importantes en la acidificación de los suelos. Aunque esto sucede de manera

natural (En las fases finales de la mineralización de la materia orgánica del suelo y de los residuos orgánicos) su ocurrencia aumenta por la adición de fertilizantes amoniacales o aquellos que conllevan a la formación de este compuesto, por ejemplo, sulfato de amonio, nitrato de amonio y urea (Van, 2011).

3.1.2 Clasificación de la acidez. La acidez de los suelos se puede aludir a diferentes factores que pueden estar estrechamente relacionados con la composición química de los suelos de esta manera la acidez se puede clasificar en acidez activa, intercambiable, no intercambiable y potencial (Espinosa y Molina, 1999).

3.1.2.1 Acidez activa. La acidez activa está relacionada directamente con el Hidrógeno (H^+) disociado en la solución del suelo y proviene de diferentes fuentes orgánicas e inorgánicas que están relacionadas directamente con este recurso.

3.1.2.2 Acidez intercambiable. La acidez intercambiable refiere al Hidrógeno y Aluminio (H^+ , Al^{3+}) presentes en el recurso suelo.

3.1.2.3 Acidez no intercambiable. La acidez no intercambiable refiere al hidrógeno en enlace covalente en la superficie de los minerales arcillosos de carga variable.

3.1.2.4 Acidez potencial. La acidez potencial es la suma de la acidez intercambiable y la no intercambiable

3.1.3 Suelos ácidos. Los suelos ácidos que son conflictivos para plantas son aquellos clasificados en los rangos de pH menores a 5,5 y que contienen una saturación de Aluminio mayor al 85%, deficiencias de Molibdeno y otras condiciones restringentes para las plantas. (Castro, 2003); una gran parte de los suelos ácidos pertenecen a Acrisoles, Alisoles, Podzoles y subgrupos Dístricos de otros suelos, un caso extremo de un suelo ácido es un suelo con ácido sulfato como los Fluvisoles Tiónicos, Cambisoles y Tiónicos (Jaramillo, 2014).

3.1.4 Cal agrícola o calcita. Este es el material más utilizado para encalar los suelos y contiene principalmente carbonato de calcio (CaCO_3). Se obtiene a partir de roca caliza y roca calcárea, se muele y luego se cierne en mallas de diferente tamaño, las rocas calizas no son puras y pueden contener impurezas, arcillas, hierro, arena y granos de limo que reducen el contenido de carbonato, en su forma pura contiene 40% de Ca. Las reacciones de los carbonatos de calcio y magnesio en presencia de agua liberan iones hidroxilo (OH^-), los cuales se unen con H^+ para formar agua y así neutralizar la acidez; adicionalmente el aluminio $-\text{Al}^{3+}$ se precipita como $\text{Al}(\text{OH})^3$, forma en la cual no es toxico para las plantas (Sadeghian, 2016).

3.1.5 Cal Travertino. La Cal obtenida a través de la roca sedimentaria del travertino es un material rico en calcita ya que esta roca se desarrolla en fuentes termales ricas en carbonato de calcio, como el aragonito y pequeñas porciones de limonita y mineral de óxido de hierro.

Sus cualidades físico- químicas lo diferencian de la caliza, el mármol o el granito con los que generalmente se confunde; se puede encontrar en color beige, amarillo, blanco y rosa; aunque existen variedades marrones inclusive negras (Galán y Nieto, 2004).

3.1.6 Potencial de hidrógeno (pH). El potencial de hidrógeno se define en forma algorítmica de la actividad de iones H^+ ; la escala del pH cubre un rango que va de 0 a 14, siendo 7 un valor neutro, puesto que si una muestra presenta este valor nos indica que existe un número de iones H^+ y OH^- en igual proporción; los valores menores que 7 nos indica acidez y por encima de 7 nos indican basicidad.

El significado práctico de esta expresión nos indica que cada unidad de cambio de pH corresponde a un incremento de 10 veces en la cantidad de acidez y basicidad del suelo, es decir, un suelo con un pH 5 tiene 10 veces más H^+ activo que un suelo con pH 6 (Kemmitt *et al.*, 2006), esta clasificación se puede agrupar en diferentes categorías (Ver en Tabla 1).

Tabla 1.

Escala de valores de pH en el suelo

pH	Clasificación	Designación	Acidez / Basicidad en pH 7
< 3,5	Ultra ácido	Acidez	1000000
3,5- 4,4	Extremadamente ácido	Acidez	100000
4,5 -5,0	Muy fuertemente ácido	Acidez	10000
5,1 - 5,5	Fuertemente ácido	Acidez	1000
5,6 - 6,0	Moderadamente ácido	Acidez	100
6,1- 6,5	Ligeramente ácido	Acidez	10
6,6 - 7,3	Neutro	Neutro	0
7,4 - 7,8	Ligeramente alcalino	Basicidad	10
7,9 -8,4	Moderadamente alcalino	Basicidad	100
8,5 - 9,0	Fuertemente alcalino	Basicidad	1000
> 9,0	Muy fuertemente alcalino	Basicidad	10000

**Nota:* Valores de pH para los suelos. Adaptado de: Espinosa y Molina (1999). Acidez y encalado de los suelos. Quito, Ecuador: Instituto Internacional de Nutrición Vegetal.

Además, este factor determina la disponibilidad de macro y micronutrientes presentes en el suelo (Figura 1).

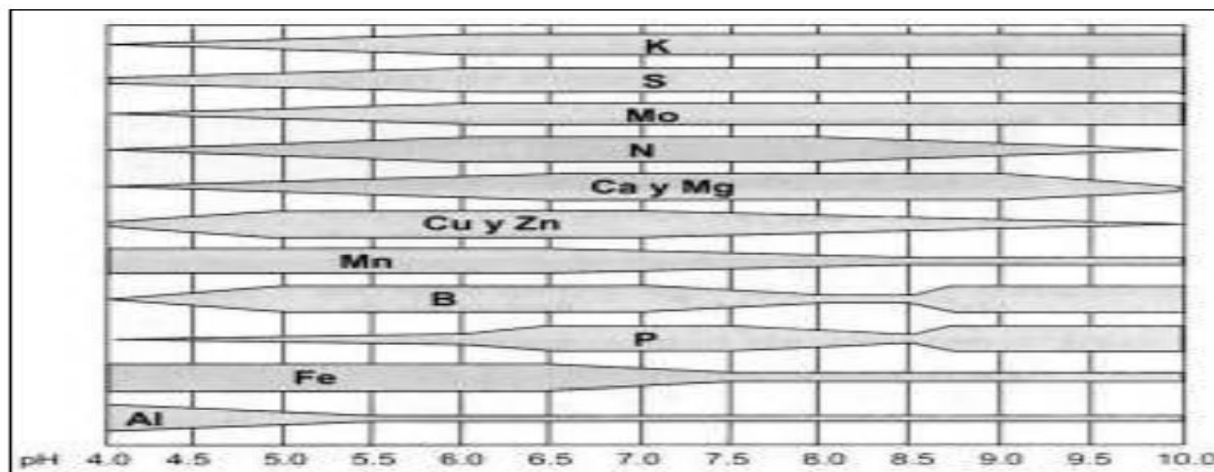


Figura 1. Disponibilidad de los nutrientes en el suelo en función del pH. Adaptado de: Quiroga y Bono (2012). Manual de fertilidad y evaluación de suelos. La Pampa, Argentina: INTA. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_pt_89_manual_de_fertilidad_1_1_.pdf

3.1.7 Aluminio e hidrógeno intercambiables. El aluminio e hidrógeno intercambiables son variables que interfieren en el proceso de acidez en el suelo y se pueden definir así:

3.1.7.1 Aluminio intercambiable. El aluminio en el suelo por encima del 15% de la corteza terrestre está compuesta por Al_2O_3 , el cual es tan poco soluble en suelos neutros o alcalinos que no alcanzaría concentraciones tóxicas para los vegetales ni animales; sin embargo, con la reducción del pH del suelo se incrementa la solubilidad del aluminio hasta llegar a ocupar más de la mitad de los sitios de intercambio iónico del suelo (Wallnöfer y Engelhardt, 1995).

Por ello este elemento se reporta como el factor más limitante de la producción agrícola en suelos ácidos, los cuales comprenden alrededor del 40% de la superficie cultivable en el mundo (Matzner y Prenzel, 1992; Ma, 2000) la cantidad de este elemento depende directamente

del pH en el recurso, ya que entre más se reduzca el pH del suelo habrá más incremento de Al y altas concentraciones de Aluminio intercambiable Al^{3+} (Zetina *et al.*, 2005, Ma, 2000; Matsumoto, 2000; López *et al.*, 2000).

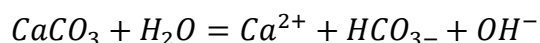
3.1.7.2 Hidrógeno intercambiable. El hidrógeno intercambiable en el suelo se encuentra presente en el recurso en cantidades medibles, cuando el valor de pH se encuentra menor a 4 unidades, por lo tanto, es de importancia solamente en materiales coloidales de suelos muy ácidos (Kass, 1998).

3.2 Marco conceptual

3.2.1 Encalado o neutralización de la acidez del suelo. El encalamiento principalmente consiste en la corrección de los suelos con la implementación de sustancias ya sea por defecto de basicidad o acidez; estos elementos modifican la dinámica química del recurso, contrarrestando y modificando la cantidad de iones de hidrogeno y de aluminio intercambiable. (Osorno, 2012; Alvarado y Fallas, 2004; Zapata, 2004).

Este proceso se ha implementado con diversos elementos inorgánicos pero el más empleado ha sido el Carbonato de Calcio ($CaCO_3$) y la Cal Travertino por su fácil adquisición y efectividad; por ello se implementarán en nuestro objeto de estudio, determinando en primera instancia el poder reactivo de estos componentes y la eficiencia en la zona de estudio.

En disolución acuosa, el carbonato de calcio ($CaCO_3$), se disuelve o hidroliza para formar iones hidroxilos u OH^- , con base en la siguiente reacción.



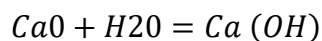
3.2.2 Materiales de encalado. Existen diferentes materiales que pueden elevar el pH de los suelos, con el fin de corregir el efecto ácido de este recurso (Castro y Gómez, 2010), entre estos materiales se pueden citar:

3.2.2.1 Óxido de calcio. El óxido de calcio (CaO), también conocido como cal viva o cal quemada, es un polvo blanco muy difícil y desagradable de manejar. Se fabrica calcinando al horno piedra caliza lo que produce la siguiente reacción:



Cuando se aplica en suelo ácido reacciona de inmediato y por esta razón este material es ideal cuando se desean resultados rápidos (iguales resultados se obtienen con el hidróxido de calcio). La velocidad de la reacción se debe a que, por ser un óxido, reacciona rápidamente al ponerse en contacto con el agua provocando una fuerte reacción exotérmica que libera iones OH^- . Este material debe mezclarse inmediatamente debido a que se endurece rápidamente al ponerse en contacto con la humedad del suelo, haciéndose inefectivo. El óxido de calcio puro contiene 71% de Ca (Osorno, 2012).

3.2.2.2 Hidróxido de Calcio. El hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], se conoce también como cal apagada o cal hidratada y se obtiene a partir de la reacción del óxido de calcio con agua de acuerdo a la siguiente reacción:



Es una sustancia blanca polvorienta, se debe aplicar rápidamente al suelo. Este material tiene un efecto intermedio entre óxido de calcio y el carbonato de calcio para neutralizar la acidez del suelo. En forma pura presenta 56% de Ca (Osorno, 2012).

3.2.2.3 Cal agrícola o calcita. Este es el material más utilizado para encalar los suelos y contiene principalmente carbonato de calcio (CaCO_3). Se obtiene a partir de roca caliza y roca calcárea, se muele y luego se cierne en mallas de diferente tamaño, las rocas calizas no son puras y pueden contener impurezas, arcillas, hierro, arena y granos de limo que reducen el contenido de carbonato, en su forma pura contiene 40% de Ca. Las reacciones de los carbonatos de calcio y magnesio en presencia de agua liberan iones hidroxilo (OH^-), los cuales se unen con H^+ para formar agua y así neutralizar la acidez; adicionalmente el aluminio $-\text{Al}^{3+}$ se precipita como $\text{Al}(\text{OH})_3$, forma en la cual no es toxico para las plantas (Sadeghian, 2016).

