

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



**“EFECTO DEL ENCALADO EN LA ACIDEZ DEL SUELO EN EL CASERÍO LA
TOTORA, DISTRITO DE CALQUIS, SAN MIGUEL – CAJAMARCA”**

T E S I S

**Para Optar el Título Profesional de:
INGENIERO AGRÓNOMO**

**Presentado por el Bachiller:
NÉSTOR CORONADO LLANOS**

**Asesor:
Dr. Ing. Agr. EDIN EDGARDO ALVA PLASENCIA**

CAJAMARCA – PERÚ

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. **Investigador:** Néstor Coronado Llanos
DNI: 72552874
Escuela Profesional/Unidad UNC: Agronomía
2. **Asesor:** Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
Facultad/Unidad UNC: Ciencias Agrarias
3. **Grado académico o título profesional:**
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. **Tipo de Investigación:**
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. **Título de Trabajo de Investigación:**
"EFECTO DEL ENCALADO EN LA ACIDEZ DEL SUELO EN EL CASERÍO LA TOTORA,
DISTRITO DE CALQUIS, SAN MIGUEL – CAJAMARCA"
6. **Fecha de evaluación:** 02/01/2025
7. **Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 18%
9. **Código Documento:** oid:3117:419189711
10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 02/01/2025

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>
 <hr/> Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia DNI: 26620894

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"
Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los veintisiete días del mes de diciembre del año dos mil veinticuatro, se reunieron en el ambiente **2C - 202** de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 587-2024-FCA-UNC, de fecha 18 de noviembre del 2024**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: "**EFECTO DEL ENCALADO EN LA ACIDEZ DEL SUELO EN EL CASERÍO LA TOTORA, DISTRITO DE CALQUIS, SAN MIGUEL - CAJAMARCA**", realizada por el Bachiller **NÉSTOR CORONADO LLANOS** para optar el Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las once horas y cinco minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de diecisiete (17); por tanto, el Bachiller queda expedito para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las doce horas y diez minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Dr. Wilfredo Poma Rojas
PRESIDENTE

Ing. José Lizandro Silva Mego
SECRETARIO

Dr. Isidro Rimarachín Cabrera
VOCAL

Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
ASESOR

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fuente de fortaleza y sabiduría. Por darme la salud y la perseverancia necesaria para culminar esta etapa. Sin su bendición y amor, este logro no habría sido posible.

A mis padres, Gonzalo Coronado y María Teresa Llanos, quienes con su amor, esfuerzo y dedicación han sido mi mayor inspiración. Gracias por su apoyo incondicional, por sus enseñanzas y por inculcarme los valores que me han permitido alcanzar esta meta. A mis hermanas Lidia, Malvina y Gladis, por su cariño, comprensión y constante apoyo a lo largo de este camino.

A todos mis familiares y amigos, por su apoyo, compañía y palabras de ánimo en todo momento. Sus muestras de cariño y su confianza en mí, me han motivado a seguir adelante hasta alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme la vida, la salud y la oportunidad de seguir adelante. Sin tu infinita bondad y bendiciones, este logro no sería posible.

A mis padres, Gonzalo Coronado y María Teresa Llanos, les expreso mi más sincero agradecimiento por su apoyo y por inculcarme los principios y valores que han guiado mi vida.

A mis hermanas, Lidia, Malvina y Gladis, por todo el apoyo brindado a lo largo de este camino.

Un agradecimiento especial a Alida Ramírez Salazar, quien es como una segunda madre para mí. Asimismo, extendo mi gratitud a Liliana, Rocío y Juan Manuel, por todo su apoyo.

A mi asesor Dr. Ing. Agr. Edin Edgardo Alva Plasencia, por sus valiosas enseñanzas y por haber confiado en mi capacidad para llevar a cabo este proyecto.

Al Dr. Jorge Piedra Flores, responsable del proyecto "*Estrategias Tecnológicas para Incrementar la Calidad del Suelo, Pasturas y Leche en la Región Cajamarca*", por darme la oportunidad de formar parte de este proyecto y por su apoyo durante el desarrollo de mi tesis.

Quiero rendir homenaje a la memoria del señor Elar Rodas Quiroz y agradecer a su familia, quienes amablemente cedieron su terreno para la realización de mi investigación. Este trabajo no habría sido posible sin su generosidad y disposición.

Finalmente, a todos mis amigos, quienes de una u otra manera me brindaron su apoyo durante este proceso. Sus palabras de aliento y su ayuda fueron esenciales para culminar esta etapa.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Formulación del problema	3
1.3 Justificación	3
1.4 Objetivos	4
<i>1.4.1 Objetivo general</i>	<i>4</i>
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i>	<i>4</i>
1.5 Hipótesis	4
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Antecedentes	5
<i>2.1.1 A nivel internacional</i>	<i>5</i>
<i>2.1.2 A nivel nacional</i>	<i>7</i>
<i>2.1.3 A nivel local</i>	<i>8</i>
2.2 Bases teóricas	9
<i>2.2.1 Suelo</i>	<i>9</i>
<i>2.2.2 Encalado</i>	<i>19</i>
2.3 Definición de términos	28
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1 Ubicación	31
<i>3.1.1 Condiciones climáticas de la zona de estudio</i>	<i>33</i>
3.2 Materiales	34
<i>3.2.1 Materiales de campo</i>	<i>34</i>
<i>3.2.2 Materiales de laboratorio</i>	<i>35</i>
<i>3.2.3 Materiales de escritorio</i>	<i>35</i>
<i>3.2.4 Equipos</i>	<i>35</i>
<i>3.2.5 Insumos</i>	<i>35</i>

3.3	Diseño experimental, arreglos de los tratamientos	35
3.4	Niveles y tratamientos de estudio	36
3.5	Metodología	37
3.5.1	<i>Procedimiento</i>	37
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		41
4.1	pH en el suelo	41
4.2	pH en el suelo en función del tiempo	44
4.3	Contenido de aluminio en el suelo	46
4.4	Contenido de aluminio en el suelo en función del tiempo	49
4.5	Contenido de hidrógeno en el suelo	51
4.6	Contenido de hidrógeno en el suelo en función del tiempo	54
4.7	Acidez intercambiable en el suelo	56
4.8	Acidez intercambiable en el suelo en función del tiempo	59
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		62
5.1	Conclusiones	62
5.2	Recomendaciones	63
CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		64
ANEXOS		76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Página
1	<i>Rangos de pH, clasificación y efectos característicos</i>	11
2	<i>Clasificación de material encalante que contienen magnesio</i>	22
3	<i>Valores de poder de neutralización de varios materiales de encalado en su forma pura</i>	24
4	<i>Eficiencia relativa granulométrica de la cal con base en el tipo de malla</i>	25
5	<i>Niveles y tratamientos de estudio</i>	36
6	<i>Análisis de suelo del campo experimental</i>	37
7	<i>Eficiencia relativa granulométrica de la cal</i>	38
8	<i>Métodos utilizados en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva</i>	40
9	<i>Análisis de varianza (ANOVA) para el pH en el suelo</i>	41
10	<i>Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad para el pH en el suelo</i>	42
11	<i>Análisis de varianza (ANOVA) para el aluminio en el suelo</i>	46
12	<i>Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad para el aluminio en el suelo</i>	47
13	<i>Análisis de varianza (ANOVA) para el hidrógeno en el suelo</i>	51
14	<i>Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad para el hidrógeno en el suelo</i>	52
15	<i>Análisis de varianza (ANOVA) para la acidez intercambiable en el suelo</i>	56
16	<i>Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad para la acidez intercambiable en el suelo</i>	57
17	<i>Resultados del pH del suelo obtenidos a los 60 días posteriores a la realización del encalado</i>	76
18	<i>Resultados del pH del suelo obtenidos a los 120 días posteriores a la realización del encalado</i>	76
19	<i>Resultados del pH del suelo obtenidos a los 180 días posteriores a la realización del encalado</i>	76
20	<i>Resultados del pH del suelo obtenidos a los 240 días posteriores a la realización del encalado</i>	77
21	<i>Resultados del contenido de aluminio en el suelo obtenidos a los 60 días posteriores a la realización del encalado</i>	77

22	<i>Resultados del contenido de aluminio en el suelo obtenidos a los 120 días posteriores a la realización del encalado</i>	77
23	<i>Resultados del contenido de aluminio en el suelo obtenidos a los 180 días posteriores a la realización del encalado</i>	78
24	<i>Resultados del contenido de aluminio en el suelo obtenidos a los 240 días posteriores a la realización del encalado</i>	78
25	<i>Resultados del contenido de hidrógeno en el suelo obtenidos a los 60 días posteriores a la realización del encalado</i>	78
26	<i>Resultados del contenido de hidrógeno en el suelo obtenidos a los 120 días posteriores a la realización del encalado</i>	79
27	<i>Resultados del contenido de hidrógeno en el suelo obtenidos a los 180 días posteriores a la realización del encalado</i>	79
28	<i>Resultados del contenido de hidrógeno en el suelo obtenidos a los 240 días posteriores a la realización del encalado</i>	79
29	<i>Resultados de la acidez intercambiable del suelo obtenidos a los 60 días posteriores a la realización del encalado</i>	80
30	<i>Resultados de la acidez intercambiable del suelo obtenidos a los 120 días posteriores a la realización del encalado</i>	80
31	<i>Resultados de la acidez intercambiable del suelo obtenidos a los 180 días posteriores a la realización del encalado</i>	80
32	<i>Resultados de la acidez intercambiable del suelo obtenidos a los 240 días posteriores a la realización del encalado</i>	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	<i>Ubicación geográfica de la zona de estudio en el caserío La Totorá, San Miguel – Cajamarca.</i>	32
2	<i>Registro de temperaturas medias mensuales durante el periodo de la investigación (noviembre 2023 – julio 2024).</i>	33
3	<i>Registro de la precipitación medias mensuales durante el periodo de la investigación (noviembre 2023 – julio 2024).</i>	34
4	<i>Distribución de tratamientos en el campo experimental.</i>	36
5	<i>Promedio del pH en el suelo.</i>	43
6	<i>pH en el suelo en función del tiempo.</i>	45
7	<i>Promedio del aluminio en el suelo.</i>	48
8	<i>Contenido de aluminio en el suelo en función del tiempo.</i>	50
9	<i>Promedio del contenido de hidrógeno en el suelo.</i>	53
10	<i>Contenido de hidrógeno en el suelo en función del tiempo.</i>	55
11	<i>Promedio la acidez intercambiable en el suelo.</i>	57
12	<i>Acidez intercambiable en el suelo en función del tiempo.</i>	60
13	<i>Análisis de suelo inicial del campo experimental.</i>	82
14	<i>Interpretación del análisis de suelo del campo experimental.</i>	83
15	<i>Granulometría del material encalante por tamizado. A: Tamizado de la cal. B: Pesaje de la cal.</i>	84
16	<i>Preparación del terreno.</i>	84
17	<i>Delimitación y trazado de parcelas en el campo experimental.</i>	85
18	<i>Encalado del campo experimental.</i>	85
19	<i>Muestreo de suelos.</i>	86
20	<i>Pesaje de muestras de suelo, previo envío al laboratorio para su análisis. A: Etiquetado de bolsas. B: Pesaje de muestras.</i>	86

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Título	Página
1	<i>Resultados de la fase de laboratorio</i>	76
2	<i>Análisis de suelos</i>	82
3	<i>Panel de fotografías de la fase de campo y laboratorio</i>	84

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del encalado en la acidez del suelo en el caserío La Totorá, distrito de Calquis, San Miguel – Cajamarca. El estudio se realizó en un predio ubicado a 3515 m s. n. m., empleando un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con 4 tratamientos en dosis de (0, 2, 4, 6 t ha⁻¹ de cal) y 3 repeticiones. Se evaluaron el pH, contenido de aluminio, contenido de hidrógeno y la acidez intercambiable. Los resultados indicaron que la aplicación de hidróxido de calcio produjo diferencias significativas en el pH del suelo, con el tratamiento de 6 t ha⁻¹ alcanzando un pH de 5.61, superior a los tratamientos de 4 y 2 t ha⁻¹, que registraron valores de 4.91 y 4.52, respectivamente. En cuanto al contenido de aluminio, el tratamiento de 6 t ha⁻¹ fue el más efectivo, reduciendo el aluminio a 0.1633 Cmol (+) kg⁻¹, en comparación con 0.4533 y 1.5233 Cmol (+) kg⁻¹, obtenido con los tratamientos de 4 y 2 t ha⁻¹, respectivamente. Además, se observó una reducción significativa del contenido de hidrógeno con la aplicación de cal, siendo el tratamiento de 6 t ha⁻¹ el más efectivo (0.440 Cmol (+) kg⁻¹). La acidez intercambiable mostró diferencias significativas, destacándose nuevamente el tratamiento de 6 t ha⁻¹ con un valor de 0.603 Cmol (+) kg⁻¹. En conclusión, la aplicación de cal incrementó el pH del suelo y redujo significativamente el contenido de aluminio, hidrógeno y acidez intercambiable, con mayor efectividad a medida que se incrementaba la dosis aplicada.