3.2.2.4 Dolomita. El carbonato doble de calcio y magnesio (CaCO_3 - MgCO_3) se denomina dolomita. El material puro contiene 21.6% de Ca y 13.1% de Mg. Aunque la dolomita reacciona más lentamente en el suelo que la calcita, tiene la ventaja de que suministra Mg, elemento con frecuencia deficiente en suelos ácidos (Osorno, 2012).

3.2.2.5 Óxido de Magnesio. El óxido de magnesio (MgO) es un material de encalado que contiene solamente Mg en una concentración de 60%. Su capacidad de neutralizar la acidez es mucho más elevada que la de otros materiales, pero, por su poca solubilidad en agua, debe ser molido finamente para que controle adecuadamente la acidez del suelo. Es fuente excelente de Mg en suelos ácidos que frecuentemente tienen también deficiencia de este nutriente (Cakmak, 2010).

3.2.2.6 Magnesita. Es un producto a base de carbonato de magnesio (MgCO_3), que en su forma pura posee un contenido de Mg de 28.5%; es una buena fuente de Mg (Osorno, 2012).

3.2.2.7 Arcillas calcáreas. Son depósitos no consolidados de CaCO_3 , conocidos también como margas, de textura arcillosa y con gran cantidad de impurezas. Por lo general, este material se maneja en húmedo lo que disminuye su eficiencia (Castro, 2008).

3.2.2.8 Escorias industriales. Son residuos de la industria del acero (escorias básicas) y la fundición del hierro; estas escorias contienen silicatos de calcio (CaSiO_3) y silicato de Magnesio (MgSiO_3) y neutralizan la acidez del suelo a través de la hidrólisis del ión silicato (SiO_3); su capacidad para neutralizar la acidez del suelo es similar al CaCO_3 (Alvarado *et al.*, 2010).

3.2.3 Propiedades físicas del suelo. De acuerdo con su clasificación son las siguientes:

3.2.3.1 Textura. Se puede definir la textura como la relación existente entre el conjunto de las diferentes fracciones granulométricas que constituyen el suelo, esta propiedad puede variar en cada uno de los horizontes del suelo y se considera óptima mientras allá un buen desarrollo vegetal por lo cual se considera en excelentes condiciones cuando el cultivo o plantación lo considere (García, 2005).

Esta propiedad del suelo interfiere directamente con la efectividad del encalado ya que en suelos que presentan una textura liviana se presencia una gran lixiviación del material encalante, en los suelos que contienen textura arenosa se deben encalar con mayor frecuencia ya que presencia una alta distribución de las partículas en el recurso a diferencia del comportamiento de los suelos arcillosos los cuales no requieren de un encalado constante (Molina, 1998).

El método de Bouyoucos desarrollado en 1962 utilizando el hidrómetro, toma en cuenta dos lecturas de la solución preparada para hacer una clasificación de las partículas del suelo y así

obtener un porcentaje de cada una de ellas para finalmente determinar la textura en el triángulo textural, teniendo en cuenta los factores de corrección en base de la temperatura de suspensión (Ver en Tabla 2).

Tabla 2.

Factores de corrección en base de la temperatura de suspensión.

Temperatura (°C)	Factor de corrección
14	-1.46
16	-0.98
18	-0.440
19.44 (67°F)	0.00
20	+0.18
21	+0.52
22	+0.86
23	+1.23
24	+1.61
25	+2.00
26	+2.41
27	+2.85
28	+3.28
29	+3.74
30	+4.20

*Nota: Factores de corrección en base de la temperatura de suspensión. Adaptado de McKean (1993). Manual de análisis de suelos y tejido vegetal una guía teórica y práctica de metodologías. Palmira, Valle del Cauca: CIAT. Recuperado de [http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos/Ciat/Digital/S593.M2 Manual de análisis de suelos y tejido vegetal Una guía teórica y práctica de metodología.pdf](http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos/Ciat/Digital/S593.M2%20Manual%20de%20an%C3%A1lisis%20de%20suelos%20y%20tejido%20vegetal%20Una%20gu%C3%ADa%20te%C3%B3rica%20y%20pr%C3%A1ctica%20de%20metodolog%C3%ADa.pdf)

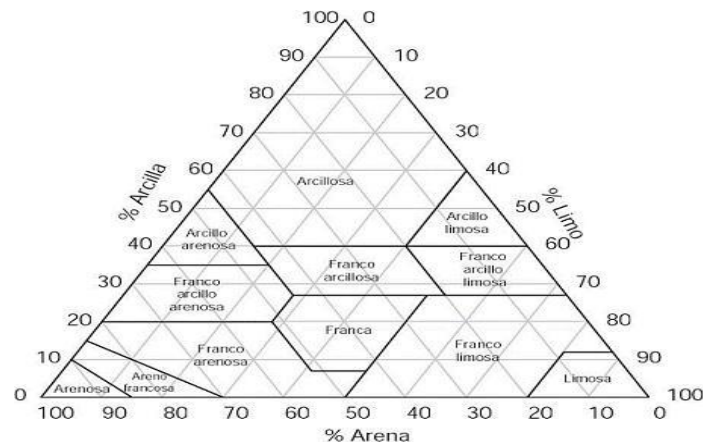


Figura 2. Triángulo de las diversas texturas del suelo. Adaptado Soil Survey Staff. (2014). Claves para la Taxonomía de Suelos. California, Estados Unidos: USDA. Recuperado de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf

3.2.3.2 Densidad aparente y real. La densidad real se puede definir como la densidad de la fase sólida y la densidad aparente refleja la masa de una unidad de volumen de suelo seco y no perturbado, para que incluya tanto a la fase solida como a la gaseosa englobada a ella (García, 2015).

3.2.3.3 Porosidad. La porosidad del suelo viene representada por el porcentaje de huecos existentes en el mismo, frente al volumen total; este factor depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo.

El cálculo de la porosidad total puede hacerse mediante los valores de la densidad real y aparente, de forma que la masa de la fase sólida de un volumen unitario vendría expresada por el valor de la densidad aparente, y el volumen ocupado por esa fase solida lo definiría el cociente entre su masa y la densidad real de dicha fase sólida:

Teniendo en cuenta las variables: masa de suelo en un metro cúbico como d_a Mg, volumen ocupado por la masa anterior como d_r m³, volumen de poros en un metro cúbico de suelo como $(1 - d_a/d_r)$ m³; el porcentaje de porosidad vendrá expresado por:

$$P = 100 (1 - d_a/d_r) \%$$

Siendo d_a y d_r los valores de densidad aparente y real respectivamente y P el porcentaje de huecos del suelo u horizonte considerado.

Para una correcta aireación del suelo y una buena retención de agua, es conveniente que la porosidad se sitúe entre el 40 % y el 60 %. Valores menores del límite inferior pueden crear asfixia

en las raíces, contenidos de agua retenida muy bajos, o ambas cosas a la vez. Un valor superior al límite máximo supone una dificultada para el contacto entre el suelo y las raíces de las plantas (García, 2005).

3.2.4 Factores que afectan el índice de reacción de los materiales usados para encalar suelos.

Teniendo en cuenta que las propiedades físicas del suelo inciden en el proceso de neutralización, también existen diferentes factores que interfieren directa o indirectamente en el proceso de corrección de los suelos (Kass, 1998) y estos se pueden definir así:

3.2.4.1 Fuente o material neutralizante. La efectividad del material que se empleara en la alcalinización del suelo depende directamente de su equivalencia con el carbonato de calcio (CaCO_3), y del peso molecular del carbonato de calcio puro. Para determinar esta efectividad se realiza una comparación de los pesos moleculares del calcio puro y del material que se empleara en la neutralización, teniendo en cuenta que el equivalente químico es postulado en aproximadamente 100% (Espinosa y Molina, 1999).

3.2.4.2 La solubilidad. El índice de neutralización depende de la velocidad de disolución e hidrólisis del elemento encalante para formar iones hidroxilos (OH^{-1}). Se ha determinado que la cal calcita que solo contiene calcio es el material neutralizante más soluble.

3.2.4.3 El tamaño de las partículas de la cal. Debido a que las partículas utilizadas para encalar son de solubilidad limitada, la velocidad y cantidad de disolución de los materiales calcáreos

aplicados al suelo, cuando se encala, depende de la superficie específica del material en contacto con el suelo.

El grado de molienda para una condición óptima de caliza molida oscila entre 0,30 mm de diámetro.

3.2.4.4 El manejo. La velocidad de neutralización del suelo depende del manejo que se le da al material alcalizante y al recurso suelo, se recomienda una mezcla posterior de estos dos elementos o la utilización de un arado cuando el recurso tiene importancia agrícola.

3.2.4.5 Los factores ambientales. Los factores ambientales también influyen significativamente en el proceso de neutralización de la acidez, ya que las variables climáticas como humedad y temperatura influyen en la velocidad de disolución del carbonato de calcio (CaCO_3) y en consecuencia en la neutralización del suelo.

3.3 Marco histórico de la investigación

En el programa de Ingeniería Agrónoma del Instituto Tecnológico de Costa Rica en el año 2006, se llevó a cabo el proyecto titulado “Evaluación del efecto de una enmienda calcárea en la producción de *Brachiaria brizantha* en un suelo Ultisol de Pocosol, San Carlos” donde su objetivo general fue evaluar el efecto del encalado en la producción de *Brachiaria brizantha* en un suelo Ultisol en una finca dedicada a la ganadería donde se pastoreaban bovinos machos de engorde, en este tratamiento se aplicaron tres niveles de carbonato de calcio, cero, una y dos toneladas por hectárea, siendo el nivel cero el testigo. En los resultados obtenidos se determinó un aumento en

alrededor de media tonelada (19%) por hectárea en la producción de forraje fresco y 0.1 tonelada (24%) en la producción de materia seca por cada aumento en la dosis de encalado (Salas, 2006).

En ciénaga de oro, Córdoba en el año 2008 en la finca “el Deseo” se desarrolló la investigación titulada “Crecimiento de *Brachiaria decumbens* Stapf y *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst en suelos sulfatados ácidos de Córdoba” en la cual se logró determinar el efecto químico de dosis de cal en suelos sulfatados ácidos (SSA) con 3, 6 y 9 toneladas de cal agrícola por hectárea y las respuestas fisiológicas de *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst (pasto estrella) y *Brachiaria decumbens* Stapf (pasto barichara); sus resultados indican que los valores de pH del suelo aumentaron, las concentraciones de aluminio decrecieron significativamente con la dosis de cal reduciéndose hasta en un 80%, las bases intercambiables aumentaron con la aplicación de cal y los micro elementos disminuyeron en función del tiempo aunque no con el encalamiento (Combatt *et al.*, 2008).

En el altiplano boyacense (Colombia) en el año 2013 se estimaron los requerimientos de cal CaCO_3 para controlar la acidez a partir de curvas de encalamiento, obtenidas a someter el suelo a pruebas de incubación. Según el carácter ácido del suelo, se exploraron experimentalmente dosis de CaCO_3 , incorporadas en forma pura y mediante combinación de materiales encalantes comerciales (cal viva, dolomita y escorias Thomas), bajo una relación porcentual 50:40:10, respectivamente.

Los resultados muestran que los requerimientos de encalado están relacionados directamente con los procesos químicos, que caracterizan la acidez de cada suelo, el mejor efecto correctivo de la acidez se presentó con 16 y 4 toneladas por hectárea en concentración 1 de CaCO_3 , en un suelo sulfatado ácido improductivo SSAI; con las cuales fue posible en los suelos estudiados, neutralizar el aluminio y llevar el pH a valores cercanos a 5,5 (Castro y Munevar, 2013).

En la Amazonia Colombiana en el año 2017 se construyeron curvas de incubación en un suelo fuertemente ácido cultivado con cacao (*Theobroma cacao* L., Malvaceae), para la cual se utilizaron dosis crecientes de (0 - 1 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 Mg / ha) de calcáreo dolomita ($\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$) y carbonato de calcio (CaCO_3), a fin de conocer el tipo y la cantidad de material de calado de mejor reactividad y el que más favorece los cambios en la acidez: pH, Al^{3+} , H^+ y acidez total. Los resultados muestran que la mayor reacción de los materiales de calado en estos suelos se presenta después de 60 días y las aplicaciones de 7 Mg / ha permitieron elevar el pH de 5,5 a 6,0 y disminuir los niveles de Al y de Fe, cambios que mejoraron la CIC y la disponibilidad de nutrientes para cacao (Ca, Mg, P, Zn) afectar a otros nutrientes como N y K (Rosas *et al.*, 2017).

En Lima, Perú en el año 2017 se evaluó el encalado con carbonato de calcio y escoria básica de un suelo básico en un cultivo de maíz en fase de invernadero. Cada una de las dosis aplicadas fueron en dosis crecientes de 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 y 3.0 meq/100 g de suelo en macetas de 3 kilos, para posteriormente ser incubada al 80% de su capacidad de campo por un espacio de 45 días. Los resultados obtenidos nos mostraron en los efectos del encalado que se encontró diferencias significativas para la reacción del suelo, acidez cambiante y aluminio cambiante; obteniendo en el primer caso mayores valores de pH a mayor dosis encalante (Encina, 2017).

En el municipio de San José de Miranda la UIS, en el año 2018, se realizó un proyecto de investigación en lo que refiere a la corrección del recurso suelo enfocado en la parte de acidez relacionado con las características de las cales comercializadas de las canteras del municipio de Málaga, Santander; A partir de tratamientos bajo condiciones climáticas controladas en laboratorio para determinar el poder alcalizante de los materiales encalantes utilizado en procesos agrícolas (Castro y Suárez, 2018).

3.4 Marco Jurídico, Normativo e Institucional

En la normatividad que corresponde al decreto 2811 de 1974, con respecto a los suelos se resalta la PARTE VII de la constitución política de 1991: de la tierra y los suelos, en el TÍTULO I: del suelo agrícola, el artículo 179 el cual resuelve: que el aprovechamiento de los suelos deberá efectuarse en forma de mantener su integridad física y su capacidad productora y que en la utilización de los suelos se aplicarán normas técnicas de manejo para evitar su pérdida o degradación, lograr su recuperación y asegurar su conservación.

Posteriormente en el capítulo III denominado “el uso y conservación de los suelos” en el artículo 182: Estarán sujetos a adecuación y restauración los suelos que se encuentren en alguna de las siguientes circunstancias: Inexplotación si, en especiales condiciones de manejo, se pueden poner en utilización económica; aplicación inadecuada que interfiera la estabilidad del ambiente; sujeción a limitaciones físico-químicas o biológicas que afecten la productividad del suelo y explotación inadecuada (MinAmbiente, 1974)

Además, en el Decreto 1076 de 2015 se establecen entre las obligaciones de los propietarios de predios para la protección y conservación de los suelos las siguientes recomendaciones: usar los suelos de acuerdo a sus condiciones y factores constitutivos de tal forma que se mantenga su integridad física y su capacidad productora, de acuerdo con la clasificación agrológica del IGAC y con las recomendaciones señaladas por el ICA, el IGAC y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Además proteger los suelos mediante técnicas adecuadas de cultivos y manejo de suelos, que eviten la salinización, compactación, erosión, contaminación o revenimiento y, en general, la pérdida o degradación de los suelos y finalmente mantener la cobertura vegetal de los terrenos dedicados a ganadería, para lo cual se evitará la formación de caminos de ganado que se

producen por sobrepastoreo y otras prácticas que traigan como consecuencia la erosión o degradación de los suelos (MinAmbiente, 2015).

4. Metodología

El proyecto se desarrolló en la finca Guayacanal con un área aproximada de 3,7 ha y sistema de coordenadas 6°39'34N, 72°44'26W, ubicada en la vereda Sagamal a 20 minutos camino de herradura del municipio de San José de Miranda, en la Provincia de García Rovira; Departamento de Santander la cual se encuentra en una unidad de clasificación (frío semihúmedo) con una altura de 2150 m.s.n.m, una precipitación que oscila entre los 1.300 y 1.400 mm, y una temperatura promedio de 12-20°C (EOT, 2003). Las fases para lograr los objetivos planteados son las siguientes:

4.1 Fase 1: Caracterización del suelo

Para la caracterización del suelo se tomó una muestra de 1000 gr la zona de estudio y se determinó a partir de propiedades químicas como pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, potasio y aluminio intercambiables, hierro, cobre, zinc, boro y azufre disponibles, saturación de bases, relaciones catiónicas y materia orgánica; Propiedades físicas como: densidad aparente por el método del cilindro, la densidad real por el método del picnómetro, la textura mediante el método de Bouyoucos, la porosidad teniendo en cuenta la densidad real y aparente y el tipo de clasificación de acuerdo a Soil Taxonomy.

4.2 Fase 2: Determinación de las características del material alcalizante

La determinación de las características de la cal obtenida tanto de piedra Caliza como de Travertino de las canteras ubicadas en la vereda Calichal del municipio de Málaga Santander, se determinó por medio de un análisis de laboratorio externo a la Universidad Industrial de Santander sede Málaga con excepción de las variables de pureza química, poder alcalizante y tamaño de la partícula las cuales se determinaron por los ejecutores del proyecto.

4.2.1 Pureza química de la cal. La pureza química de la cal se determinó teniendo en cuenta la regla general de la pureza química de la cal la cual oscila entre el 90 y 98% teniendo en cuenta las impurezas presentes en el material alcalizante.

4.2.2 Tamaño de partícula de la cal. El tamaño de la partícula se determinó a través del análisis físico granulométrico utilizando las mallas < 8 mesh, 8 – 20 mesh, 20- 40 mesh, 20 – 60 mesh y > 60 mesh.

4.2.3 Poder relativo de neutralización. El poder relativo de neutralización lo obtuvimos multiplicando la eficiencia granulométrica por el equivalente químico.

4.3 Fase 3: Determinación de los tratamientos

Los tratamientos se determinaron de acuerdo a los dos tipos de material alcalizante que se emplearon en el estudio, teniendo en cuenta su dosificación a diferentes escalas y su aplicación superficial o incorporada al suelo a 10 cm de profundidad, realizando 4 réplicas de cada uno para un total de 64 unidades experimentales.

4.4 Fase 4: Diseño experimental

El diseño empleado corresponde a bloques completos al azar utilizando unidades experimentales de 1m², cuatro bloques con 8 tratamientos cada uno y con 4 réplicas respectivamente para un total de 64 unidades experimentales; Empleando el mismo diseño para ambos materiales de alcalinización (Tabla 8).

4.5 Fase 5: Aplicación de tratamientos

Se realizó una aplicación del material alcalizante superficial distribuyéndola uniformemente en la unidad del área experimental y para la incorporación de la cal con los primeros 10 cm del suelo se llevó a cabo con la implementación de un azadón.

4.6 Fase 6: Determinación de pH de los tratamientos

Se tomó en intervalos de 15 días durante 4 meses, las 64 muestras de los tratamientos para determinar el potencial de hidrógeno en cada muestra, empleando el pHmetro y soluciones buffer de pHs 4, 7 y 10.

4.7 Fase 7: Determinación de Aluminio intercambiable en los tratamientos

En intervalos de 1 mes durante 4 meses, se tomaron las 64 muestras para determinar la acidez del suelo y su comportamiento a través de los meses y la intervención de los materiales alcalizantes aplicados en cada tratamiento.

4.8 Fase 8. Análisis estadístico

Los registros de las variables analizadas fueron sometidos a un análisis de varianza de acuerdo con el diseño experimental empleado incluido en el programa estadístico SAS® cuando las diferencias significativas fueron menor o igual a 0.05 y se utilizó la prueba de rangos múltiples de Duncan para la separación de medias.

5. Resultados

5.1 Fase 1: Caracterización del suelo

El análisis químico de suelo se determinó en laboratorio de química de suelos, aguas y plantas de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA centro de investigación Tibaitata (Tabla 3, 4, 5) el análisis físico del suelo se determinó en el laboratorio de la Universidad Industrial de Santander sede Málaga y el tipo de clasificación utilizando la clasificación Soil Taxonomy.

5.1.1 Análisis químico del suelo. Se encontraron los siguientes resultados.

Tabla 3.

Análisis químico del suelo

Variables	Unidades	Valor	Interpretación
pH	-	4,71	Muy fuertemente ácido
Conductividad eléctrica	ds/m	0,14	No salino
Fósforo disponible (P) Bray II	mg / kg	5,92	Bajo
Azufre disponible (S)	mg / kg	5,29	Bajo
Acidez intercambiable (Al + H)	c mol (+) / kg	4,20	---
Aluminio intercambiable (Al)	c mol (+) / kg	3,20	Restictivo
Calcio intercambiable (Ca)	c mol (+) / kg	1,06	Bajo
Magnesio intercambiable (Mg)	c mol (+) / kg	0,20	Bajo
Potasio intercambiable (K)	c mol (+) / kg	0,21	Medio
Sodio intercambiable (Na)	c mol (+) / kg	<0,10	Bajo
Capacidad de intercambio catiónico (CICE)	c mol (+) / kg	5,77	Bajo
Hierro disponible (Fe) Olsen	mg / kg	598,83	Alto
Manganeso disponible (Mn) Olsen	mg / kg	18,08	Alto
Zinc disponible (Zn) Olsen	mg / kg	<1,00	Bajo
Cobre disponible (Cu) Olsen	mg / kg	1,62	Medio
Boro disponible (B)	mg / kg	0,37	Medio
Materia orgánica	g/ 100 g	4,18	Bajo
Nitrógeno total	%	0,209	Bajo

La materia orgánica es el reservorio de alrededor del 95 % del nitrógeno edáfico (Álvarez et al. 2002) por ello tomamos este indicador para determinar el contenido de este macronutriente multiplicando la cantidad de materia orgánica por 0.05 que equivale al 5% para obtener el valor que corresponde al nitrógeno total disponible en el suelo (Ottos, 2015).

$$\text{Nitrógeno total disponible} = \text{Materia orgánica} * 0.05$$

$$\text{Nitrógeno total disponible} = 4,18 * 0.05$$

$$\text{Nitrógeno total disponible} = 0.209$$

Por lo tanto la Materia orgánica, el Nitrógeno total disponible (N), el Zinc disponible (Zn), el Sodio intercambiable (Na), el Magnesio intercambiable (Mg), el Calcio intercambiable (Ca), el Azufre intercambiable (S) y el Fósforo disponible (P) se encuentran en nivel bajo (Tabla 4), debido a el pH del suelo y a diferentes antagonismos y sinergismos con otros elementos como lo son: antagonismos del nitrógeno y la materia orgánica con el Cobre disponible (Cu) estando este en nivel medio, el Magnesio intercambiable (Mg) con el Manganeso disponible (Mn) el cuál se encuentra en una alta proporción, El Calcio intercambiable (Ca) con el Aluminio intercambiable (Al) ya que este elemento reduce la absorción de iones de Calcio; Sinergismos del Manganeso y el Hierro disponible (Fe) los cuales están en alta proporción con el Potasio intercambiable (K) el cual se encuentra en nivel medio y finalmente el pH del suelo limita la presencia de Zinc disponible (Zn), de Sodio intercambiable (Na), de Azufre intercambiable (S) y de Fósforo disponible (P) (McKean, 1993).

El Boro disponible (B) nos indica un buen factor ya que mejora la absorción de los demás nutrientes como el Potasio intercambiable (K) los cuales se encuentran en proporción media en el suelo junto con el Cobre disponible (Cu) (Tabla 4).

Y finalmente el Manganeso disponible (Mn) se encuentra en alta proporción (Tabla 4) debido a que el pH del suelo se encuentra en un nivel bajo lo cual permite que la solubilidad del nutriente aumente en el suelo permitiendo el favorecimiento de la planta en diversos roles de sus procesos metabólicos, debiendo controlar su toxicidad ya que ocasiona la muerte de algunas hojas disminuyendo su tasa fotosintética de igual manera el Hierro disponible (Fe) depende de un pH bajo y es muy frecuente encontrar la relación de toxicidad Hierro- Manganeso en suelos ácidos (Sierra, 2017).

5.1.1.1 Saturación de bases. El porcentaje de saturación de bases se relaciona con el pH del suelo y principalmente se emplea para determinar la acidez, la disponibilidad de nutrientes y la fertilidad del suelo (FAO, 2019), tomando solo en cuenta las saturaciones básicas del suelo nos da un porcentaje de 35% lo cual es un indicador bajo el cual nos deduce que es un suelo demasiado ácido el cual presenta dificultades en la nutrición de los cultivos (Tabla 4).

Tabla 4.
Saturación de bases

Bases	Porcentaje	Análisis
Saturación de Calcio	18%	Bajo
Saturación de Magnesio	3%	Bajo
Saturación de Potasio	4%	Alto
Saturación de Sodio	10%	Normal
Saturación de Aluminio	56%	Restringido

5.1.1.2 Relaciones iónicas. La relación Ca/Mg nos indica una deficiencia de Magnesio intercambiable (Mg), el valor más recomendable de esta relación es 5; la relación Mg/K de igual manera nos demuestra la deficiencia de Magnesio intercambiable (Mg) que hay en el suelo, el valor más recomendable para esta relación es que sea igual o próxima a 3; la relación (Ca+Mg)/K nos indica un valor moderado de Potasio intercambiable (K) expresado en la Tabla 5 (FAO, 2019).