Palabras clave: cal, pH, contenido de aluminio e hidrógeno, acidez intercambiable

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the effect of liming on soil acidity in the village of La Totorá, district of Calquis, San Miguel – Cajamarca. The study was conducted on a plot located at 3515 m a. s. l., using a randomized complete block design (RCBD) with 4 treatments in doses of (0, 2, 4, 6 t ha⁻¹ of lime) and 3 repetitions. Soil pH, aluminum content, hydrogen content, and exchangeable acidity were evaluated. The results indicated that the application of calcium hydroxide produced significant differences in soil pH, with the 6 t ha⁻¹ treatment reaching a pH of 5.61, higher than the 4 and 2 t ha⁻¹ treatments, which recorded values of 4.91 and 4.52, respectively. Regarding aluminum content, the 6 t ha⁻¹ treatment was the most effective, reducing aluminum to 0.1633 Cmol (+) kg⁻¹, compared to 0.4533 and 1.5233 Cmol (+) kg⁻¹ obtained with the 4 and 2 t ha⁻¹ treatments, respectively. Additionally, a significant reduction in hydrogen content was observed with lime application, with the 6 t ha⁻¹ treatment being the most effective (0.440 Cmol (+) kg⁻¹). Exchangeable acidity showed significant differences, with the 6 t ha⁻¹ treatment again standing out with a value of 0.603 Cmol (+) kg⁻¹. In conclusion, lime application increased soil pH and significantly reduced aluminum, hydrogen, and exchangeable acidity, with greater effectiveness as the applied dose increased.

Keywords: Lime, pH, aluminum and hydrogen content, exchangeable acidity

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los suelos ácidos presentan una limitación para la producción agrícola, sobre todo en áreas de altas altitudes, donde los cultivos pueden verse afectados negativamente. El encalado, como práctica agrícola, juega un papel importante en la corrección de la acidez del suelo, mejorando sus condiciones para el crecimiento óptimo de las plantas y contribuyendo al desarrollo sostenible de la agricultura.

La acidez de los suelos puede tener diversas causas, entre ellas, la mineralización de materiales parentales con bajo contenido de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+), la lixiviación de nutrientes, el uso de fertilizantes amoniacales o incluso la lluvia ácida (Rivera et al., 2016). Este fenómeno afecta las propiedades biológicas y químicas del suelo, limitando la disponibilidad de nutrientes esenciales como calcio, magnesio, fósforo y potasio (Calva y Espinosa, 2017).

El manejo adecuado de la acidez del suelo no solo mejora la producción agrícola, sino que también tiene implicaciones positivas para la conservación del medio ambiente. La aplicación de cal ha demostrado ser una de las soluciones más efectivas para aumentar la productividad de los suelos, al mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes y fertilizantes (Alcarraz, 2010). El encalado es una de las prácticas agrícolas que mayor respuesta produce en los cultivos. Este proceso se enfoca en neutralizar los iones de hidrógeno (H^+), reduciendo la acidez del suelo, mejorando las propiedades químicas del suelo, también optimiza las condiciones físicas y favoreciendo el desarrollo de cultivos (Zapata, 2004).

De acuerdo a las circunstancias expuestas se instalará el experimento en un suelo ácido con el objetivo de evaluar el efecto del encalado en la acidez del suelo en el caserío La Totorá, distrito de Calquis, San Miguel – Cajamarca.

1.1 Descripción del problema

La acidez del suelo representa un desafío global para la agricultura, afectando la producción de alimentos en diversas regiones del mundo (Aya, 2024). Este fenómeno se origina a través de factores tanto naturales como antropogénicos, tales como la mineralización de materiales parentales y el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados (Usón et al., 2010). A nivel global, se estima que aproximadamente el 40% de las tierras cultivables presentan algún grado de acidez, lo que afecta directamente la fertilidad del suelo, la capacidad de las plantas para absorber nutrientes y la estructura del suelo. Además, incrementa la toxicidad de ciertos elementos, como el aluminio y el manganeso, que interfieren con el desarrollo de los cultivos (Aragón y Vivas, 2021).

A nivel nacional, la acidez del suelo limita la productividad agrícola, en especial aquellas áreas situadas en las regiones alto andinas (Pender y Hazell, 2000). Las prácticas agrícolas no sostenibles y la lixiviación natural de nutrientes han contribuido al deterioro de la calidad del suelo, lo que ha generado una disminución en la producción de cultivos básicos (Morales et al., 2013). Por otro lado, la acidez del suelo en la región de Cajamarca se da por las condiciones geográficas y climáticas, como las altas precipitaciones que promueven la lixiviación de nutrientes básicos (Nazar, 2015). Los suelos ácidos en zonas con altas altitudes se caracterizan por un pH bajo, altos niveles de aluminio y una disponibilidad reducida de nutrientes esenciales como el calcio y el magnesio, lo que limita el rendimiento de los cultivos (Tasilla, 2021).

El encalado surge como una solución efectiva para corregir la acidez del suelo. Esta práctica consiste en la aplicación de materiales calcáreos, como la cal apagada, que ayudan a elevar el pH del suelo, reduciendo los iones H^+ y Al^{3+} que contribuyen a la acidez y mejorando la disponibilidad de nutrientes esenciales como el calcio y magnesio. Además, promueve una

mayor actividad microbiana y mejora la estructura del suelo, permitiendo un mayor desarrollo radicular y, en consecuencia, un aumento en la productividad agrícola (Zapata, 2004).

1.2 Formulación del problema

¿Cuál es efecto del encalado en la acidez del suelo en el caserío La Totorá, distrito de Calquis, San Miguel – Cajamarca?

1.3 Justificación

Esta investigación, del encalado en la acidez del suelo, es una excelente oportunidad para crecer y ampliar mis conocimientos en el ámbito de mi carrera profesional. Éste estudio académicamente puede generar iniciativa a personas inmersas en la investigación para lograr nuevos trabajos de investigación de la acidez del suelo, lo cual es un problema que radica en la mayoría de suelos que se están volviendo ácidos a causa de la lluvia, riego, fertilizantes, abonos orgánicos, etc., todo esto está contribuyendo a que los suelos se transformen ácidos, de tal manera que con el tiempo la problemática se va a hacer más aguda. De otro lado, las prácticas de recomendación de fertilización actualmente pocas veces consideran el encalado para corregir o para detener un poco la acidez del suelo, de tal manera que, se hace imperativo la necesidad de ver cómo es que la aplicación de cal va a influir en las diferentes formas de acidez, como en el hidrógeno, aluminio, acidez intercambiable y el pH del suelo a las diferentes dosis de cal, para obtener una respuesta inmediatamente, qué hacer con los suelos ácidos propios de la zona en estudio.

Finalmente, en el ámbito social los resultados de la investigación ayudarán a los agricultores a realizar un buen manejo de suelos ácidos a través de las diferentes dosis de encalado, permitiendo neutralizar la acidez de sus suelos y reduciendo la toxicidad del aluminio, logrando mejorar el rendimiento en los diferentes cultivos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del encalado en la acidez del suelo en el caserío La Totorá, distrito de Calquis, San Miguel – Cajamarca.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el efecto del encalado en el pH del suelo en el caserío La Totorá, distrito de Calquis, San Miguel – Cajamarca.
- Determinar el efecto del encalado en el contenido de aluminio del suelo en el caserío La Totorá, distrito de Calquis, San Miguel – Cajamarca.
- Determinar el efecto del encalado en el contenido de hidrógeno del suelo en el caserío La Totorá, distrito de Calquis, San Miguel – Cajamarca.
- Determinar el efecto en la acidez intercambiable del suelo en el caserío La Totorá, distrito de Calquis, San Miguel – Cajamarca.

1.5 Hipótesis

El encalado (hidróxido de calcio) influye positivamente en la corrección de la acidez del suelo.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes

2.1.1 *A nivel internacional*

Haile et al. (2023), en su investigación “Propiedades del suelo, rendimiento de los cultivos y rentabilidad económica en respuesta a la aplicación de cal en nitisoles ácidos de las tierras altas del sur de Etiopía”, el objetivo de este estudio fue analizar el impacto de diversas tasas de aplicación de cal sobre las propiedades del suelo, el rendimiento de la cebada, y su rentabilidad para los pequeños agricultores en el distrito de Bule, en la zona de Gedeo, al sur de Etiopía. El experimento se estructuró en un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones, aplicando seis diferentes dosis de cal: 0, 2.74, 4.11, 5.48, 6.85 y 8.22 t ha⁻¹. Los resultados mostraron una disminución significativa en la acidez intercambiable en respuesta a la aplicación de cal durante el experimento. El valor más bajo de acidez intercambiable, 0.16 cmol (+) kg⁻¹, se observó en la parcela tratada con la dosis más alta de cal (8.22 t ha⁻¹), seguido de 0.49 cmol (+) kg⁻¹ en la parcela con 5.48 t ha⁻¹. En contraste, la parcela de control registró el valor más alto de acidez intercambiable, con 3.37 cmol (+) kg⁻¹ de suelo. En conclusión, la cal neutraliza los ácidos del suelo, reduciendo la acidez intercambiable mediante la reacción del hidróxido de calcio con los iones de hidrógeno y aluminio, formando compuestos menos solubles que no contribuyen a la acidez del suelo.

Ejigu et al. (2023), evaluó el “Efecto de las dosis de cal y el método de aplicación sobre las propiedades del suelo de Luvisoles ácidos y los rendimientos de trigo (*Triticum aestivum*, L.) en el noroeste de Etiopía”, cuyo objetivo fue evaluar los efectos de la cantidad de cal y el método de aplicación sobre las propiedades de un Luvisol ácido y el rendimiento del trigo en el noroeste de Etiopía. El experimento se llevó a cabo en una finca durante las principales temporadas de cultivo de 2018 y 2019, en la aldea de Sahirna, distrito de Farta, en la zona sur

de Gondar, perteneciente al estado regional nacional de Amhara. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones, aplicando cal en dosis de 2, 3, 6 y 12 t ha⁻¹ mediante el método al voleo. Los resultados indicaron que la aplicación de cal incrementó significativamente el pH del suelo y redujo la acidez intercambiable. Los tratamientos que recibieron la dosis más alta de cal (12 t ha⁻¹) alcanzaron los valores más elevados de pH (6.27) y la menor acidez intercambiable (0.15 cmol (+) kg⁻¹). Por otro lado, las parcelas de control presentaron el pH más bajo (4.89) y la mayor acidez intercambiable (2.11 cmol (+) kg⁻¹). En conclusión, el aumento del pH y la disminución de la acidez intercambiable del suelo se relacionan con la presencia de cationes básicos (Ca²⁺ y Mg²⁺) y aniones (CO₃⁻²) en la cal, que intercambian H⁺ en los sitios de intercambio, formando H₂O y CO₂. Los cationes ocupan el lugar del H⁺ en los sitios de intercambio, lo que resulta en un aumento del pH del suelo.