Tabla 5.
Relaciones iónicas

Relaciones Iónicas	
Relación Ca/Mg	5,4
Relación (Ca+Mg)/K	5,9
Relación Mg/K	0,9
Relación Ca/B	570

5.1.2 Análisis físico del suelo. Se clasifican de acuerdo a la siguiente manera:

5.1.2.1 Textura. La textura de la muestra se determinó mediante el método de Bouyoucos, el cual consistía en pesar 50 gr del suelo, luego depositarlos en un frasco tetero de 8 Oz, completar su contenido con agua destilada hasta completar las dos terceras partes del frasco y agregarle 15 ml de agente dispersante, luego agitarla mecánicamente durante 10 minutos y llevarla a una probeta de bouyoucos y así completar un volumen de 1000 ml con agua destilada, posteriormente se agitó durante 1 minuto la suspensión de la probeta para introducir el hidrómetro, pasados 40 segundos se procedió a realizar la primera lectura del hidrómetro dejando en reposo 2 horas para registrar la segunda lectura teniendo en cuenta el control de la temperatura durante el procedimiento; luego se tuvieron en cuenta los rangos de arena, arcilla y limo para finalmente realizar los cálculos en base al % de arena, arcilla y limo para clasificarlos en el triángulo textural (Figura 2) teniendo en cuenta los factores de corrección en base de la temperatura de la suspensión (Tabla 2).

$$\% \text{ Arena} = 100 - (2 * P1)$$

$$\% \text{ Arcilla} = 2 * P2$$

$$\% \text{ Limo} = 100 - (\% \text{ Arena} + \% \text{ Arcilla})$$

Donde,

P1: La primera lectura $1.8526 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$

P2: La segunda lectura

La textura del suelo se determinó en suelo sin material alcalizante de la siguiente manera:

Propiedades físicas del suelo: Textura (areno francosa), densidad aparente (1.8526 g/cm^3), densidad real (2.4201 g/cm^3) y porosidad (23.45%).

Porcentaje de arena:

$$\% \text{ Arena} = 100 - (2 * P1)$$

$$\% Arena = 100 - (2 * 14)$$

$$\% Arena = 72\%$$

Porcentaje de Arcilla:

$$\% Arcilla = 2 * P2$$

$$\% Arcilla = 2 * 0.78$$

$$\% Arcilla = 1.56\%$$

Porcentaje de Limo:

$$\% Limo = 100 - (\% Arena + \% Arcilla)$$

$$\% Limo = 100 - (72 + 1.56)$$

$$\% Limo = 26.44\%$$

Y ubicando los porcentajes de cada grupo textural en el triángulo textural, nos indica que el suelo presenta una textura Franco Arenosa.

5.1.2.2 Densidad aparente. La densidad aparente se determinó por el método del cilindro el cual se llevó a cabo tomando 3 muestras de suelo del área de estudio las cuales fueron dejadas a temperatura ambiente durante 3 días, luego se llevaron al laboratorio para realizar los pesajes de la muestra húmeda, luego de esto se sometieron a un proceso de deshidratación en un horno a una temperatura de 105°C por un periodo de 24 horas. Luego de esto se retiró la muestra del horno y se llevó a la balanza para obtener el peso de la muestra seca. Luego se calculó por medio de la fórmula de densidad aparente:

$$Densidad Aparente = \frac{\text{peso seco}}{\text{volumen del cilindro}}$$

$$Densidad Aparente = \frac{426.02 \text{ gr}}{229.95 \text{ cm}^3}$$

$$Densidad\ Aparente = 1.8526 \frac{gr}{cm^3}$$

5.1.2.3 Densidad Real. Para hallar la densidad real del suelo se empleó el método del picnómetro el cual consistía en tomar el peso con el picnómetro vacío y el peso con el total del volumen de agua destilada, posteriormente vaciar las $\frac{2}{3}$ partes de agua y al restante agregar suavemente el suelo anteriormente tamizado y pesado (5 gr) a medida de que la muestra fue absorbiendo el agua se le adicionaba más agua y muestra de manera sutil y cuidadosa con el fin de no alterar los resultados, luego se agita suavemente para que los espacios de aire salgan y se forme una espuma en la superficie del picnómetro posteriormente se limpia hasta que no produzca más espuma y finalmente se pesa el picnómetro con la muestra y se hacen los cálculos correspondientes con los pesos anteriores.

$$PW1 = \text{Picnómetro con agua} - \text{Picnómetro vacío}$$

$$PW1 = 22.095\text{ gr} - 9.595\text{ gr} = 12.500\text{ gr}$$

$$PW2 = \text{Peso picnómetro con suelo} - \text{Picnómetro vacío con el suelo}$$

$$PW2 = 20.964\text{ gr} - 10.530\text{ gr} = 10.434\text{ gr}$$

$$\text{Peso agua desalojada} = PW1 - PW2$$

$$\text{Peso agua desalojada} = 12.500\text{ gr} - 10.434\text{ gr} = 2.066\text{ gr}$$

$$\text{Volumen agua desalojada} = \frac{\text{Peso del agua desalojada}}{\text{Densidad del agua}}$$

$$\text{Volumen agua desalojada} = \frac{2.066 \text{ gr}}{1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = 2.066 \text{ cm}^3$$

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso del suelo}}{\text{Volúmen del agua desalojada}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{5 \text{ gr}}{2.066 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Densidad real} = 2.4201 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Donde,

PW1= Peso del agua

PW2= Peso del agua + el suelo

5.1.2.4 Porosidad. La porosidad se definió teniendo en cuenta la densidad aparente y la densidad Real del suelo, así:

$$P = 100 (1 - da/dr) \%$$

Siendo da y dr los valores de densidad aparente y real respectivamente y P el porcentaje de huecos del suelo u horizonte considerado.

$$P = 100 \left(1 - \frac{1.8526 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}}{2.4201 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} \right) \% = 23.45\%$$

5.1.3 Clasificación taxonómica del suelo. Dentro de la clasificación taxonómica del suelo, la zona de estudio en mención se clasifico dentro del orden Entisol (Castro y Suárez, 2018) con alta

pedregosidad y fragmentos de rocas areniscas en las que el cuarzo es el mineral predominante (Soil Survey Staff, 2014).

5.2 Fase 2: Características del material alcalinizante

Las características químicas del material alcalinizante se determinaron en el laboratorio de la Universidad Industrial de Santander, sede Bucaramanga (Tabla 6) y la pureza química de la cal, el tamaño de la partícula y el poder relativo de la neutralización se determinaron en el laboratorio de la Universidad Industrial de Santander, sede Málaga.

5.2.1 Características químicas del material alcalinizante

Tabla 6.

Informe de resultados laboratorio químico de consultas Industriales matriz de la muestra Cal Caliza Cal Travertino

<i>Tipo de análisis</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Caliza</i>	<i>Travertino</i>	<i>Método</i>
<i>Análisis fisicoquímico</i>	Calcio (meq Ca^{2+}/L)	72,00	10,09	Absorción Atómica
	Magnesio (meq Mg^{2+}/L)	0,293	0,315	Absorción Atómica
	Sodio (meq Na^{+}/L)	1,064	1,215	Absorción Atómica
	Potasio (meq K^{+}/L)	0,583	0,088	Absorción Atómica
	Conductividad (ms/cm)	4,20	100,2	Conductivimétrico
<i>Calcio y Magnesio solubles</i>	Calcio [meq/L (Ca^{+} Mg)]	53,9	1,60	Volumétrico
	Calcio (meq Ca/L)	37,4	0,70	Volumétrico
	Magnesio (meq Mg/L)	16,5	0,90	Cálculo
<i>Sulfatos solubles</i>	Sulfatos (SO_4^{2-} meq/L)	0,32	0,16	Espectrofotométrico
	Bicarbonatos (meq $\text{HCO}_3^{-}/\text{L}$)	0	6,68	Volumétrico
	Carbonatos (meq $\text{CO}_3^{-2}/\text{L}$)	8,36	0	Volumétrico
	Hidróxidos (meq OH^{-}/L)	79,37	0	Volumétrico

<i>Bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos</i>	pH (Unidades de pH)	11,95	7,8	Potenciométrico
	Magnesio (%Mg)	0,02	0,030	Absorción Atómica
	Sodio (% Na)	0,008	0,101	Absorción Atómica
	Potasio (% K)	0,018	0,006	Absorción Atómica
<i>Porcentajes</i>	Fósforo (% P)	0,095	0,044	Espectrofotométrico
	Azufre (% S)	0,03	0,210	Espectrofotométrico
	Silicio (% Si)	0,14	0,220	Espectrofotométrico

5.2.2 Pureza química de la cal. La pureza química de la cal de la Cal Caliza se determinó en 98% y la Cal Travertino en 90%. para la Cal caliza tomamos el 98% debido a su concentración más pura de Calcio y para la Cal Travertino el 90% teniendo en cuenta que la formación de este material surge en yacimientos de caliza los cuales presentan diferentes componentes como las estalactitas, estalagmitas e incrustaciones formadas a través de aguas de fuentes calcáreas (Osorno, 2012).

5.2.3 Tamaño de la partícula. El tamaño de la partícula se determinó entre los siguientes valores (Tabla 7).

Tabla 7.
Tamaño de la partícula de Cal Caliza y Cal Travertino.

Número de malla	Cal Caliza	Cal Travertino
< 8 mesh	22.28%	19.01%
8 – 20 mesh	7.38%	6.12%
20- 40 mesh	13.65%	14.46%
20 – 60 mesh	11.45%	21.38%
> 60 mesh	45.24%	39.03%

Teniendo en cuenta que la mayor proporción de las 2 Cales en mención se ubican por encima de los 60 mesh tomamos como el 100% la efectividad relativa granulométrica del tamaño de la partícula.

5.2.4 Poder relativo de la neutralización. El poder relativo de la neutralización se determinó entre los valores de:

Cal Caliza

$$\text{PRNT (\%)} = \frac{\% \text{ECaCO}_3 * \% \text{Erg}}{100}$$

$$\text{PRNT (\%)} = \frac{98\% * \% \text{Erg}}{100}$$

$$\text{PRNT (\%)} = 98\%$$

Donde; ECaCO_3 = Equivalente Químico Porcentual en Carbonato de Calcio; Erg = Eficiencia relativa granulométrica porcentual.

Cal Travertino

$$\text{PRNT (\%)} = \frac{\% \text{ETravertino} * \% \text{Erg}}{100}$$

$$\text{PRNT (\%)} = \frac{90\% * \% \text{Erg}}{100}$$

$$\text{PRNT (\%)} = 90\%$$

Donde; ECaCO_3 = Equivalente Químico Porcentual en Travertino; Erg = Eficiencia relativa granulométrica porcentual

Por lo cual el poder relativo de neutralización es más significativo en la Cal Caliza en relación a la Cal Travertino ya que debido a que presentan la misma efectividad relativa granulométrica porcentual, el equivalente porcentual es más alto en la Cal Caliza.

5.3 Fase 3: Determinación de los tratamientos

Se determinaron los siguientes tratamientos en campo:

- Cales producidas de la piedra caliza.
 - ❖ Tratamiento 1: relación de 1000 kg cal piedra caliza/ha Incorporada a 10 cm (PC 100)
 - ❖ Tratamiento 2: relación 2000 Kg cal piedra caliza /ha Incorporada a 10 cm (PC 200)
 - ❖ Tratamiento 3: relación 3000 Kg cal piedra caliza /ha Incorporada a 10 cm (PC 300)
 - ❖ Tratamiento 4: relación 4000 Kg cal piedra caliza /ha Incorporada a 10 cm (PC 400)
 - ❖ Tratamiento 5: relación de 1000 kg cal piedra caliza /ha aplicación superficial (C 100)
 - ❖ Tratamiento 6: relación 2000 Kg cal piedra caliza /ha aplicación superficial (C 200)
 - ❖ Tratamiento 7: relación 3000 Kg cal piedra caliza /ha aplicación superficial (C 300)
 - ❖ Tratamiento 8: relación 4000 Kg cal piedra caliza /ha aplicación superficial (C 400)
- Cales producidas de piedra travertino.
 - ❖ Tratamiento 9: relación de 1000 kg cal piedra travertino /ha Incorporada a 10 cm (PT 100)
 - ❖ Tratamiento 10: relación 2000 Kg cal piedra travertino /ha Incorporada a 10 cm (PT 200)
 - ❖ Tratamiento 11: relación 3000 Kg cal piedra travertino /ha Incorporada a 10 cm (PT 300)
 - ❖ Tratamiento 12: relación 4000 Kg cal piedra travertino /ha Incorporada a 10 cm (PT 400)
 - ❖ Tratamiento 13: relación de 1000 kg cal piedra travertino /ha aplicación superficial (T 100)
 - ❖ Tratamiento 14: relación 2000 Kg cal piedra travertino /ha aplicación superficial (T 200)
 - ❖ Tratamiento 15: relación 3000 Kg cal piedra travertino /ha aplicación superficial (T 300)
 - ❖ Tratamiento 16: relación 4000 Kg cal piedra travertino /ha aplicación superficial (T 400)

Para cada tratamiento se realizaron 4 réplicas, siendo: PC: Picoteado caliza, PT: Picoteado Travertino, C: Caliza, T: Travertino, 100: 1000 Kg/ha, 200: 2000 Kg/ha, 300: 3000 Kg/ha, 400: 4000 Kg/ha.