Ramírez et al. (2021), en su investigación “Respuesta al encalado de pastos del género *Urochloa*, cultivados en la región Sabana de Manacas, Cuba”, cuyo objetivo fue evaluar cómo responden cuatro especies de pastos al encalado en un suelo gley nodular ferruginoso de la región Sabana de Manacas, provincia de Villa Clara en Cuba. Se utilizó un diseño de bloques al azar con un arreglo factorial y cuatro repeticiones, aplicando cuatro niveles de cal (0, 2, 4 y 6 t ha⁻¹). Los resultados mostraron que el encalado incrementó significativamente el contenido de calcio intercambiable de 3.32 a 6.1 Cmol (+) kg⁻¹, elevó el pH de 4.8 a 6.9, y aumentó la capacidad de intercambio catiónico de 4.59 a 7.3 Cmol (+) kg⁻¹. Además, se observó una reducción notable en la acidez intercambiable del suelo, disminuyendo de 4.33 a 0.91 Cmol (+) kg⁻¹. Estos efectos fueron proporcionales a las dosis de cal aplicadas, con los mejores resultados obtenidos al aplicar 6 t ha⁻¹. En conclusión, el encalado mejora la disponibilidad de calcio, disminuye la acidez intercambiable y aumenta la productividad de los pastos cultivados en suelos ácidos y de baja fertilidad en la región Sabana de Manacas.

Rosas-Patiño et al. (2017), en su investigación “Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana”, cuyo objetivo es determinar el tipo y la dosis óptima de cal para elevar el pH y evaluar su impacto en la disponibilidad de nutrientes en un suelo cultivado con cacao en el municipio de Puerto Rico, departamento de Caquetá. El experimento utilizó dosis crecientes (0, 1, 3, 5, 7, 9, 11 t ha⁻¹) de cal dolomítica (CaMg(CO₃)₂) y carbonato de calcio (CaCO₃) y se diseñó con un esquema estadístico completamente al azar con cuatro repeticiones, con el fin de identificar el material encalante más reactivo y que mejor modifique la acidez del suelo, medida a través del pH, Al³⁺, H⁺, y acidez total. Durante 76 días, se tomaron muestras de suelo cada 10 días en cada unidad experimental para monitorear las variables. Los resultados mostraron que, en el caso de la cal agrícola, la concentración de hidrógeno sin aplicación de cal fue de 0.78 Cmol (+) kg⁻¹, y la dosis que logró una reducción significativa fue 5 t ha⁻¹, alcanzando un valor de 0.18 Cmol (+) kg⁻¹, mientras que, con la cal dolomítica, la dosis de 7 t ha⁻¹ disminuyó este valor a 0.20 Cmol (+) kg⁻¹. En conclusión, el H⁺ se neutralizó con aplicaciones superiores a 7 t ha⁻¹ de cal dolomítica, lo cual se debe a que la acidez intercambiable del suelo analizado depende principalmente del H⁺ derivado de la hidrólisis.

2.1.2 A nivel nacional

Vivanco (2016), en su investigación “Fuentes y niveles de encalado en el crecimiento de plantones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en dos profundidades de un suelo”, cuyo objetivo fue evaluar el impacto de distintas fuentes y niveles de materiales encalantes en la modificación de ciertas características del suelo y en el crecimiento de plantones de cacao en el vivero de la Facultad de Agronomía de la UNAS, provincia de Leoncio Prado, en el departamento de Huánuco. Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con un arreglo factorial de 2A x 3B x 4C, que incluyó dos tipos de sustrato, tres fuentes de encalado con cuatro niveles cada una, además de dos tratamientos adicionales (testigos), con cuatro repeticiones. Las dosis de

cal aplicadas fueron de 0, 987, 1,960, 2,947 y 3,920 kg ha⁻¹. Los resultados mostraron variaciones en las propiedades del suelo entre las profundidades de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm como consecuencia de la aplicación de cal. En la capa superior del suelo (0-20 cm), donde el contenido de aluminio en el tratamiento testigo fue de 0.4386 Cmol (+) kg⁻¹, la aplicación de cal hidratada en cualquiera de sus niveles redujo el contenido de aluminio a cero, demostrando su alta reactividad y capacidad neutralizante. En la capa inferior (20-40 cm), el contenido de aluminio también disminuyó significativamente: 987 kg ha⁻¹ a 0.2504 Cmol (+) kg⁻¹, 1,960 kg ha⁻¹ a 0.1285 Cmol (+) kg⁻¹, y en los tratamientos de 2,947 y 3,920 kg ha⁻¹, la concentración de aluminio fue reducida a cero. En conclusión, la aplicación de cal a dosis más altas disminuyó la concentración de aluminio en ambas profundidades del suelo, aunque el efecto del encalado fue más pronunciado en la capa superficial de 0 a 20 cm.

2.1.3 A nivel local

Tasilla (2021), en su investigación “Variación de la reacción del suelo a la aplicación de cal de diferente granulometría en la Encañada – Cajamarca, cuyo objetivo fue analizar la variación de la reacción del suelo ante la aplicación de cal con diferentes granulometrías realizada en el Caserío de Rodacocha, Distrito de la Encañada, Provincia y Departamento de Cajamarca. Se empleó un Diseño de Bloques Completamente Randomizado (DBCR) en campo, con 09 tratamientos experimentales y 03 repeticiones. En cuanto a la dosis de cal, se aplicaron 1 t ha⁻¹ y 2 t ha⁻¹ con la misma granulometría en cada tratamiento para analizar la reacción del suelo en relación con la finura y la cantidad de cal utilizada. Los resultados mostraron que las diferentes granulometrías de cal aplicadas tuvieron un efecto significativo en la corrección del pH del suelo. En particular, el tratamiento T9 (2 t ha⁻¹ de cal), con una granulometría inferior a 0.3 mm, mostró un pH promedio de 5.57 en la primera evaluación, 5.69 en la segunda, 6.61 en la tercera y 6.79 en la cuarta, siendo estadísticamente superior al resto de los tratamientos en las cuatro evaluaciones. Se concluye que el tratamiento con 2 t ha⁻¹

¹ de con una granulometría inferior a 0.3 mm fue el más efectivo, alcanzando un pH de 6.79 después de dos meses, lo que lo sitúa dentro del rango de un suelo neutro (6.6 a 7.3). Además, se observó que la cal con granulometría más fina tiene un efecto correctivo más rápido en comparación con la cal de partículas más gruesas, que requiere más tiempo para reaccionar por completo. Esto hace que la cal fina sea especialmente útil en situaciones que requieren una corrección rápida de la acidez del suelo.

Nazar (2015), en su investigación “Efecto del encalado en el crecimiento de la Valeriana pilosa R&P en Huanico, Cajamarca”, cuyo objetivo es el efecto del encalado en el crecimiento de Valeriana pilosa R&P en la localidad de Campo Alegre, Caserío de Huanico, en la Provincia y Región de Cajamarca. Se emplearon distintas dosis de cal en 4 tratamientos (0, 1, 2, 3, 4 t ha⁻¹) en parcelas de 6 m² dentro de un área total de 120 m². El diseño experimental utilizado fue de bloques completamente al azar, con 4 tratamientos y 3 repeticiones. Se evaluaron variables como pH, MO, P, K, (Ca y Mg), Al⁺, y acidez cambiante, después de 3 meses de aplicación. Los resultados indican que la aplicación de diferentes dosis de tratamiento tiene un impacto en la reducción de la concentración de aluminio en el suelo. La disminución más significativa ocurre con dosis de 3 t ha⁻¹, donde la concentración se reduce a 1.01 meq/100g, y alcanza el nivel más bajo con dosis de 4 t ha⁻¹, con 0.58 meq/100g, en comparación con el testigo que presentó una concentración de aluminio de 6.93 meq/100g. En conclusión, la aplicación de cal muestra una eficacia en la reducción de la concentración de aluminio en el suelo, a medida que se aumenta la dosis. El tratamiento con 4 t ha⁻¹, es la más efectiva, alcanzando la menor concentración de aluminio.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Suelo

El suelo es un ente activo y que se encuentra en constante movimiento, fundamental para la existencia de vida en nuestro planeta, además de proveer alimentos y energía

(Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 1996). Debido a esto, es crucial crear un ambiente de comprensión mutua en el que se utilicen estrategias inter y multidisciplinarias para investigar y preservar el suelo (Vargas-Rodríguez et al., 2020).

Según Pereira et al. (2011), el suelo es una capa delgada que ha sido formada de manera gradual, a lo largo de los años, mediante el deterioro de las rocas superficiales debido a la influencia del agua, las variaciones de temperatura y la acción del viento. Además, la FAO (1996) indica que está formado por minerales, materia orgánica, microorganismos, organismos diminutos, aire y agua.

De acuerdo con Hurtado (2020), el suelo se expresa como un sistema trifásico, que está compuesto por una porción sólida conformada por partículas minerales y materia orgánica, una porción líquida constituida por agua, y una porción gaseosa consistente en aire. Por su parte, Powlson et al. (2011) mencionan que el suelo cumple diversas funciones, pero una de las más destacadas es servir como base para las raíces de las plantas, permitiéndoles obtener el agua y los nutrientes necesarios para desarrollarse.

A. Suelos ácidos

Los suelos ácidos pertenecen a los Ferralsoles, Acrisoles, Histosoles, Espodosoles, Ultisoles, Oxisoles e Inceptisoles y en menor medida a los Andisoles, Plinthisoles, Alisoles y Nitisoles (Agegnehu et al., 2021; Molina y Alvarado, 2012). La acidez del suelo es un fenómeno natural que produce la liberación de elementos tóxicos para las plantas a partir de los minerales presentes en el suelo debido a reacciones bioquímicas que generan ácido (H^+) (Vistoso y Martínez-Lagos, 2019), alrededor del 50% de todos los suelos cultivables a nivel mundial se clasifican como ácidos, logrando obstaculizar significativamente al crecimiento de los cultivos (Wang et al., 2021).

La acidez del suelo se cuantifica en función de los iones de hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{3+}) presentes en la solución del suelo (Agegnehu et al., 2021), en la cual influyen varios factores como la deficiencia de macronutrientes y micronutrientes, la baja actividad biológica de microorganismos benéficos y una baja capacidad de retención de agua que están sujetos a la compactación y erosión hídrica (Fageria y Baligar, 2008).

Para Molina y Alvarado (2012), la acidez reduce la disponibilidad de nutrimentos del suelo (P, K, Ca y Mg), incrementando la movilidad de elementos tóxicos, provocando variaciones en la estructura de la microflora y microfauna (Carrizo et al., 2014); además, es una de las principales limitaciones para la producción de cultivos en todo el mundo (Fageria y Nascente, 2014).

Además, Arévalo et al. (2024), el termino acidez del suelo se usa para expresar la cantidad de iones hidrógeno (H^+), la cual se determina midiendo la concentración de H^+ en la solución suelo y que, como parámetro, es denominado como potencial de hidrógeno, que se define como el inverso del logaritmo de la actividad de iones H^+ de acuerdo a la siguiente fórmula (Espinosa y Molina, 1999):

$$pH = \log \frac{1}{(H^+)} \quad (1)$$

Donde:

H^+ : concentración de iones hidrógeno.

Tabla 1

Rangos de pH, clasificación y efectos característicos

pH	Evaluación	Efectos esperables
< 4.5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables
4.5 – 5.0	Muy fuertemente ácido	Toxicidad por Al^{3+} y Mn^{2+}
5.1 – 5.5	Fuertemente ácido	Exceso de Co, Cu, Fe, Mn y Zn Suelos sin carbonato de calcio Actividad bacteriana escasa

pH	Evaluación	Efectos esperables
		Deficiencia de Ca, K, N, Mg, Mo, P y S
5.6 – 6.0	Moderadamente ácido	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos
6.1 – 6.5	Ligeramente ácido	Máxima disponibilidad de nutrientes
6.6 – 7.3	Neutro	Mínimos efectos tóxicos
		Por debajo de pH 7.0 el carbonato cálcico no es estable en el suelo
7.4 – 7.8	Ligeramente alcalino	Suelos generalmente con CaCO ₃
7.9 – 8.4	Moderadamente alcalino	Disminuye la disponibilidad de P y B Deficiencia creciente de Co, Cu, Fe, Mn y Zn Suelos calizos Clorosis férrica debida al HCO ₃
8.5 – 9.0	Fuertemente alcalino	En suelos con carbonatos, estos pH altos pueden deberse al MgCO ₃ , si no hay sodio intercambiable Mayores problemas de clorosis férrica
> 9.1	Muy fuertemente alcalino	Presencia de carbonato sódico Elevado porcentaje de sodio intercambiable (ESP>15 %) Toxicidad por Na y B Movilidad del P como Na ₃ PO ₄ Nula actividad microbiana Micronutrientes poco disponibles, excepto Mo

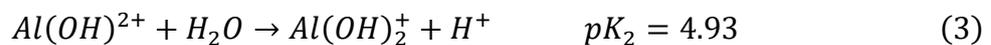
Fuente: Porta et al. (2003; como se cita en Arévalo et al., 2024).

B. Origen de los suelos ácidos

Se origina debido a la presencia de iones Al⁺³ y H⁺ (Calva y Espinosa, 2017), esto ocasiona la reducción del pH, ocasionando una pérdida de cationes alcalino y alcalinotérreos (K⁺, Na⁺, Ca⁺², Mg⁺²) e incremento de cationes metálicos (Al⁺³, Fe⁺³, Mn⁺⁴) que pueden sufrir hidrólisis ácida, lo cual causa una disminución en el crecimiento de las plantas (Zapata, 2004). La presencia de protones (H⁺) en el suelo es a causa de la acidez, los cuales proceden de diversas fuentes: la hidrólisis del dióxido de carbono (CO²) que proviene de la respiración de los microorganismos, la hidrólisis de cationes metálicos, los grupos ácidos de la materia

orgánica y los fertilizantes (Campillo y Sadzawka, 2006). Asimismo, la absorción de estos iones puede tener lugar como consecuencia de actividades contaminantes, tales como la presencia de lluvia ácida y la descarga de desechos industriales (Vázquez y Millán, 2017).

Además, Vázquez y Millán (2017) señalan que el aluminio es uno de los factores principales que contribuyen al aumento de la acidez en los suelos. Los iones Al^{3+} desplazados de los minerales arcillosos por otros cationes, se hidrolizan para formar complejos monoméricos y poliméricos hidroxialumínicos estas reacciones liberan H^+ y contribuyen a la acidez del suelo, como se muestra en las siguientes ecuaciones:



C. Formas de presentación de la acidez del suelo

a. Activa

Está relacionado con el hidrógeno disociado en la solución del suelo y proveniente de diferentes fuentes, midiéndose a través del pH (Espinosa y Molina, 1999).

b. Intercambiable

Es la acidez del suelo que se neutraliza con enmiendas calcáreas o una solución salina tamponada para elevar el pH a un valor específico, pero que no se puede reemplazar por una solución salina no tamponada de KCl o NaCl (Bloom et al., 2005).

c. No intercambiable

Está relacionado al hidrógeno en enlace covalente en la superficie de los minerales arcillosos de carga variable (Espinosa y Molina, 1999).

d. Acidez total

Se relaciona con la suma de la acidez residual e intercambiable; es decir, la acidez total se determina calculando la diferencia entre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y las bases de intercambio reemplazadas por amonio a pH 7 (Arévalo et al., 2024).

D. Causas y fuentes de la acidez del suelo

Las causas y fuentes de la acidez de los suelos derivan de diferentes formas, se dan por origen natural y otras provocadas por el hombre, a través del manejo (Bernier y Alfaro, 2006).

a. Acidez natural o pedogénesis

La acidez natural se produce de manera espontánea a través de la meteorización química continua, lo cual conlleva a la pérdida de cationes como K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y al aumento de cationes metálicos como Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{4+} (Zapata, 2004). La actividad volcánica puede neutralizar o acidificar el suelo, según el lugar donde se depositen las cenizas volcánicas, además, se presenten emanaciones periódicas de gases por tiempo prolongado (Usón et al., 2010).

La acidez del suelo es relativamente más importante en ambientes en los cuales la temperatura y la humedad son altas (como ocurre en regiones tropicales lluviosas) y en zonas donde se acumulan sustancias orgánicas (suelos mal drenados en ambientes fríos), que en otro tipo de ambientes (Molina y Alvarado, 2012).

a.1 Las principales fuentes naturales de acidificación del suelo

Iones de aluminio. Es la fuente en la acidez de los suelos, además, comprende el 7.1 % de la corteza terrestre y está contenido en minerales primarios, secundarios y en óxidos e hidróxidos de aluminio (Campillo y Sadzawka, 2006). Por otro lado, contribuye a la acumulación y estabilización de la materia orgánica de los suelos volcánicos, debido a la formación de complejos estables (Toneatti, 2006).

Aluminio intercambiable. Para Bernier y Alfaro (2006), el aluminio intercambiable en la solución del suelo es reconocido como uno de los principales factores en la acidez del suelo. Cuando se le aplica algún material calcáreo los iones Al^{3+} son desplazados de los minerales arcillosos por otros cationes (Ca^{+2}) estas se hidrolizan (reaccionan con una molécula de agua) para formar complejos monoméricos y poliméricos hidroxialumínicos (Espinosa y Molina, 1999).

b. Acidez antrópica o inducida por manejo

b.1 Descomposición de la materia orgánica

La descomposición de la materia orgánica forma parte de la acidez del suelo, generando iones de hidrógeno (H. Zhang, 2022). La materia orgánica del suelo es degradada por los microorganismos, creando un suministro constante de CO_2 , que se transforma fácilmente en bicarbonato (HCO_3^-) (H. Zhang et al., 2024). Esta reacción produce H^+ y bicarbonato (HCO_3^-), que se combinan fácilmente con cationes básicos, lixiviándolos del perfil (León et al., 2018).

En general, en condiciones favorables de temperatura y humedad en el suelo, los residuos orgánicos son atacados (oxidados) por la flora microbiana y transformados en productos minerales (mineralización), generando reacciones que liberan H^+ que son agentes ácidos (Bernier y Alfaro, 2006), además, el horizonte A son es más ácidos que el horizonte B por su mayor contenido de materia orgánica (Zapata, 2004).

b.2 Lluvia ácida

La lluvia ácida es la combinación de deposición seca y húmeda de la atmósfera que tiene concentraciones más altas de ácidos nítrico (HNO_3), sulfúrico (H_2SO_4) y compuestos acidificantes que ocasiona la disminución del pH del agua (Prakash et al., 2023). Además, las razones para la formación de lluvia ácida, es influenciado por el óxido de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono y ácidos orgánicos en el aire producidos por actividades naturales (Zapata, 2004). Los contaminantes reaccionan en la atmósfera formando lluvia ácida (H_2SO_4 y HNO_3)

(Arévalo et al., 2024), que posteriormente precipita al entrar en contacto con la humedad del suelo y se disocia liberando iones H^+ (Calvert et al., 1985).

La lluvia ácida provoca cambios en el suelo, lo que impide las actividades de los microorganismos del suelo, afectando negativamente la eficiencia de conversión de los nutrientes del suelo como N, P y S (Li et al., 2021), provocando la acidificación y un aumento en el intercambio entre H^+ y los cationes como el Mg, K y Ca en el suelo tienden a lixivarse (van Breemen et al., 1984).

b.3 Absorción de nutrientes

Las plantas cultivadas o malezas causan la acidificación localizada alrededor de las raíces debido a la secreción de exudados (Goulding, 2016), las raíces liberan H^+ cuando absorben Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , lo que también aumenta la acidez (Zapata, 2004). Además, los aniones nitrato, sulfato y cloruro, originados en los fertilizantes orgánicos e inorgánicos, se adhieren a las bases intercambiables presentes en la solución del suelo y los transportan más lejos de las raíces, utilizando el agua como medio de transporte (Sadeghian, 2016).

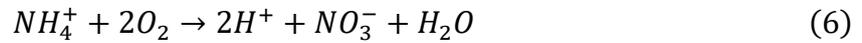
b.4 Efectos de fertilizantes nitrogenados

Según X. Zhang et al. (2020), los fertilizantes nitrogenados generan acidificación en forma directa e indirecta en el suelo, al estimular el crecimiento del cultivo, la absorción de cationes básicos libera cantidades equivalentes de protones a la rizosfera (van Breemen et al., 1983). Los fertilizantes nitrogenados que contienen o forman amonio (NH_4^+), como $(NH_4)_2SO_4$ y NH_4NO_3 , se descomponen cuando se aplican al suelo, liberando amonio (NH_4^+), que se convierte en nitrato (NO_3^-) por oxidación biológica oxidativa, produciendo un exceso H^+ (León et al., 2018).

Por otro lado, Cai et al. (2014) indican que el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, como el sulfato de amonio, el nitrato de amonio y la urea, causan la acidificación del suelo, generando la oxidación de estos fertilizantes y la oxidación del azufre elemental liberado por

los fertilizantes azufrados (Sanchez, 2019). Estas reacciones son representadas mediante las siguientes ecuaciones:

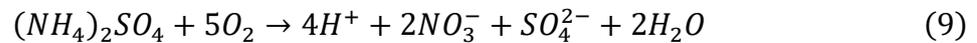
Oxidación del amonio:



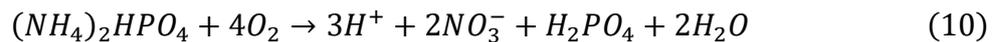
Oxidación de la urea:



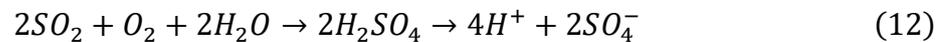
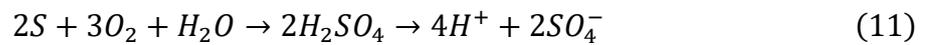
Oxidación del sulfato de amonio:



Oxidación del fosfato diamónico:



Oxidación del azufre elemental:



Para Tkaczyk et al. (2020), los principales mecanismos de acidificación del suelo por fertilizantes nitrogenados están relacionados con:

- El desplazamiento de iones ácidos y cationes básicos del complejo de sorción, lo que conduce a un aumento de la acidez activa y la lixiviación de cationes básicos con aniones acompañantes, respectivamente.
- La absorción por plantas y/o microorganismos del NH_4^+ y la secreción de H^+ (acidez fisiológica), $NH_4^+ + ROH \rightarrow RNH_2 + H_2O + H^+$.
- La nitrificación de NH_4 , $NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O$.
- La volatilización del amoniaco, $NH_4^+ \leftrightarrow NH_3 + H^+$.

E. Acidificación del suelo

La acidificación del suelo es un proceso complejo y existen varias causas de acidez del suelo, se puede considerar como la suma de procesos naturales y antropogénicos que disminuyen el pH de la solución del suelo (Krug y Frink, 1983); por lo tanto, los iones de hidrógeno (H^+) se liberan del suelo durante el ciclo del carbono (C), nitrógeno (N) y azufre (S), provocando que los cationes básicos sean desplazados y lixiviados (Enesi et al., 2023). La acidificación del suelo se produce debido a la lixiviación de cationes básicos provocada por el ácido carbónico, la erosión de los materiales parentales ácidos, la descomposición de la materia orgánica y la deposición de gases atmosféricos como SO_2 , NH_3 , HNO_3 y HCl (Rahman et al., 2018).

Esta acidificación promueve la toxicidad de elementos como el aluminio (Al), el manganeso (Mn) y el hierro (Fe), la cual afecta la disponibilidad de micronutrientes esenciales como el calcio (Ca), el magnesio (Mg), el potasio (K), el molibdeno (Mo) y el fósforo (P) para el crecimiento de las plantas (Wang et al., 2021), esta acidificación puede causar la disolución irreversible de minerales arcillosos y una reducción de la capacidad de intercambio catiónico, acompañada de un deterioro estructural (Goulding, 2016). Por su parte, Zapata (2004) indica que, desde la parte química, la acidificación de los suelos resulta de la disminución de la capacidad neutralizante de acidez del suelo (CNAS), como consecuencia de una transferencia irreversible en un sistema abierto de protones desde la fase líquida hacia la fase sólida, que actúa como sumidero.