5.4 Fase 4: Diseño experimental

Tabla 8.

Diseño experimental

PC 100	T 300	PT 300	T 300	PC 100	T 300	PT 300	T 300
PC 200	T 400	PT 400	T 400	PC 200	T 400	PT 400	T 400
PC 300	C 100	PC 100	C 100	PC 300	C 100	PC 100	C 100
PC 400	C 200	PC 200	C 200	PC 400	C 200	PC 200	C 200
PT 100	C 300	PC 300	C 300	PT 100	C 300	PC 300	C 300
PT 200	C 400	PC 400	C 400	PT 200	C 400	PC 400	C 400
PT 300	T 100	PT 100	T 100	PT 300	T 100	PT 100	T 100
PT 400	T 200	PT 200	T 200	PT 400	T 200	PT 200	T 200

5.5 Fase 6: Determinación de pH de los tratamientos.

Se tomaron quincenalmente las 32 muestras de los tratamientos y se prepararon sus respectivas soluciones relación 1:1 tomando como solvente agua destilada y como soluto suelo debidamente secado al aire y tamizado en 2 mm, posteriormente se agitó cada muestra con una varilla de vidrio y se dejó en reposo durante 30 minutos. Adicionalmente se calibro el pH metro con soluciones buffer de pHs 4, 7 y 10 y finalmente se tomó lectura del pH de cada una de las muestras en mención, quincenalmente durante 4 meses. Las mediciones de pH se muestran en la Tabla 9, teniendo en cuenta cada tratamiento y la fecha estipulada de realización:

Tabla 9.
Medición de pH

Tratamientos	pH15d	pH30d	pH45d	pH60d	pH75d	pH90d	pH105d	pH120d
PT100	7,347 ^{bcd}	6,415 ^{ghi}	6,132 ⁱ	6,137 ^{de}	5,992 ^{ef}	5,960 ^{ef}	5,952 ^{fg}	5,822 ^{fg}
PT200	7,287 ^{bcd}	6,615 ^{fgh}	6,252 ^{hi}	6,525 ^{cde}	6,985 ^{bcd}	6,542 ^{cde}	6,535 ^{def}	6,457 ^{def}
PT300	7,592 ^{abcd}	8,147 ^{ab}	8,140 ^a	7,722 ^a	7,502 ^{bc}	7,502 ^{ab}	7,502 ^{ab}	7,450 ^{ab}
PT400	7,737 ^{abc}	7,987 ^{abc}	7,685 ^{abc}	7,505 ^{ab}	7,500 ^{bc}	7,495 ^{ab}	7,532 ^{ab}	7,410 ^{ab}
T100	7,020 ^{de}	7,102 ^{defgh}	7,157 ^{cdef}	6,587 ^{cde}	6,557 ^{cde}	6,862 ^{bc}	6,487 ^{def}	6,862 ^{def}
T200	6,055 ^g	6,415 ^{ghi}	6,400 ^{ghi}	5,832 ^{ef}	7,165 ^{bc}	7,230 ^{abc}	7,315 ^{abc}	7,300 ^{abc}
T300	7,642 ^{abc}	7,805 ^{abcd}	7,765 ^{abc}	7,570 ^{ab}	7,187 ^{bc}	7,165 ^{abc}	7,122 ^{abcd}	7,165 ^{abcd}
T400	7,360 ^{bcd}	7,305 ^{bcdef}	7,265 ^{cde}	6,947 ^{abcd}	9,097 ^a	7,695 ^a	7,727 ^a	7,630 ^a
PC100	7,172 ^{cde}	7,227 ^{cdefg}	7,170 ^{defg}	6,692 ^{bcde}	6,725 ^{bcde}	6,790 ^{bcd}	6,980 ^{abcde}	6,760 ^{bcde}
PC200	7,615 ^{abcd}	7,390 ^{bcdef}	6,947 ^{defg}	6,890 ^{abcd}	6,682 ^{bcde}	6,715 ^{cd}	6,687 ^{cdef}	6,655 ^{bcde}
PC300	7,887 ^{ab}	8,350 ^a	8,097 ^{ab}	7,187 ^{abc}	6,560 ^{cde}	6,865 ^{bc}	6,795 ^{bcde}	6,865 ^{cdef}
PC400	8,180 ^a	7,485 ^{bcde}	7,500 ^{bcd}	7,397 ^{abc}	7,572 ^b	7,287 ^{abc}	7,332 ^{abc}	7,407 ^{ab}
C100	6,280 ^{fg}	6,352 ^{hi}	8,800 ^{efgh}	5,890 ^{ef}	6,222 ^{de}	6,100 ^{def}	6,305 ^{ef}	6,050 ^{ef}
C200	6,690 ^{ef}	6,430 ^{ghi}	6,612 ^{fghi}	6,527 ^{cde}	6,650 ^{bcde}	6,557 ^{cde}	6,225 ^{ef}	6,107 ^{ef}
C300	6,217 ^{fg}	6,910 ^{efgh}	7,232 ^{cdef}	6,932 ^{abcd}	7,120 ^{bcd}	7,187 ^{abc}	6,825 ^{bcde}	6,477 ^{def}
C400	7,170 ^{cde}	7,515 ^{bcde}	7,497 ^{bcd}	6,875 ^{abcd}	7,080 ^{bcd}	7,020 ^{abc}	6,937 ^{bcde}	6,740 ^{bcde}
TS	5,405 ^h	5,655 ⁱ	5,445 ^j	5,307 ^f	5,327 ^f	5,487 ^f	5,370 ^g	5,292 ^g
CV	5,254	7,333	5,543	7,969	8,081	6,687	6,976	7,249

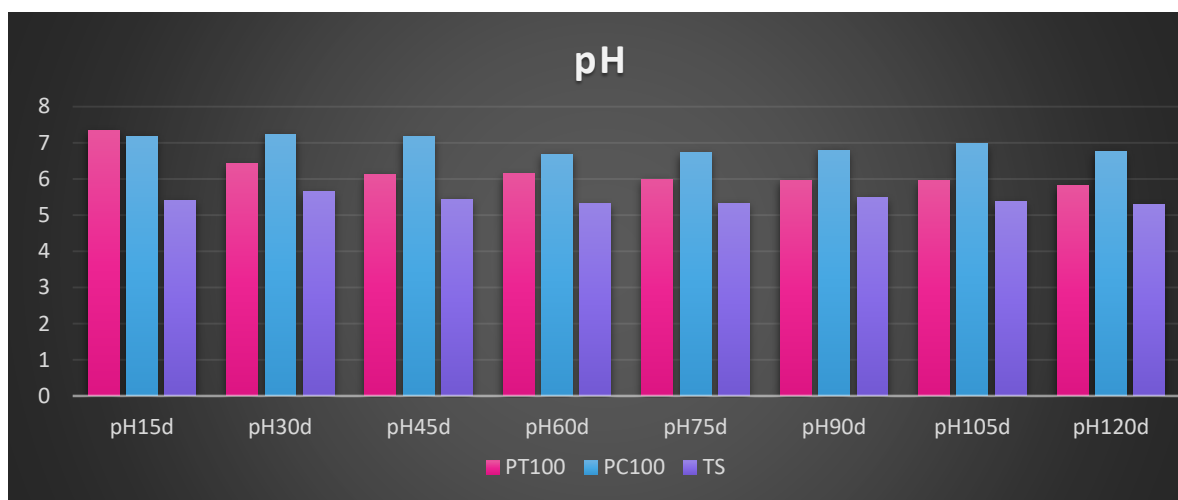
CV: coeficiente de variación, promedios en columnas seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,05$), Prueba de Rangos Múltiples de Duncan.

En todos los tratamientos se observaron diferencias significativas menor o igual a 0,05 respecto a los tratamientos testigo, incrementando la alcalinidad del suelo con los dos materiales de encalado, observando una mejor respuesta de la cal de piedra caliza, ya que tuvo un aumento de pH con mayor velocidad que la cal travertino, en la tabla 10 se puede observar cambios significativos con respecto a los anteriores lo cual podría estar influenciado por las condiciones climáticas debido a que la aplicación de los tratamientos se llevó en un medio ambiente no controlado, estando expuestos a los cambios de temperatura, humedad y precipitaciones esta última influyendo directamente ya que conllevaría a la lixiviación del material alcalinizante antes de que este se incorpore completamente al suelo.

En la medición final 120d los tratamientos que mejor respuesta tuvieron fueron los de cal Travertino T400 y caliza PC400 con respecto a los demás tratamientos. En los tratamientos PT100, PC100 (Tabla 10, Figura 3) y PC200, PT200 (Tabla 11, Figura 4) se puede evidenciar que en el día 15d de la medición el pH tuvo un aumento similar en los dos tratamientos respecto al tratamiento testigo, luego esto se modificó del día 30d hasta el día 120d teniendo una eficiencia mayor la enmienda de piedra caliza.

Tabla 10.*Tratamientos PT100 y PC100 en referencia a la variable pH*

Tratamientos	pH15d	pH30d	pH45d	pH60d	pH75d	pH90d	pH105d	pH120d
PT100	7,347 ^{bcd}	6,415 ^{ghi}	6,132 ⁱ	6,137 ^{de}	5,992 ^{ef}	5,960 ^{ef}	5,952 ^{fg}	5,822 ^{fg}
PC100	7,172 ^{cde}	7,227 ^{cdefg}	7,170 ^{defg}	6,692 ^{bcde}	6,725 ^{bcde}	6,790 ^{bcd}	6,980 ^{abcde}	6,760 ^{bcde}
TS	5,405 ^h	5,655 ⁱ	5,445 ^j	5,307 ^f	5,327 ^f	5,487 ^f	5,370 ^g	5,292 ^g

**Figura 3.** Tratamientos PT100 y PC100 en referencia a la variable pH.**Tabla 11.***Tratamientos PT200 y PC200 en referencia a la variable pH*

Tratamientos	pH15d	pH30d	pH45d	pH60d	pH75d	pH90d	pH105d	pH120d
PT200	7,287 ^{bcd}	6,615 ^{fgh}	6,252 ^{hi}	6,525 ^{cde}	6,985 ^{bcd}	6,542 ^{cde}	6,535 ^{def}	6,457 ^{def}
PC200	7,615 ^{abcd}	7,390 ^{bcdef}	6,947 ^{defg}	6,890 ^{abcd}	6,682 ^{bcde}	6,715 ^{cd}	6,687 ^{cdef}	6,655 ^{bcde}
TS	5,405 ^h	5,655 ⁱ	5,445 ^j	5,307 ^f	5,327 ^f	5,487 ^f	5,370 ^g	5,292 ^g

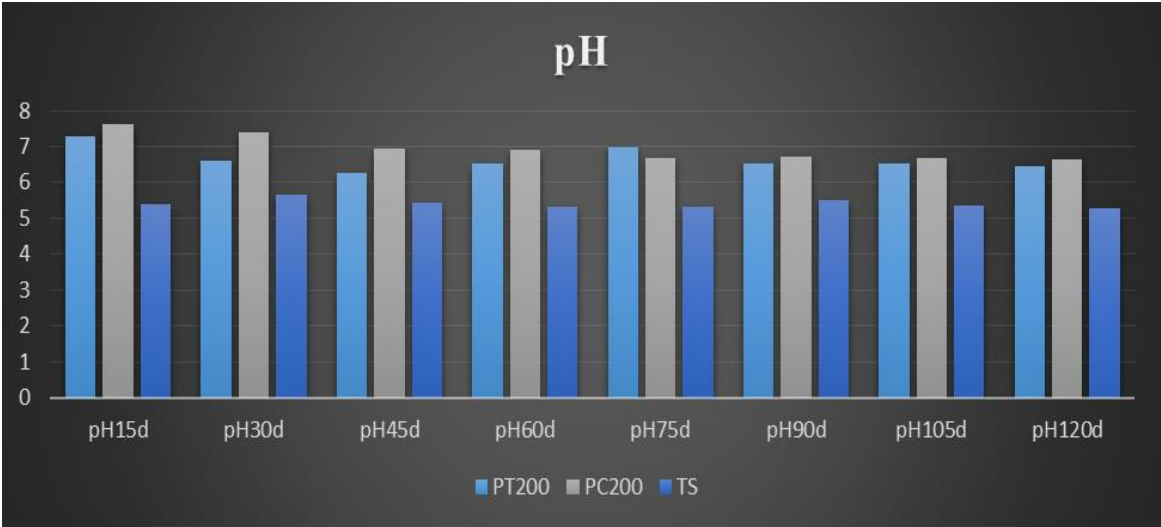


Figura 4. Tratamientos PT200 y PC200 en referencia a la variable pH.