F. Razones de la baja fertilidad de los suelos ácidos

a. Toxicidad del aluminio, hidrogeno y manganeso

La presencia de aluminio tóxico en suelos ácidos representa uno de los principales obstáculos para el crecimiento de las raíces (Alleoni et al., 2010), por consecuencia el movimiento de nutrientes hacia la parte aérea de las plantas, lo que resulta en deficiencias

nutricionales, especialmente de fósforo, calcio y magnesio (Zapata, 2004). Cuando el aluminio se acumula en suelo, puede afectar negativamente el crecimiento de las plantas, se estiman que en más de 1 mg l^{-1} de Al^{+3} en el suelo son considerados como tóxico, probando la interrupción en la división celular, reduciendo el crecimiento de las raíces (Molina y Alvarado, 2012).

Por su parte, el rol del manganeso como inhibidor del crecimiento es más complejo que el de aluminio y está menos estudiado. Las monocotiledóneas son generalmente más tolerantes que las dicotiledóneas altas concentraciones de hidrógeno y bajas de calcio (Taboada y Lavado, 2009). Los efectos del ion hidrógeno sobre el crecimiento vegetal son de menor magnitud que los productos por el aluminio o el manganeso; sin embargo, sus efectos pueden ser confundidos y a que al descender el pH del suelo las concentraciones de manganeso y aluminio tienden a incrementarse (Zapata, 2004).

G. Criterios para diagnosticar problemas de acidez

El análisis de suelos es una de las herramientas más útiles para el diagnóstico de la fertilidad de los suelos (Gómez, 2005). En el caso de la acidez, mediante este procedimiento es posible detectar su presencia y generar una recomendación para solventar adecuadamente el problema (Molina y Alvarado, 2012).

H. Corrección de la acidez del suelo

Dependiendo del tipo de suelo, se practican varios enfoques para controlar la acidez del suelo. La mejora de la eficiencia del uso de nutrientes, el encalado, el uso de materiales orgánicos, el biocarbón, las rotaciones adecuadas de cultivos y la adopción de cultivares resistentes a la toxicidad del Al y el Mn son métodos importantes que se adoptan habitualmente para controlar la acidificación del suelo (Tusar et al., 2023).

2.2.2 Encalado

La cal fue utilizada por los romanos hace 2000 años para compensar la acidez en las tierras agrícolas y su uso se ha practicado durante siglos (Goulding, 2016), es una práctica que

eleva el pH, neutraliza el Al^{3+} , Mn^{2+} y la acidez intercambiable, a su vez proporciona Ca^{2+} y Mg^{2+} , aumentando la disponibilidad de fósforo, estimulando el crecimiento radical de las plantas el agua y de los nutrientes (Sadeghian y Díaz, 2020). El encalado mejora los problemas de acidez en los suelos con pH bajo, logrando neutralizar la acidez provocada por el aluminio e hidrógeno que se encuentran en el suelo; a través de esta práctica se logrará la estimulación del crecimiento de las plantas al disminuir la toxicidad del aluminio, incrementando los nutrientes disponibles como el calcio, fósforo, nitrógeno y el molibdeno. El encalado de suelos ácidos mejora la cantidad de bases cambiables, en especial Ca y Mg, y reduce el exceso de acidez por Al (Salas et al., 2002). También, investigaciones previas han comprobado que la cal es efectiva para tratar la contaminación por cadmio (Cd) en suelos contaminados con este elemento. Asimismo, se observó que la aplicación de cal en los pastizales de los sistemas de pastoreo de ganado contribuyó a mejorar la eficiencia en la utilización de nutrientes (Enesi et al., 2023).

El encalado es una de las técnicas tradicionales más populares de manejo de la acidez del suelo, los impactos son positivos cuando se aplica enmiendas calcáreas, logrado aumentar el pH del suelo, ya que la estas enmiendas proporciona cationes básicos como Ca y Mg, por lo que se reduce la toxicidad del Al (Behera y Shukla, 2014), mejorando el crecimiento de las raíces de las plantas permitiéndoles profundizar más en el perfil del suelo en busca de agua y nutrientes (Molina, 2014); además, el encalado tiene el beneficio de mejorar la estructura del suelo y fortalecer los enlaces entre la arcilla y la materia orgánica, aumentando la eficiencia de la protección fisicoquímica del carbono orgánico del suelo, al reducir las tasas de mineralización y la respiración microbiana (Wang et al., 2021).

Por su parte, Calva y Espinosa (2017) mencionan que el éxito del encalado radica en determinar la dosis adecuada y el método de aplicación para obtener mejores resultados, al reducir la toxicidad del aluminio y del manganeso; así como, al incrementar la disponibilidad

de nutrientes como el calcio, nitrógeno, fósforo y molibdeno, favoreciendo el crecimiento de las plantas.

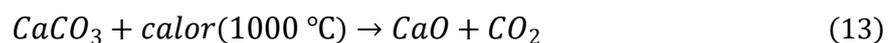
A. Tipos de encalante

Los materiales que se utilizan como correctivos de acidez son principalmente carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio y/o magnesio. Estos materiales presentan una variable capacidad de neutralización (Espinosa y Molina, 1999).

a. Óxido de calcio (CaO)

Se define como polvo de color gris blanquecino derivado de la calcinación de la piedra caliza, bastante insoluble se utiliza en suelos ácidos, por lo que debe ser finamente molido para aumentar su eficiencia agronómica y en su forma pura contiene 71% de Ca (Molina y Alvarado, 2012), por lo que se tiene que tener cuidado al manipularlo ya que puede quemar la piel (Toledo, 2016); además, debido a sus características es difícil y desagradable de manejar y tiene que ser homogeneizada con el suelo inmediatamente (Arévalo et al., 2024).

Según Espinosa y Molina (1999), el óxido de calcio, también conocido como cal viva o cal quemada, se fabrica calcinado al horno piedra caliza lo que produce la siguiente reacción:



b. Hidróxido de calcio [Ca(OH)₂]

También llamado cal hidratada o cal apagada, se obtiene por la hidratación de la cal viva (Toledo, 2016), cuando se aplica al suelo tiene un efecto entre el óxido de calcio y el carbonato de calcio para neutralizar la acidez y el contenido de Ca del Ca(OH)₂ puro es de 56% (Arévalo et al., 2024).

Según Espinosa y Molina (1999), el hidróxido de calcio Ca(OH)₂ se obtiene a partir de la reacción del óxido de calcio con agua de acuerdo con la siguiente reacción:



c. Carbonato de calcio (CaCO_3)

Es el material más utilizado para encalar los suelos ácidos, principalmente contiene carbonato de calcio (CaCO_3) (Bernier y Alfaro, 2006), se obtiene a partir de roca caliza y roca calcárea o calcita que se muele y luego se cierne en mallas de diferente tamaño, en su forma pura contiene 40% de Ca (Espinosa y Molina, 1999). Por otro lado, Toledo (2016) indica que este material contiene entre un 24% y un 38% de óxido de calcio, que se obtiene de rocas calizas, entre un 60% y un 96%.

d. Dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$)

Hay dos vertientes principales de la dolomita: la dolomita como aditivo para el suelo y la dolomita como material base para fertilizantes de calcio y magnesio que debe tener al menos un 90% de Ca_2MgCO_3 y un contenido de sílice no superior al 5% (Reina y Martínez, 2008). Mientas que, para el suelo el material contiene alrededor de 21% de calcio y 13% de magnesio, la velocidad de reacción es menor que el carbonato de calcio, pero tiene la ventaja que tiene magnesio (Toledo, 2016).

Por su parte, Espinosa y Molina (1999) indican que al igual que otros materiales de encalado, la calidad de la dolomita depende del contenido de impurezas como arcillas y material orgánico.

Tabla 2

Clasificación de material encalante que contienen magnesio

Tipo de cal	Mg	MgO	MgCO ₃
	%		
Calcítica	< 3	< 5	< 10
Magnesiana	3 – 7	5 – 12	10 – 25
Dolomítica	> 7	> 12	> 25

Fuente: Espinosa y Molina (1999).

e. Óxido de magnesio (MgO)

Según Espinosa y Molina (1999), la capacidad del óxido de magnesio para 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. Además, Toledo (2016) indica que el magnesio (60%) es el único material que se obtiene de la roca magnética, es bueno como enmienda para mejorar suelos ácidos ya que tiene la capacidad de neutralizar altos niveles de acidez.

f. Magnesita

Es un mineral en base a carbonato de magnesio ($MgCO_3$), que en su forma pura contiene aproximadamente un 28% de Mg (Bernier y Alfaro, 2006), cuya composición es principalmente $MgCO_3$, contiene impurezas de Fe, Co, Mn y Ni (Arévalo et al., 2024).

g. 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 (Espinosa y Molina, 1999).

h. Escorias industriales

Son residuos de la industria del acero (escorias básicas) y la fundición del hierro (escorias Thomas). Los dos contienen silicatos de calcio ($CaSiO_3$) y silicatos de magnesio ($MgSiO_3$) y neutralizan la acidez del suelo a través de la hidrólisis del ion silicato (Espinosa y Molina, 1999).

B. Calidad de los materiales de encalado

Los materiales que se ofrecen para ser utilizados como neutralizadores de la acidez del suelo presentan diferentes características y calidad lo que hace variar su eficiencia agronómica (Bernier y Alfaro, 2006). Para Espinosa y Molina (1999), la calidad se fundamenta en los siguientes factores: pureza del material o composición química, tamaño de las partículas y

poder relativo de neutralización total. Según Molina (2014), la composición química del material indica la cantidad de acidez que puede neutralizar, para lo cual se utiliza el carbonato de calcio como estándar, con un valor de neutralización de 100%; además, la reactividad se refiere a la capacidad del material para neutralizar la acidez del suelo y varía de acuerdo con la composición química y el tamaño de partículas del producto.

a. Pureza química

La capacidad de neutralizar la acidez del suelo del material encalante depende de la composición química y de la pureza del material que es una importante característica (Arévalo et al., 2024). Para determinar la pureza se utiliza el criterio del equivalente químico (EQ) que es una medida del poder de neutralización de una cal (Espinosa y Molina, 1999). Por su parte, Bernier y Alfaro (2006) señalan que la pureza de la enmienda se expresa como equivalente químico (EQ) o valor neutralizante (VN), que es una medida de la neutralización de la cal en particular.

Tabla 3

Valores de poder de neutralización de varios materiales de encalado en su forma pura

Material	Equivalente Químico (EQ)	Fórmula	Contenido de Ca (%)	Contenido de Mg (%)
Carbonato de calcio	100	CaCO ₃	40	
Dolomita	108	CaCO ₃ ·MgCO ₃	21.6	13
Óxido de calcio	179	CaO	71	
Hidróxido de calcio	138	Ca(OH) ₂	54	
Hidróxido de magnesio	172	Mg(OH) ₂		41
Carbonato de magnesio	119	MgCO ₃		28.5
Óxido de magnesio	248	MgO		60
Silicato de calcio	86	CaSiO ₃	34	
Silicato de magnesio	100	MgSiO ₃		24

Fuente: Espinosa y Molina (1999).

b. Tamaño de las partículas

El tamaño de las partículas de la cal determina su velocidad de reacción ya que conforme se reduce su tamaño, aumenta su área o superficie de contacto (Arévalo et al., 2024). Un m³ de cal sólida sólo tiene 6 m² de superficie; mientras que, esa misma cantidad molida y colocada a través de un tamiz de malla 100, tiene 60000 m² de área superficial (Molina y Alvarado, 2012); por lo tanto, entre más superficie específica presente una enmienda, con mayor rapidez reacciona al contacto con el suelo; además, para estimar la fineza o eficiencia granulométrica (EG) de un material de encalado, se pesa una cantidad determinada del material y se cierne en una secuencia de mallas o cribas de diferente tamaño. Cada tamaño en particular tiene una específica eficiencia granulométrica como se indica en la Tabla 4 (Bernier y Alfaro, 2006).

Tabla 4

Eficiencia relativa granulométrica de la cal con base en el tipo de malla

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
20 – 60	0.85 – 0.25	60
> 60	< 0.25	100

Nota. * Número de orificios por pulgada cuadrada. Fuente: Bernier y Alfaro (2006).

Los materiales que son retenidos en malla de 8 no son efectivos. Los que pasan la malla 8 pero se retienen en malla 20 son 20% efectivos ya que reaccionan muy lentamente. Los que pasan la malla 20 pero se retienen en la 60 son 60% efectivos y pueden reaccionar en un período de 10-18 meses. Por último, todos los materiales que pasan completamente la malla 60 tienen 100% de efectividad y reaccionan entre 3 y 6 meses (Espinosa y Molina, 1999).

c. Poder relativo de la neutralización total

Este parámetro se utiliza para evaluar las enmiendas calcáreas considerando en forma conjunta su pureza química, la finura del material y su contenido de humedad (Arévalo et al., 2024). El valor del PRNT, cuanto mayor sea, indica que la enmienda es más reactiva (Espinosa y Molina, 1999). Las enmiendas calcáreas presentan variaciones importantes en el tamaño de partículas, algunas de ellas con valores inferiores a 60% de eficiencia granulométrica, debido a un deficiente proceso de molienda y la falta de control de calidad (Bernier y Alfaro, 2006), calculado según la Ecuación 15:

$$PRNT = \frac{VN * ER}{100} * \frac{100 - \%H}{100} \quad (15)$$

Donde:

PRNT: poder relativo de la neutralización, %,

VN : valor neutralizante o equivalente químico, %,

ER : eficiencia relativa de granulometría, %,

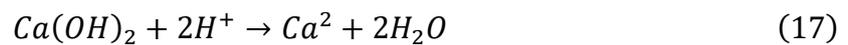
H : contenido de humedad del material, %.

C. Reacción de la cal en el suelo

El efecto final de las reacciones de la cal reduce la acidez del suelo (incrementa el pH) al convertir el exceso de H^+ en H_2O (M. Vázquez y Pagani, 2018). El incremento de pH permite la precipitación del Al^{3+} como $Al(OH)_3$, que es un compuesto insoluble, eliminando de esta forma el efecto tóxico del Al^{3+} en las plantas y la principal fuente de iones H^+ (Arévalo et al., 2024). De igual manera, las aplicaciones de cal también precipitan el manganeso (Mn) y el hierro (Fe) que en ocasiones se encuentran en exceso en suelos ácidos (Bernier y Alfaro, 2006).

Por su parte, Toledo (2016) menciona que el encalado permite elevar el pH del suelo debido a que el calcio, presente en la cal, desplaza el aluminio e hidrógeno presentes en los coloides, los que, una vez desplazados a la solución del suelo, reaccionan con el carbonato para formar compuestos lixiviables y no dañinos a las plantas. El encalado permite la neutralización

de los iones H^+ en la solución del suelo por medio de los iones OH^- producidos al entrar la cal en contacto con el agua del suelo, transformándose en hidróxidos y neutralizan la acidez a través de su OH^- que es una base fuerte, por lo que son más efectivos a corto plazo (Espinosa y Molina, 1999). Según M. Vázquez y Pagani (2018), las enmiendas calcáreas reaccionan de la siguiente manera:



D. Época y método de la aplicación de la cal

Las reacciones de neutralización de la cal ocurren en presencia de agua, por lo que se debe aplicar la cal en un suelo húmedo (Arévalo et al., 2024). Si no existe humedad en el suelo las reacciones de neutralización no se producen (Bernier y Alfaro, 2006). Además, para que la cal sea efectiva es necesario mezclar completamente el material en los primeros 15-20 cm de suelo, utilizando el arado, rastra o cualquier otro implemento (Toledo, 2016). De esta forma se logra mezclar el material con la capa del suelo donde se concentran las raíces activas de la mayoría de los cultivos, pero en pastos y cultivos perennes, la incorporación completa solamente se puede hacer al inicio del cultivo, si el cultivo está establecido se aplica cal a la superficie (Espinosa y Molina, 1999).

E. Beneficios de la cal

El mayor efecto benéfico del encalado de suelos ácidos es la reducción en la solubilidad del Al y Mn, el exceso de estos elementos interfiere la división celular en las raíces de la planta y esta es la razón por la cual el sistema radicular de plantas creciendo en suelos ácidos es atrofiado (Espinosa y Molina, 1999). El encalado permite un mayor crecimiento de las leguminosas debido a que éstas pueden fijar una cantidad mayor de N, porque presentan condiciones para el desarrollo población microbiana (Arévalo et al., 2024). Además, Bernier y

Alfaro (2006) indican que tiene un efecto positivo en la estructura del suelo debido a la acción floclante de la cal y a la acción floclante y cementante de los óxidos e hidróxidos de Fe y Al formados como producto de la adición de la cal. Por su parte, M. Vázquez y Pagani (2018) mencionan que el encalado mejora la respuesta a la aplicación de fertilizantes en suelos ácidos, se debe fundamentalmente a las mejores condiciones físicas y químicas que el suelo adquiere después de la aplicación de la cal, produciendo un mejor ambiente para el desarrollo radicular.

F. Problemas de sobreencalado

El sobreencalado a valores de pH cercanos a 7.0 puede deprimir seriamente el rendimiento al causar deterioro de la estructura e inducir deficiencias de Zn, B, y Mn (Espinosa y Molina, 1999). El uso de cantidades excesivas de cal puede dispersar los coloides al afectar la agregación de las partículas del suelo debido a que produce cambios en la superficie de los coloides que llevan a que dominen las fuerzas de repulsión entre partículas (Toledo, 2016), esto altera las condiciones físicas del suelo haciendo que aparezcan costras en la superficie, que se taponen los poros del suelo y que exista una muy lenta infiltración (Roth et al., 1986).

Además, se afecta a la estructura, ya que, al subir el pH, el Fe se transforma, y su efecto agregante disminuye; por lo tanto, se forman agregados más pequeños, que reducen las tasas de infiltración y pueden favorecer la erosión. Esto también puede deberse a un aumento de la actividad microbiana que degrada los agentes cementantes de tipo orgánico (Molina y Alvarado, 2012).

2.3 Definición de términos

Acidez del suelo: Se refiere a aquellos suelos que tienen un pH inferior a 5.5 durante la mayor parte del año. Está asociado con toxicidad de aluminio y deficiencia de molibdeno y otras condiciones limitantes de las plantas (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], s. f.).

Acidez intercambiable: La acidez intercambiable en los suelos es el resultado de la presencia de hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{+3}) que causan una disminución en el pH. La acidez intercambiable está formada por iones H^+ , Al^{+3} , $Al(OH)^{+2}$ y $Al(OH)_2^+$, que son retenidos por las fuerzas electrostáticas del coloide y pueden ser absorbidos por los complejos de transición y las sales inorgánicas (Zapata, 2004).

Acidificación del suelo: Es un proceso dinámico que engloba la acción de factores naturales (edáficos, climáticos y biológicos) y antropogénicos (derivados de la acción del hombre). Este proceso puede ser acelerado con la práctica de la agricultura, por la producción de cultivos intensivos y las prácticas de manejo del suelo (Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura [Intagri], s. f.).

Cal: Es el producto resultante de la descomposición por el calor de las rocas calizas, que son carbonatos cálcicos o carbonatos de calcio. La piedra caliza es una roca sedimentaria abundante y natural que consiste en altos niveles de carbonato de calcio y/o magnesio, y/o dolomita (carbonato de calcio y magnesio), junto con pequeñas cantidades de otros minerales (Maldonado, 2021).

Hidróxido de calcio: También llamada cal apagada, se produce por la reacción del óxido de calcio con el agua. Un polvo blanco, corrosivo y difícil de manipular. Este tipo de cal neutraliza rápidamente el ácido al entrar en contacto con el suelo. En su forma pura contiene un 56% de Ca (Guerrero, 2007).

pH: Es una propiedad química que mide el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosas. Por definición se considera que el pH es el logaritmo negativo de la actividad de los protones (H^+) en una solución acuosa (Osorio, 2012).

Suelo: Es la capa superficial de la tierra y constituye el medio en el cual crecen las plantas. Es capaz de proporcionar nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y almacenar agua

de lluvia y dárselas cuando la necesiten (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], 2015).

Toxicidad por aluminio: El aluminio (Al) es el metal más abundante en la corteza terrestre, lo que constituye aproximadamente el 7% de la tierra. El aluminio está presente en el suelo en diferentes formas, con un rango de solubilidad diferencial que va desde las formas precipitadas hasta las especies monoméricas solubles $[Al(H_2O)_6^{3+}, Al(OH)_2^+, Al(OH)^{2+}, Al(OH)_4^-]$ (Roselló, 2016).

CAPÍTULO III

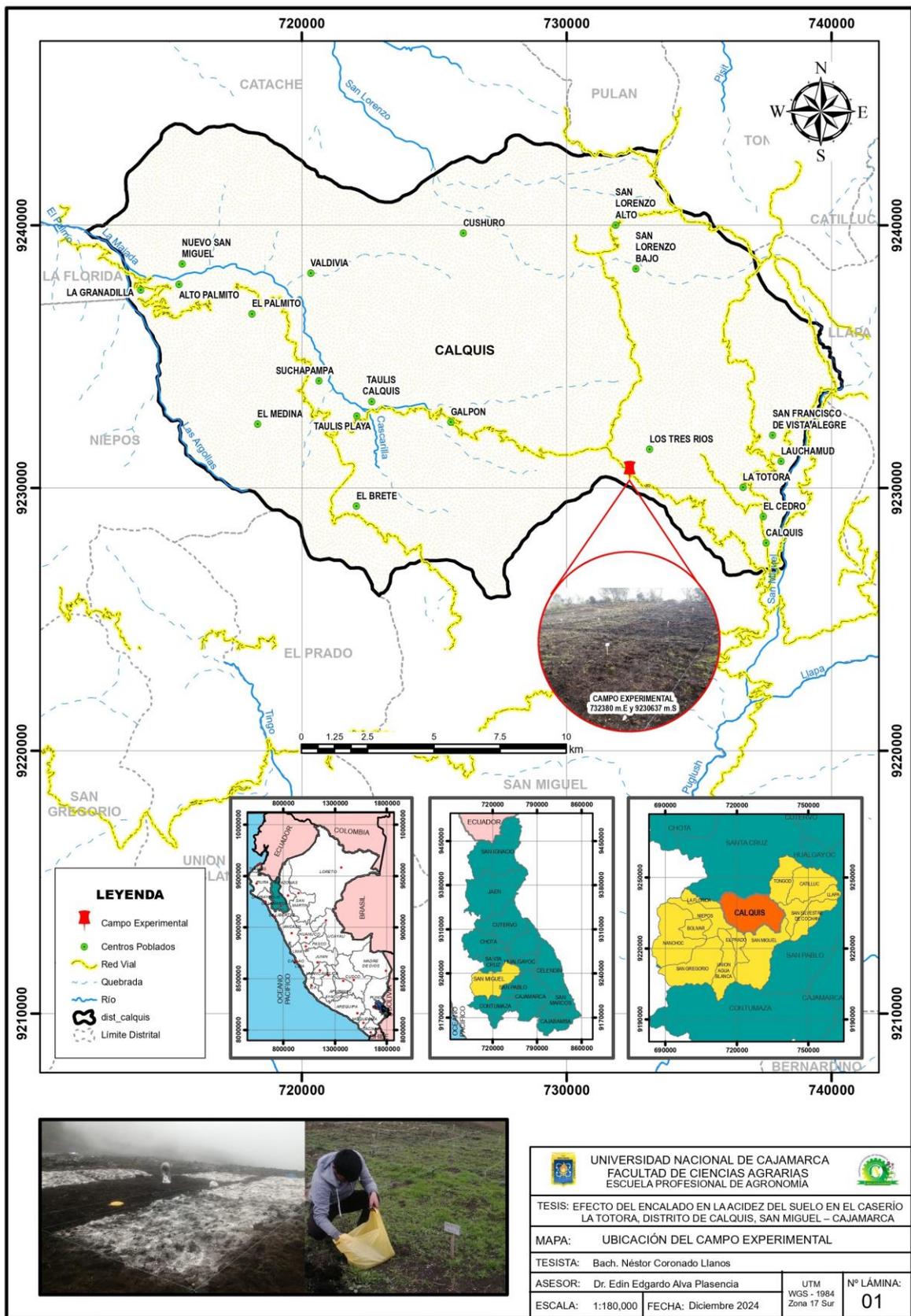
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación

Esta investigación se realizó en el caserío La Totorá ubicado en el predio del señor Elar Rodas Quiroz, perteneciente al distrito de Calquis, provincia de San Miguel y departamento de Cajamarca, con coordenadas UTM 732380 m E y 9230637 m S, a una altitud de 3515 m s. n. m. Presenta una temperatura media anual de 15.32 °C, una precipitación pluvial media anual de 1000 a 1200 mm, una humedad relativa media anual de 90% y un viento medio anual de 3.13 m s⁻¹ (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2024).