En los tratamientos PT300, PC300 de los dos materiales de encalado tuvieron un comportamiento similar oscilando los valores en pH cercano a neutro (Tabla 12, Figura 5).

Tabla 12.
Tratamientos PT300 y PC300 en referencia a la variable pH

Tratamientos	pH15d	pH30d	pH45d	pH60d	pH75d	pH90d	pH105d	pH120d
PT300	7,592 ^{abcd}	8,147 ^{ab}	8,140 ^a	7,722 ^a	7,502 ^{bc}	7,502 ^{ab}	7,502 ^{ab}	7,450 ^{ab}
PC300	7,887 ^{ab}	8,350 ^a	8,097 ^{ab}	7,187 ^{abc}	6,560 ^{cde}	6,865 ^{bc}	6,795 ^{bcde}	6,865 ^{cdef}
TS	5,405 ^h	5,655 ⁱ	5,445 ^j	5,307 ^f	5,327 ^f	5,487 ^f	5,370 ^g	5,292 ^g

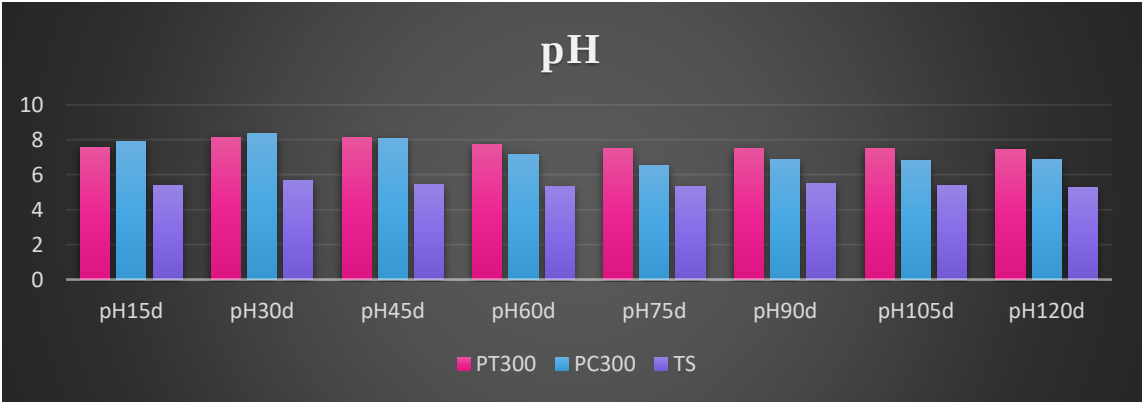


Figura 5. Tratamientos PT300 y PC300 en referencia a la variable pH.

Con relación a los tratamientos picoteados en concentración 400 PT400 y PC400, solo en su primera lectura 15d la cal de Travertino está realizando más reacción alcalizante que la cal caliza (Tabla 13, Figura 6).

Tabla 13.

Tratamientos PT400 y PC400 en referencia a la variable pH.

Tratamientos	pH15d	pH30d	pH45d	pH60d	pH75d	pH90d	pH105d	pH120d
PT400	7,737 ^{abc}	7,987 ^{abc}	7,685 ^{abc}	7,505 ^{ab}	7,500 ^{bc}	7,495 ^{ab}	7,532 ^{ab}	7,410 ^{ab}
PC400	8,180 ^a	7,485 ^{bcde}	7,500 ^{bcd}	7,397 ^{abc}	7,572 ^b	7,287 ^{abc}	7,332 ^{abc}	7,407 ^{ab}
TS	5,405 ^h	5,655 ⁱ	5,445 ^j	5,307 ^f	5,327 ^f	5,487 ^f	5,370 ^g	5,292 ^g

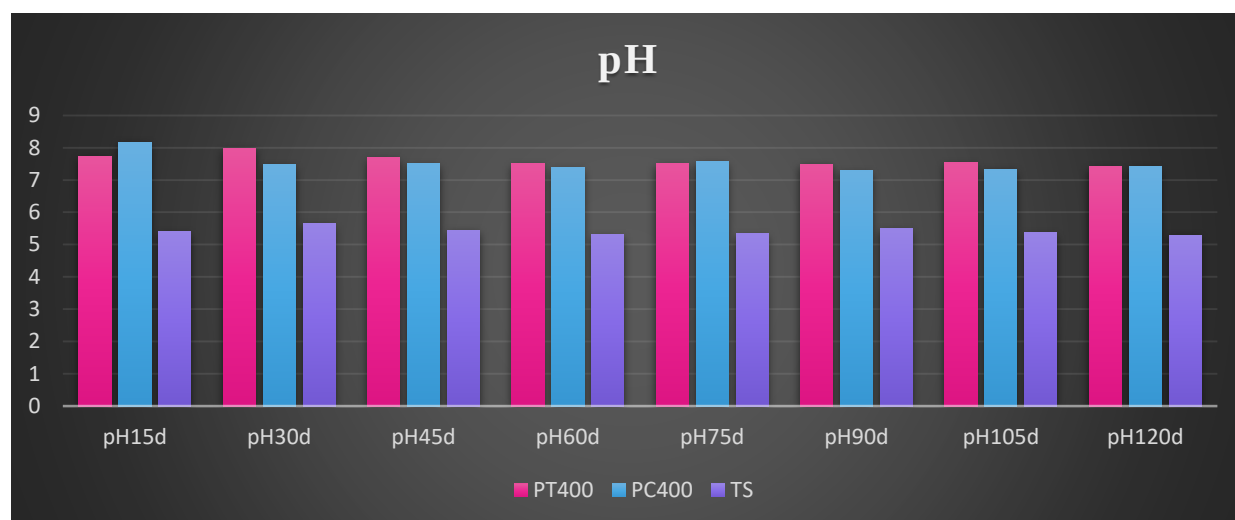
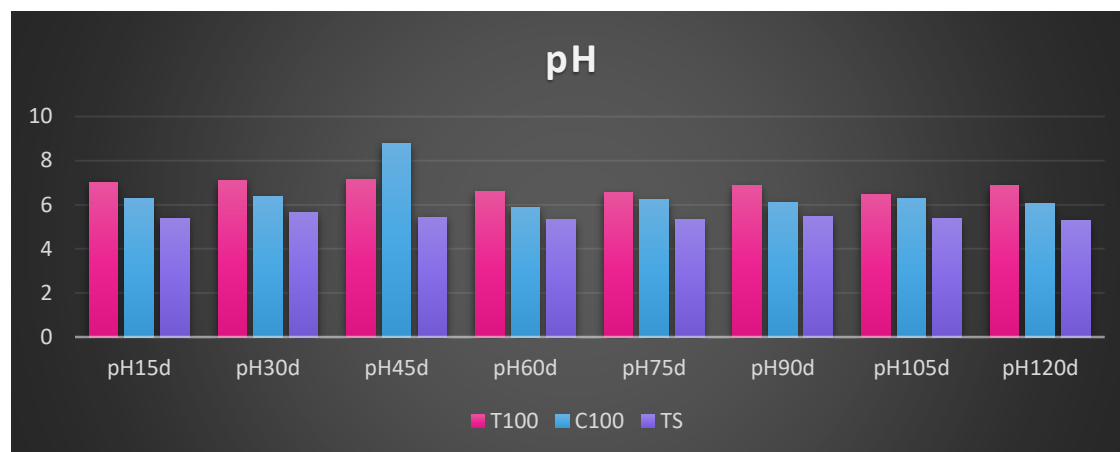


Figura 6. Tratamientos PT400 y PC400 en referencia a la variable pH.

En la aplicación de la dosis más baja de material alcalizante de manera superficial T100 y C100 se obtuvieron valores por debajo del pH neutro, siendo la aplicación C100 del día 60d el registro más bajo (Tabla 14, Figura 7)

Tabla 14.*Tratamientos T100 y C100 en referencia a la variable pH.*

Tratamientos	pH15d	pH30d	pH45d	pH60d	pH75d	pH90d	pH105d	pH120d
T100	7,020 ^{de}	7,102 ^{defgh}	7,157 ^{cdef}	6,587 ^{cde}	6,557 ^{cde}	6,862 ^{bc}	6,487 ^{def}	6,862 ^{def}
C100	6,280 ^{fg}	6,352 ^{hi}	8,800 ^{efgh}	5,890 ^{ef}	6,222 ^{de}	6,100 ^{def}	6,305 ^{ef}	6,050 ^{ef}
TS	5,405 ^h	5,655 ⁱ	5,445 ^j	5,307 ^f	5,327 ^f	5,487 ^f	5,370 ^g	5,292 ^g

*Figura 7. Tratamientos T100 y C100 en referencia a la variable pH*

Los tratamientos T200 y C200 oscilan en la escala de pH por la zona de acidez puesto que fueron aplicados de una manera superficial (Tabla 15, Figura 8).

Tabla 15.*Tratamientos T200 y C200 en referencia a la variable pH*

Tratamientos	pH15d	pH30d	pH45d	pH60d	pH75d	pH90d	pH105d	pH120d
T200	6,055 ^g	6,415 ^{ghi}	6,400 ^{ghi}	5,832 ^{ef}	7,165 ^{bc}	7,230 ^{abc}	7,315 ^{abc}	7,300 ^{abc}
C200	6,690 ^{ef}	6,430 ^{ghi}	6,612 ^{fghi}	6,527 ^{cde}	6,650 ^{bcde}	6,557 ^{cde}	6,225 ^{ef}	6,107 ^{ef}
TS	5,405 ^h	5,655 ⁱ	5,445 ^j	5,307 ^f	5,327 ^f	5,487 ^f	5,370 ^g	5,292 ^g

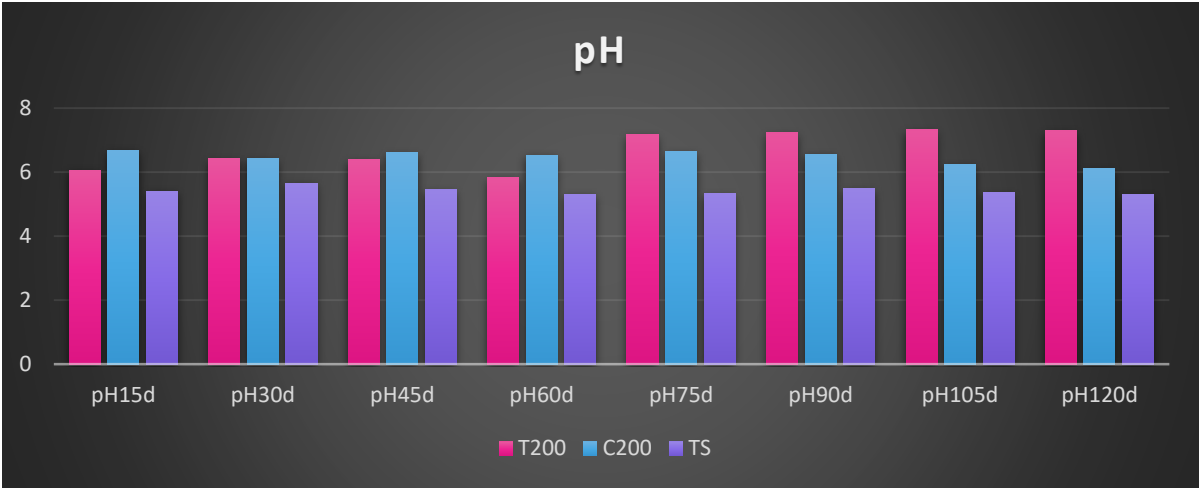


Figura 8. Tratamientos T200 y C200 en referencia a la variable pH.