Figura 1

Ubicación de la zona de estudio en el caserío La Totorá, San Miguel – Cajamarca.

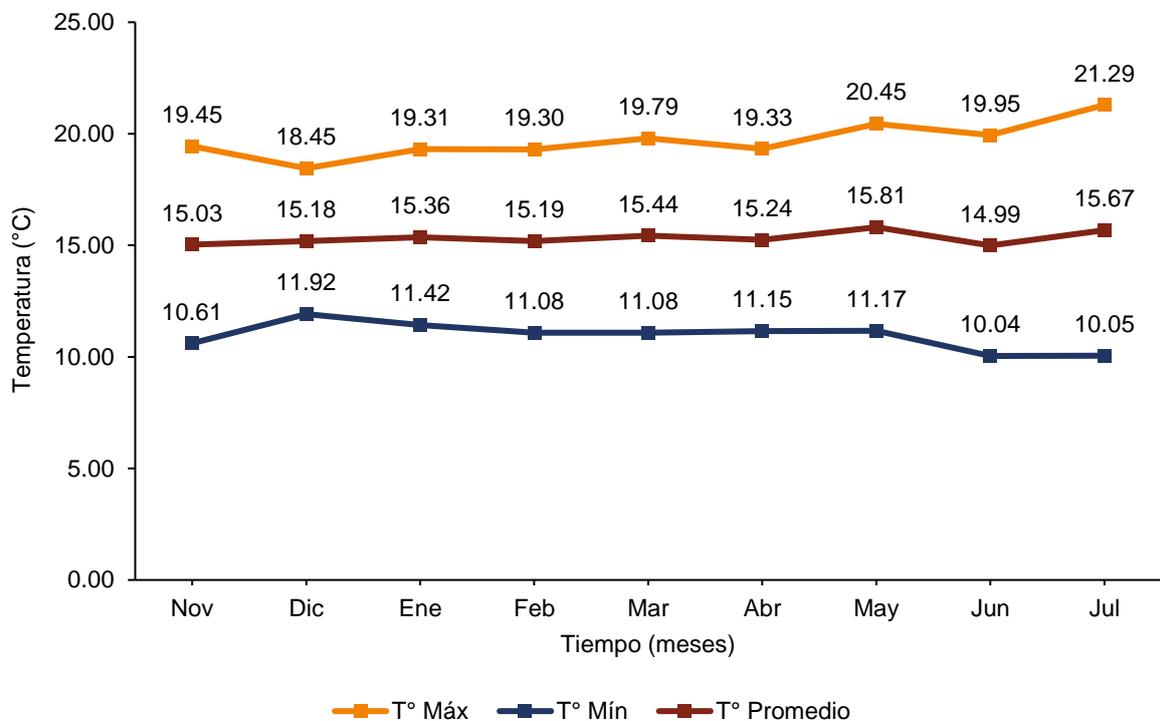


3.1.1 Condiciones climáticas de la zona de estudio

En la Figura 2, se observa que la temperatura máxima más elevada se registró en julio con 21.29 °C; mientras que, la mínima más baja ocurrió en junio con 10.04 °C. La temperatura promedio más alta alcanzó en el mes de mayo con 15.81 °C, la más baja se registró en el mes de junio con 14.99 °C, indicando un aumento de las temperaturas hacia los meses de invierno.

Figura 2

Registro de temperaturas medias mensuales durante el periodo de la investigación (noviembre 2023 – julio 2024).

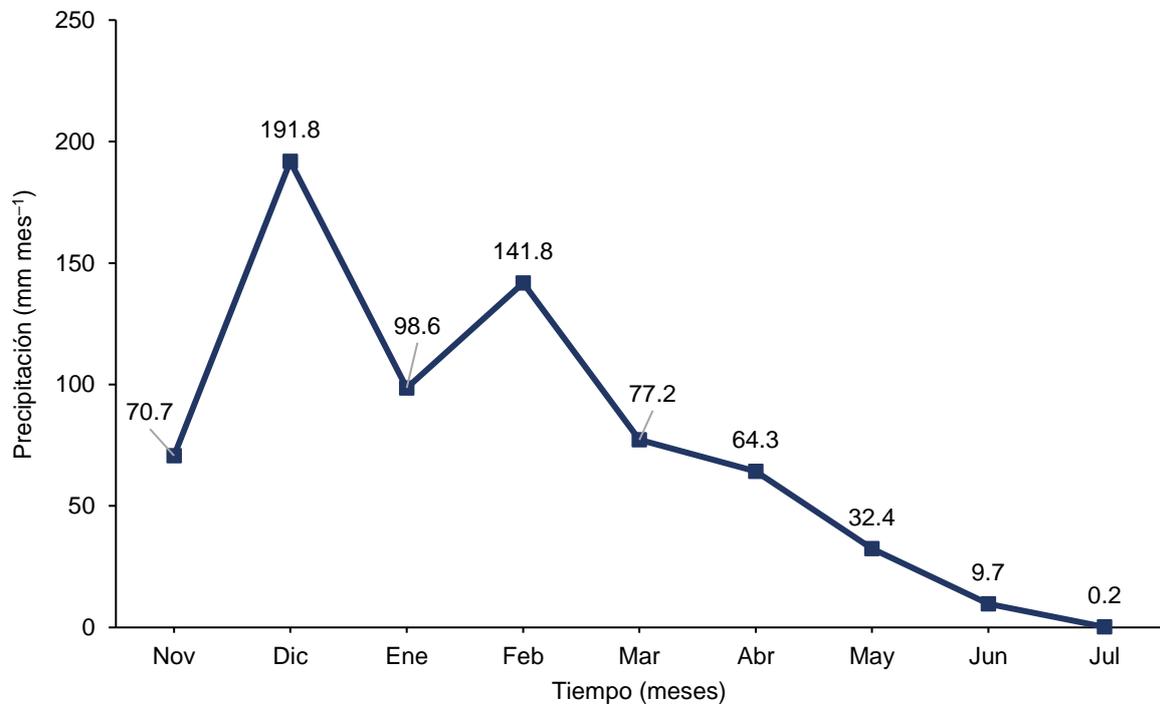


Fuente: SENAMHI (2024).

En la Figura 3, se observa que el mes de diciembre registra la mayor cantidad de lluvia con 191.8 mm, siendo el pico más alto de precipitación; mientras que, el mes de julio muestra el valor más bajo, con solo 2 mm. Los meses de febrero y enero registran también precipitaciones pronunciadas con 141.8 y 98.6 mm, respectivamente. A partir del mes de marzo hasta junio la precipitación disminuye progresivamente, indicando el término de la temporada de lluvias a la estación seca.

Figura 3

Registro de la precipitación medias mensuales durante el periodo de la investigación (noviembre 2023 – julio 2024).



Fuente: SENAMHI (2024).

3.2 Materiales

3.2.1 Materiales de campo

- Barreno
- Bolsas Ziploc
- Libreta de campo
- Wincha
- Zapapico
- Estacas
- Rafia
- Letreros
- Baldes

3.2.2 *Materiales de laboratorio*

- Tamizadores
- Balanza
- Mandil
- Guantes
- Mascarilla

3.2.3 *Materiales de escritorio*

- Hojas bond A4
- Lapicero
- Impresora
- Cinta masking
- Tijeras
- Laptop

3.2.4 *Equipos*

- GPS
- Cámara fotográfica profesional

3.2.5 *Insumos*

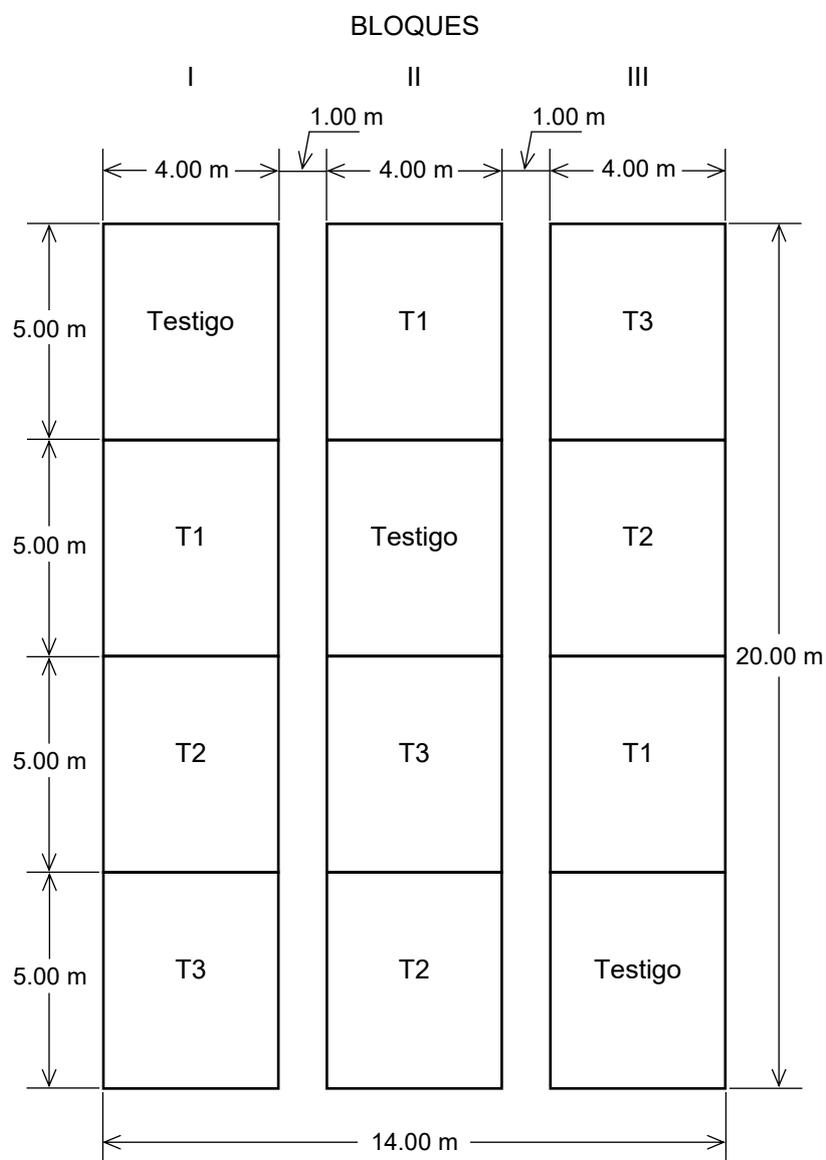
- Cal (hidróxido de calcio)

3.3 *Diseño experimental, arreglos de los tratamientos*

Para esta investigación se utilizó el Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA), con 4 tratamientos y 3 repeticiones con un total de 12 unidades experimentales.

Figura 4

Distribución de tratamientos en el campo experimental.