Los tratamientos T300 y C300 oscilan entre pH neutro y pH moderadamente ácido (Tabla 16, Figura 9).

Tabla 16.
Tratamientos T300 y C300 en referencia a la variable pH.

Tratamientos	pH15d	pH30d	pH45d	pH60d	pH75d	pH90d	pH105d	pH120d
T300	7,642 ^{abc}	7,805 ^{abcd}	7,765 ^{abc}	7,570 ^{ab}	7,187 ^{bc}	7,165 ^{abc}	7,122 ^{abcd}	7,165 ^{abcd}
C300	6,217 ^{fg}	6,910 ^{efgh}	7,232 ^{cdef}	6,932 ^{abcd}	7,120 ^{bcd}	7,187 ^{abc}	6,825 ^{bcde}	6,477 ^{def}
TS	5,405 ^h	5,655 ⁱ	5,445 ^j	5,307 ^f	5,327 ^f	5,487 ^f	5,370 ^g	5,292 ^g

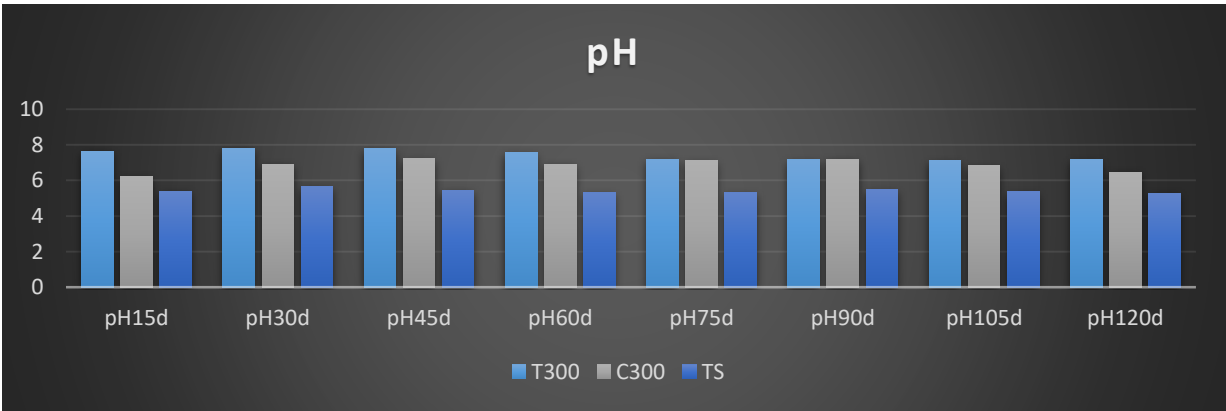


Figura 9. Tratamientos T300 y C300 en referencia a la variable pH.

Y finalmente en los tratamientos T400 y C400 los valores registrados estuvieron más elevados del pH neutro, registrando el valor más alto en la medición 75d con un valor muy alcalino (Tabla 17, Figura 10).

Tabla 17.

Tratamientos T400 y C400 en referencia a la variable pH

Tratamientos	pH15d	pH30d	pH45d	pH60d	pH75d	pH90d	pH105d	pH120d
T400	7,360 ^{bcd}	7,305 ^{bcdef}	7,265 ^{cde}	6,947 ^{abcd}	9,097 ^a	7,695 ^a	7,727 ^a	7,630 ^a
C400	7,170 ^{cde}	7,515 ^{bcde}	7,497 ^{bcd}	6,875 ^{abcd}	7,080 ^{bcd}	7,020 ^{abc}	6,937 ^{bcde}	6,740 ^{bcde}
TS	5,405 ^h	5,655 ⁱ	5,445 ^j	5,307 ^f	5,327 ^f	5,487 ^f	5,370 ^g	5,292 ^g

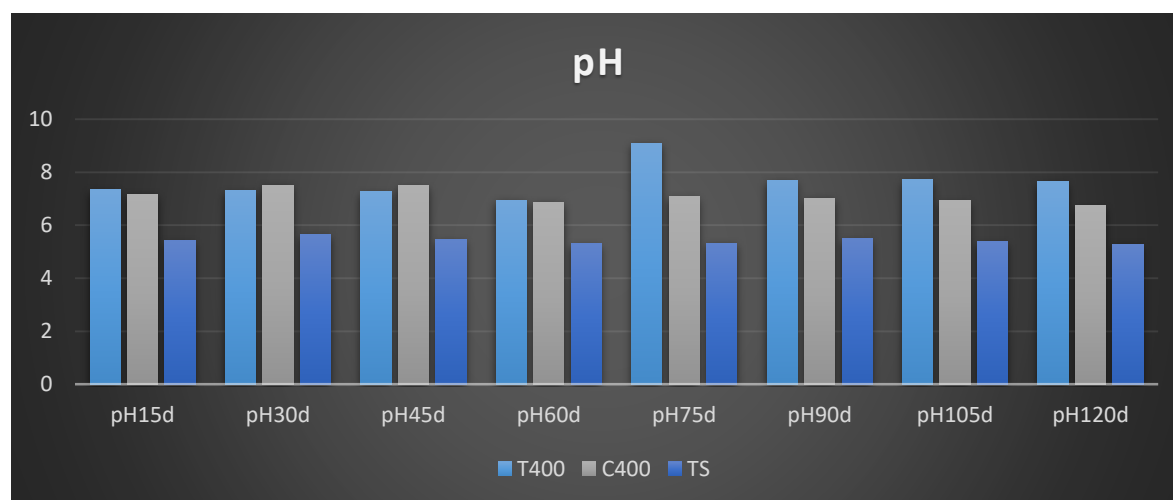


Figura 10. Tratamientos T400 y C400 en referencia a la variable pH.

5.5 Fase 7: Determinación de Aluminio intercambiable

Se prepararon los siguientes reactivos estipulados en (IGAC, 2006): Cloruro de Potasio 1 N, Hidróxido de Sodio 2 N, Hidróxido de Sodio 0.2 N, Fenolftaleína al 1 % en alcohol del 96 %, Ácido Clorhídrico 0.1 N y Fluoruro de Potasio al 4 %. Luego, se colocaron 10 g de suelo seco y tamizado por 2 mm con 30 ml de solución de Cloruro de Potasio 1 N en un frasco de extracción de 100 ml, después se colocaron las muestras en un agitador recíproco por 30 minutos para su

agitación para luego dejar reposar las muestras durante 10 minutos; después se instaló un equipo de filtración al vacío con un Erlenmeyer con tubuladora lateral, un tapón de caucho, un embudo Bücher de 9 cm de diámetro, papel de filtro de 9 cm de diámetro, una manguera y una bomba de vacío, luego se abrió el paso al vacío y se vertió la muestra cuantitativamente después del reposo con ayuda del frasco lavador que contenía solución de Cloruro de Potasio 1 N hasta obtener un volumen aproximadamente de 150 ml, finalmente se cerró el paso al vacío y se retiraron los Erlenmeyer y se dispusieron los residuos sólidos producidos para su eliminación.

5.6 Etapa de cuantificación

5.6.1 Acidez intercambiable. Al erlenmeyer que contenía la muestra se le agregaron 3 gotas de solución de Fenolftaleína al 1 % en alcohol del 96 % y se procedió a instalar la bureta de 25 ml en el soporte universal para su respectiva titulación con Hidróxido de sodio 0.2 N al blanco del proceso, a la muestra control y la muestra de suelo hasta que el viraje a rosado pálido de la solución se sostuvo más de 30 segundos.

5.6.2 Diferenciación entre aluminio e hidrógeno intercambiable. A las soluciones de las muestras de suelo procedentes de la titulación anterior y coloreadas de rosado pálido, se les agrego 1 gota de Ácido clorhídrico 0.1 N para decolorarlas y luego 10 ml de Fluoruro de Potasio del 4 % y se agitaron vigorosamente.

Posteriormente cuando el color rosado retornaba se preparaban las condiciones instrumentales para titular con Ácido Clorhídrico 0.1 N hasta que el color rosado desapareciera, luego se agregaban 2 gotas de Fenolftaleína; cuando el color rosado reaparecía se continuaba con la titulación con Ácido Clorhídrico, una agitación vigorosa y reposo de algunos minutos hasta que

no volviera a retornar el color rosa. Esta determinación del aluminio intercambiable se determinó cada 30 días durante 4 meses.

Para el cálculo del valor de la acidez, el aluminio y el hidrógeno intercambiable se utilizó la siguiente formulación.

Acidez intercambiable

$$Ai \text{ meq}/100g \text{ de suelo} = \frac{(V1 - VBp) * N * (100 + pw)}{pm}$$

Donde; Ai = acidez intercambiable en me por 100 g de suelo; V1= ml de NaOH gastados en la titulación de la muestra; VBp= ml de NaOH gastados en la titulación del blanco del proceso; N= normalidad de NaOH; pw= porcentaje de humedad en el suelo seco a 105°C (factor de corrección por humedad); pm= peso muestra en g.

Aluminio Intercambiable

$$Al \text{ meq}/100 \text{ g de suelo} = \frac{V2 * N * (100 + pw)}{pm}$$

Donde; Al= aluminio intercambiable en meq por 100g de suelo; V2= ml de HCL gastados en la titulación de la solución; N= normalidad del HCL; pw= porcentaje de humedad en el suelo seco a 105°C (factor de corrección por humedad); pm= peso de muestra en g.

Hidrógeno intercambiable

$$H \text{ meq} / 100 \text{ g de suelo} = Al \text{ meq}/100 \text{ g} - Ai \text{ meq} / 100 \text{ g}$$

Donde; H = Hidrógeno intercambiable en meq por 100 g de suelo, Al = Aluminio intercambiable en meq por 100 g de suelo, Ai= Acidez intercambiable en meq por 100 g de suelo.

Las mediciones de aluminio fueron las observadas en la Tabla 18.

Tabla 18.*Medición de Aluminio Intercambiable.*

Tratamientos	Aimeq30d	Aimeq60d	Aimeq90d	Aimeq120d
PT100	3,103 ^b	2,569 ^b	2,168 ^{bc}	2,068 ^b
PT200	2,168 ^{cd}	2,268 ^{bc}	1,801 ^{cd}	1,401 ^d
PT300	2,002 ^{cd}	1,601 ^e	1,101 ^{fg}	0,900 ^{ef}
PT400	2,377 ^c	2,102 ^{cd}	1,651 ^{de}	1,101 ^{de}
T100	2,902 ^b	2,302 ^{bc}	1,884 ^{cd}	1,351 ^d
T200	2,902 ^b	2,402 ^{bc}	2,302 ^b	1,751 ^c
T300	1,902 ^{cd}	1,501 ^e	1,101 ^{fg}	0,700 ^{fgh}
T400	2,102 ^{cd}	1,601 ^e	1,151 ^{fg}	1,00 ^{ef}
PC100	2,002 ^{cd}	1,701 ^{de}	1,101 ^{fg}	0,900 ^{ef}
PC200	1,701 ^d	1,601 ^e	1,351 ^{ef}	1,00 ^{ef}
PC300	1,901 ^{cd}	1,751 ^{de}	1,101 ^{fg}	0,800 ^{efg}
PC400	1,701 ^d	1,401 ^e	0,800 ^g	0,250 ⁱ
C100	2,102 ^{cd}	1,801 ^{de}	1,401 ^{ef}	0,900 ^{ef}
C200	1,801 ^d	1,501 ^e	1,000 ^{fg}	0,500 ^{ghi}
C300	1,901 ^{cd}	1,401 ^e	1,001 ^{fg}	0,400 ^{hi}
C400	1,701 ^d	1,401 ^e	0,900 ^g	0,300 ⁱ
TS	3,603 ^a	3,203 ^a	3,303 ^a	3,305 ^a
CV	13,183	13,224	16,385	19,590

CV: coeficiente de variación, promedios en columnas seguidos por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,005$), pruebas rangos múltiples de Duncan.

En todos los tratamientos se observó una disminución de la acidez intercambiable con respecto al tratamiento testigo, pues el suelo mostró una reacción gradualmente positiva a la aplicación de las enmiendas alcalinizantes, siendo la enmienda cal caliza la que mejor se comportó en las diferentes mediciones realizadas en su último registro 120 d. La dosis de enmienda que logro la mayor disminución de la acidez fue la de PC400 (Tabla 19).

6. Conclusiones

La acidez del suelo fue enmarcada principalmente por la presencia de aluminio y el mejor proceso correctivo fue el que se aplicó con Cal Caliza incorporada en la proporción de 4000 Kg/Ha en relación a la Cal Travertino, 120 días después de la primera aplicación de la enmienda en la zona de estudio.

Las propiedades físicas del suelo inciden de una manera directa en las enmiendas que se le aplican al recurso suelo ya que de estas depende la lixiviación del material alcalizante y la incorporación en la estructura del suelo, teniendo en cuenta la densidad real y la densidad aparente con las cuales se determinó la porosidad del recurso, indican que estas propiedades oscilan dentro de un suelo con una buena absorción y teniendo en cuenta la textura franco arenosa podemos incidir que el material tenía un buen drenaje dentro de las estructuras de la zona de estudio.

Las propiedades químicas del suelo enmarcaron el comportamiento de los elementos del suelo y el antagonismo de estos en relación a la acidez que presentaba, por ello también se determinaron las características del material alcalizante para que este pueda contribuir en una proporción a los nutrientes ya presentes en el suelo.

La realización de esta práctica en comparación con la misma dinámica en condiciones controladas nos indica que los factores ambientales pueden incidir de una manera poco positiva en la incorporación y el comportamiento del material alcalizante en el suelo.

7. Recomendaciones

Evitar la sobrecarga animal, ya que esto afecta directamente al suelo y sus propiedades fisicoquímicas.

Tener en cuenta las necesidades nutricionales de los suelos, con el fin de realizar adecuadas correcciones y fertilizaciones y así aumentar su productividad, racionalizando el uso de estos y no crear la necesidad de acudir a otras actividades como minería la cual causa un daño irreversible al suelo y al medio ambiente.

Evitar convertir los cultivos en monocultivos desgastando el recurso tanto en propiedades físicas como en requerimientos nutricionales.

Realizar análisis de suelo para determinar su composición química y así poder establecer cuál correctivo aplicar con el fin de corregir el suelo y no intoxicarlo o hacerlo improductivo por falta o exceso de nutrientes.

Referencias bibliográficas

- Alvarado, A., y Fallas, J. (2004). La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca *Tectona grandis* Lf en suelos ácidos de Costa Rica. Revista Agronomía Costarricense, 28(1), 81-87. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/436/43628108.pdf>
- Álvarez, R., Álvarez, C., Steinbach, H., Salas, J., y Grigera, S. (2002). Materia orgánica y fertilidad de los suelos en la pampa ondulada. Buenos Aires, Argentina: IPNI. Recuperado de [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/0FC500FDFAD0D85A8525799C0058CD95/\\$FILE/Art%C3%ADculo%20Materia%20org%C3%A1nica%20AND%20Figuras%20art%C3%ADculo%20Materia%20org%C3%A1nica.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/0FC500FDFAD0D85A8525799C0058CD95/$FILE/Art%C3%ADculo%20Materia%20org%C3%A1nica%20AND%20Figuras%20art%C3%ADculo%20Materia%20org%C3%A1nica.pdf)
- Alvarado, A., Molina, E., y Cabalceta, G. (2010). Acidez y encalado de suelos tecnología de suelos. Zaragoza, España: SERVEL. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3203126>
- Cakmak, I., y Yazici, A. M. (2010). Magnesium a forgotten element in crop production. Better Crops Journal, 94 (2), 23-25. Recuperado de <https://www.kali-gmbh.com/en/pdf-articles/article-201006-better-crops-magnesium.pdf>
- Casierra, F., y Aguilar, O. (2007). Estrés por aluminio en plantas reacciones del suelo síntomas en vegetales y posibilidades de corrección una revisión. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 1 (2), 246-257. Recuperado de https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/8701/7243
- Castro, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos Colombianos énfasis en génesis y aspectos ambientales. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, 27 (104), 319-341. Recuperado de <http://www.docentes.unal.edu.co/glvasque/docs/SUELOS%20DE%20COLOMBIA.pdf>
- Castro, H., Gómez, M., Munévar, O., & Hernández, D. (2006). Diagnóstico y control de la acidez en suelos sulfatados ácidos en el Distrito de riego del Alto Chicamocha (Boyacá) mediante pruebas de incubación. Revista Agronomía Colombiana, 24 (1), 122-130. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/20013/21148>
- Castro, H., y Gómez M, (2008). Actualidad y uso de enmiendas calcáreas en Colombia. Bogotá, Colombia: SCCS. Recuperado de https://www.academia.edu/29817250/MITOS_Y_REALIDADES_DE_LAS_CALES_Y_ENMIENDAS_EN_COLOMBIA
- Castro, H., y Gómez, I. (2010). Fertilidad de suelos y fertilizantes. Bogotá, Colombia: Guadalupe.

- Castro, H., y Munevar, Ó. (2013). Mejoramiento químico de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales encalantes. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 16 (2), 409-416. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v16n2/v16n2a15.pdf>
- Castro, G., y Suárez, R. (2018). Poder reactivo de alcalinización de la cal y el travertino comercializada en las canteras del municipio de Málaga, Santander, Colombia (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia. Recuperado de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/175359.pdf>
- Combatt, E., Jarma, A., y Maza, L. (2008). Crecimiento de *Brachiaria decumbens* Stapf y *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst en suelos sulfatados ácidos de Córdoba. *Revista MVZ Córdoba*, 13(2), 1380-1392. Recuperado de <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/revistamvz/article/view/398/466>
- Encina, K. (2017). Escoria básica y carbonato de calcio en la recuperación de un suelo ácido de Tingo María, en maíz (*Zea mays*) PM 213 en invernadero (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2682/P36-E55-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Espinosa, J., y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos*. Quito, Ecuador: Instituto Internacional de Nutrición Vegetal.
- Esquema de Ordenamiento Territorial. (2003). . Características Generales del Territorio Municipal. San José de Miranda, Colombia: EOT. Recuperado de http://cdim.esap.edu.co/BancoConocimiento/S/san_jose_de_miranda_santander_eot_2003/san_jose_de_miranda_santander_eot_2003.asp
- Galán, C., y Nieto, M. (2004). Hallazgo de una cueva en conglomerado de fragmentos de caliza Jurásica cementados por travertino macizo de Uzturre País Vasco. Tolosa, España: SCA. Recuperado de <http://www.cota0.com/wp-content/PDFS/conglomeradosloatzo.pdf>
- García, A. (2005). Producción de los Vegetales Área de Edafología y Química Agrícola. Badajoz, España: LECCIÓN. Recuperado de <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL5PFPorosidad.html>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2006). *Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos Análisis de pH Método relación Agua*, Bogotá, Colombia: IGAC. Recuperado de <https://www.igac.gov.co/es/catalogo/metodos-analiticos-del-laboratorio-de-suelos>
- Jaramillo, D. (2014). *El suelo origen propiedades espacialidad*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Joint, F., Agencia Internacional Atómica de Energía., y Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (2000). *Management and conservation of tropical acid*

- soils for sustainable crop production. Viena, Austria: IAEA. Recuperado de https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/039/31039182.pdf
- Kass, D. (1998). Fertilidad de los suelos. San José, Costa Rica: Universidad Estatal y a Distancia.
- Kemmitt, S., Wright, D., Goulding, K., y Jones, D. (2006). pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 (5), 898–911. doi: [10.1016/j.soilbio.2005.08.006](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.08.006)
- López, J., Nieto, M., Ramírez, V., y Herrera, L. (2000). Organic acid metabolism in plants from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. *Plant Science Journal*, 160 (1), 1-13. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945200003472>
- Lora R. (2010). Propiedades químicas del suelo. Bogotá, Colombia: SCCS. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000090&pid=S1794-1237201500030000500016&lng=en
- Lukin, V., y Epplin, F. (2003). Optimal frequency and quantity of agricultural lime applications. *Agricultural Systems Journal*, 76 (3), 949-967. Recuperado de <http://agecon.okstate.edu/faculty/publications/890.pdf>
- Ma, J. (2000). Role of organic acids in detoxification of aluminum in higher plants. *Plant and Cell Physiology Journal*. 41 (4), 383-390. doi: [10.1093/pcp/41.4.383](https://doi.org/10.1093/pcp/41.4.383)
- Matsumoto, H. (2000). Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. *International Review of Cytology*, V. 200, 1–46. doi: [10.1016/s0074-7696\(00\)00001-2](https://doi.org/10.1016/s0074-7696(00)00001-2)
- Matzner, E., y Prenzel, J. (1992). Acid deposition in the German solling area effects on soil solution chemistry and Al mobilization. *Water Air and Soil Pollution Journal*, 61 (3-4), 221-234. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00482606>
- McKean, S. (1993). Manual de análisis de suelos y tejido vegetal una guía teórica y práctica de metodologías. Palmira, Valle del Cauca: CIAT. Recuperado de http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos/Ciat/Digital/S593.M2_Manual_de_an%C3%A1lisis_de_suelos_y_tejido_vegetal_Una_gu%C3%ADa_te%C3%B3rica_y_pr%C3%A1ctica_de_metodologia.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (1974). Decreto 2811 de 1974. Bogotá, Colombia: MinAmbiente. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015). Decreto 1076 de 2015. Bogotá, Colombia: MinAmbiente. Recuperado de <http://parquearvi.org/wpcontent/uploads/2016/11/Decreto-1076-de-2015.pdf>

- Molina, E. (1998). Acidez de suelo y encalado. Buenos Aires, Argentina: CISSAF. Recuperado de https://scholar.google.es/scholar?q=related:cLVAqG1HL-8J:scholar.google.com/&scioq=molina+1998+cal&hl=es&as_sdt=0,5
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). Portal de suelos de la FAO. Bogotá, Colombia: FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Osorno, H. (2012). Mitos y realidades de las cales y enmiendas en Colombia (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Ottos, E. (2015). Relación entre el contenido de materia orgánica y nitrógeno total de los suelos de la provincia de Leoncio Prado (tesis de pregrado), Universidad Agraria la Selva, Tingo María, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/173/AGR-628.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Quiroga, A., y Bono, A. (2012). Manual de fertilidad y evaluación de suelos. La Pampa, Argentina: INTA. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_pt_89_manual_de_fertilidad_1_1.pdf
- Rosas, G., Puentes, Y., y Menjivar, J. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia Colombiana. Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 18(3), 529-541. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0122-87062017000300529&script=sci_abstract&tlng=pt
- Sadeghian, S. (2016). La acidez del suelo una limitante común para la producción de café. Manizales, Colombia: Cenicafé. Recuperado de <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/704/1/avt0466.pdf>
- Salas, R. (2006). Evaluación del efecto de una enmienda calcárea en la producción de *Brachiaria brizantha* en un suelo Ultisol de Pocosol San Carlos, San Carlos, Costa Rica: ITCR. Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5894/Evaluaci%C3%B3n%20del%20efecto%20de%20una%20enmienda%20calc%C3%A1rea%20en%20la%20producci%C3%B3n%20de%20Brachiaria%20brizantha%20en%20un%20suelo%20ultisol%20de%20Pocosol,%20San%20Carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Soil Survey Staff. (2014). Claves para la Taxonomía de Suelos. California, Estados Unidos: USDA. Recuperado de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- Van, B. (2011). Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba, Brasil: Instituto Internacional de Nutrição Vegetal.

- Wallnöfer, P., y Engelhardt, G. (1995). Schadstoffe aus dem Boden. Schadwirkungen auf Pflanzen Journal, 17 (1), 118-140. Recuperado de https://www.researchgate.net/scientific-contributions/3415764_PR_Wallnoefer
- Zapata, R. (2004). Química de la acidez del suelo. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Zetina, T., Pastrana, L., Jiménez, J., y Romero, J. (2002). Manejo de suelos ácidos para la región tropical húmeda de México, Veracruz, México: Inifap
- Zetina, R., Trinidad, A., Oropeza, J., Volke, V., y Landois, L. (2005). Relación bases intercambiables rendimiento de maíz en un cambisol dístrico con labranza encalado y abono verde. RevistaTerra Latinoamericana, 23 (3), 389-397. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311101011.pdf>

Apéndices

Apéndice A. Material alcalizante en la zona de estudio



Apéndice B. Determinación de pH

Apéndice C. Determinación de acidez intercambiable

Apéndice D. Análisis físico