3.4 Niveles y tratamientos de estudio

Tabla 5

Niveles y tratamientos de estudio

Tratamientos	Niveles	Código
Sin aplicación	Testigo	T0
2 t ha ⁻¹ de cal	Baja	T1
4 t ha ⁻¹ de cal	Media	T2
6 t ha ⁻¹ de cal	Alta	T3

3.5 Metodología

3.5.1 Procedimiento

A. Muestreo y análisis de suelos

El experimento se inició con el reconocimiento del predio, para realizar el muestreo del suelo, se utilizó un barreno, que permitió extraer submuestras en forma de zigzag a lo largo de toda la parcela. Las submuestras se mezclaron para obtener una muestra homogénea, de la cual se extrajo una muestra representativa de 1 kg. Esta muestra se colocó en una bolsa hermética, identificada correctamente, y se envió al Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Tabla 6

Análisis de suelo del campo experimental

Análisis Mecánico				pH	Al	H	Al + H
A (%)	L (%)	Ar (%)	Clase textural	1:1	Cmol (+) kg ⁻¹		
41.52	15.76	42.72	Franco	4.34	3.167	2.690	5.857

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (2023).

De acuerdo con el Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (2023), el suelo evaluado presenta un pH clasificado como extremadamente ácido, lo que genera condiciones desfavorables para el desarrollo de los cultivos. Además, el contenido de aluminio supera 1 Cmol (+) kg⁻¹, lo cual es considerado tóxico para las plantas, afectando tanto su crecimiento como su capacidad de absorber nutrientes esenciales. Esta toxicidad se agrava por los elevados niveles de hidrógeno y acidez intercambiable, los cuales indican una fuerte presencia de acidez en el suelo. Estos factores limitan la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes esenciales como el calcio y el magnesio.

B. Granulometría del material encalante

Para determinar el tamaño de las partículas del hidróxido de calcio, se tomó una muestra de 1 kg de cal, la cual fue llevado al Laboratorio de Química y Fertilidad de Suelos de la Universidad Nacional de Cajamarca para su respectivo análisis. El material fue tamizado utilizando mallas de > 2, 1, 0.5, 0.3 y < 0.3 mm, los resultados se detallan en la Tabla 7:

Tabla 7

Eficiencia relativa granulométrica de la cal

Tamaño de orificios (mm)	Eficiencia relativa (%)	Peso de la cal (g)
>2	0	260.21
2 – 1	20	447.69
2 – 0.5	40	113.70
2 – 0.3	60	98.60
< 0.3	100	79.80

Los resultados mostraron que las partículas retenidas en el tamiz de 2 mm no son efectivas (Tabla 7). Las partículas que pasaron por el tamiz de 2 mm, pero quedaron retenidas en el de 1 mm tienen una efectividad del 20%. Aquellas que atravesaron el tamiz de 1 mm y se retuvieron en el de 0.5 mm son efectivas en un 40%. Las partículas que pasaron el tamiz de 0.5 mm y se retuvieron en el de 0.3 mm presentan una efectividad del 60%, mientras que las que pasaron por el tamiz de 0.3 mm son 100% efectivas.

Según la eficiencia relativa, el 73.98 % reaccionó en el suelo a través del tiempo y el 26.02% son partículas que no reaccionaron.

C. Preparación del suelo

La preparación de la parcela experimental se llevó a cabo utilizando un tractor, inicialmente se pasó el arado para romper el suelo en capas profundas, seguido la rastra para desmenuzar los terrones grandes. Luego, se procedió a la nivelación del terreno, empleando un

zapapico, lo que permitió deshacer algunos terrones que persistían en el suelo y asegurar una superficie uniforme, lo que permitió optimizar la distribución de los tratamientos.

D. Delimitación y trazado de parcelas

Para la instalación del experimento, se utilizó una wincha para medir toda el área experimental, así como los espacios entre bloques. Estos fueron delimitados mediante estacas y rafia para una correcta identificación y separación. Además, se colocaron letreros en cada tratamiento, siguiendo la distribución en el croquis. La investigación constó de 280 m², la cual se dividió en 3 bloques, cada uno con 4 tratamientos de 20 m² (4 m x 5 m). Se dejaron calles de 1 m de ancho entre los bloques para permitir un acceso durante la ejecución y evaluación del experimento.

E. Encalado en el área experimental

Aplicación de cal se llevó a cabo después de la delimitación del área experimental, y consistió en lo siguiente: Tratamiento 0: Control, Tratamiento 1: 2 t ha⁻¹, Tratamiento 2: 4 t ha⁻¹, Tratamiento 3: 6 t ha⁻¹. Para medir las dosis de cal, se utilizó una balanza y se procedió colocar en bolsas de plástico, según las cantidades correspondientes. Luego, la cal fue esparcida uniformemente en el suelo de cada parcela dentro de los tres bloques correspondientes a cada tratamiento, se procedió a mezclar la tierra para asegurar que la cal se integre adecuadamente con el suelo. La evaluación posterior a la aplicación de la cal se realizó a los 2, 4, 6 y 8 meses, permitiendo que la cal se disolviera con las lluvias y reaccionara con las partículas del suelo, favoreciendo así su modificación de la acidez evaluada.

F. Variables evaluadas

La evaluación del suelo se llevó a cabo cada 60 días durante un período de 8 meses. Para el muestreo, se utilizó un barreno que permitió extraer muestras de suelo de cada tratamiento (12 unidades experimentales). Estas muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Pastos y Forrajes de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Pecuarias, donde fueron colocadas

en bolsas Ziploc debidamente etiquetadas para evitar cualquier confusión durante el análisis. Finalmente, se envió al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva – Tingo María, donde se llevó a cabo el análisis del pH, contenido de aluminio, hidrógeno y acidez intercambiable.

Tabla 8

Métodos utilizados en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

Variables	Método de análisis
pH	Método del potenciómetro, relación suelo – agua 1:1
Aluminio	Método de Yuan
Hidrógeno	Método de Yuan
Acidez intercambiable	Método de Yuan

G. Análisis estadístico y prueba de significancia

Para el procesamiento de la información, se utilizó el software estadístico InfoStat. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para detectar diferencias significativas entre los tratamientos en las cuatro variables evaluadas. Además, la comparación de medias entre los tratamientos se realizó utilizando la prueba de Tukey. Considerando el siguiente modelo estadístico lineal (Vásquez, 2014).

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (19)$$

Donde:

Y_{ij} : acidez en el suelo en el tratamiento i y está en el bloque j ,

μ : efecto medio de la muestra,

τ_i : efecto del i -ésimo tratamiento (testigo, 2 t ha⁻¹ Cal, 4 t ha⁻¹ Cal y 6 t ha⁻¹ Cal),

β_j : efecto del j -ésimo bloque,

ε_{ij} : efecto del error experimental.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 pH en el suelo

En la Tabla 9, se observa los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para el pH del suelo, en función a los bloques se obtuvo un p-valor de 0.8762, lo cual es mayor al 5%. Este resultado indica que no existe diferencias significativas entre los bloques respecto al pH obtenido. Por otro lado, para los tratamientos el p-valor es menor al 5% (p-valor = 0.0001), lo que indica diferencia significativa en el pH del suelo entre los diferentes tratamientos; por lo tanto, la aplicación de cal en las dosis evaluadas altera la acidez del suelo, en este sentido al menos uno de los tratamientos es diferente de los demás en términos de su efecto sobre el pH en el suelo.

El coeficiente de variación es de 0.817%; es decir, que la variabilidad de los resultados del pH en el suelo en las diferentes repeticiones de cada tratamiento es baja. Además, indica que el diseño empleado en el experimento presentó un buen control sobre la variabilidad del pH.

Tabla 9

Análisis de varianza (ANOVA) para el pH en el suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloques	0.0004	2	0.0002	0.1351	0.8762
Tratamientos	2.1350	3	0.7117	461.6270	<0.0001
Error	0.0093	6	0.0015		
Total	2.1447	11			

CV = 0.817 %

Al realizar la prueba de Tukey al 5% de probabilidad (Tabla 10 y Figura 5), se observa que el tratamiento con 6 t ha⁻¹, alcanzó un valor de 5.61 y se agrupó en la categoría A, indicando que este tratamiento produjo un mayor aumento en el pH en comparación con los otros tratamientos y el testigo, demostrando que la aplicación de 6 t ha⁻¹ de cal es la más efectiva en elevar el pH del suelo. Para el tratamiento con 4 t ha⁻¹, obtuvo un valor de 4.91 y se agrupó en la categoría B. Esto indica que, aunque el incremento en el pH es significativo en comparación con el testigo, este tratamiento no es tan efectivo como el de 6 t ha⁻¹.

El tratamiento con 2 t ha⁻¹, alcanzó un pH promedio de 4.52, clasificándose en la categoría C, indicando un incremento en el pH en comparación con el testigo, pero menor efecto en la neutralización de la acidez del suelo en comparación con 4 y 6 t ha⁻¹. El tratamiento testigo, presentó el pH más bajo con un promedio de 4.34 y se agrupó en la categoría D. Este resultado refleja la acidez natural del suelo en la zona de estudio sin intervención, sirviendo como referencia para evaluar la eficacia de los tratamientos con cal.

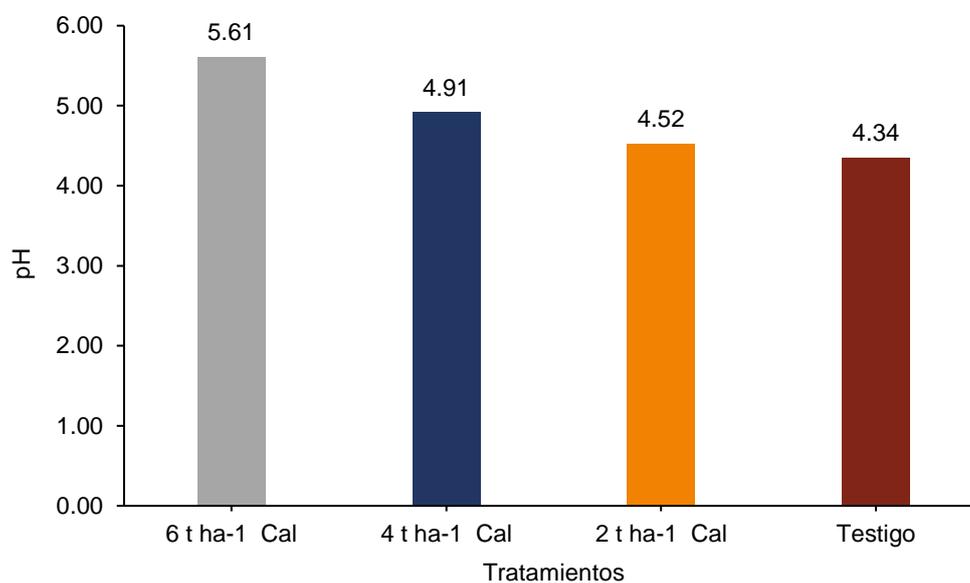
Tabla 10

Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad para el pH en el suelo

Tratamientos	pH	Agrupación
6 t ha ⁻¹ Cal	5.61	A
4 t ha ⁻¹ Cal	4.91	B
2 t ha ⁻¹ Cal	4.52	C
Testigo	4.34	D

Figura 5

Promedio del pH en el suelo.



Los resultados indican que el tratamiento más eficaz para neutralizar la acidez del suelo es la aplicación de 6 t ha⁻¹ de cal. Esta dosis elevó significativamente el pH del suelo en comparación con las dosis menores de 4 y 2 t ha⁻¹, es decir, a mayor dosis de cal, mayor es el incremento del pH en el suelo, observándose una relación directa entre la dosis de cal aplicada y el aumento del pH. Dichos resultados concuerdan con los de Ejigu et al. (2023), en su trabajo de investigación de la aplicación de cal en dosis crecientes resultó en un aumento del pH en el suelo. Aunque en su estudio se utilizaron dosis más altas (hasta 12 t ha⁻¹), el principio es similar. Los valores más elevados de pH (6.27), en comparación a las parcelas de control que presentaron el pH más bajo (4.89).

Así mismo, son semejantes a los de Haile et al. (2023), quienes indican que el pH del suelo aumentó de manera progresiva conforme se incrementó la cantidad de cal aplicada, alcanzando valores máximos de pH de 6.54 en las parcelas que recibieron 8.22 t ha⁻¹ de cal. Por su parte, Tasilla (2021) demostró que con la aplicación de cal se reduce la acidez en el suelo incrementado el pH, pero se tiene que considerar la granulometría de la cal. En su estudio, la

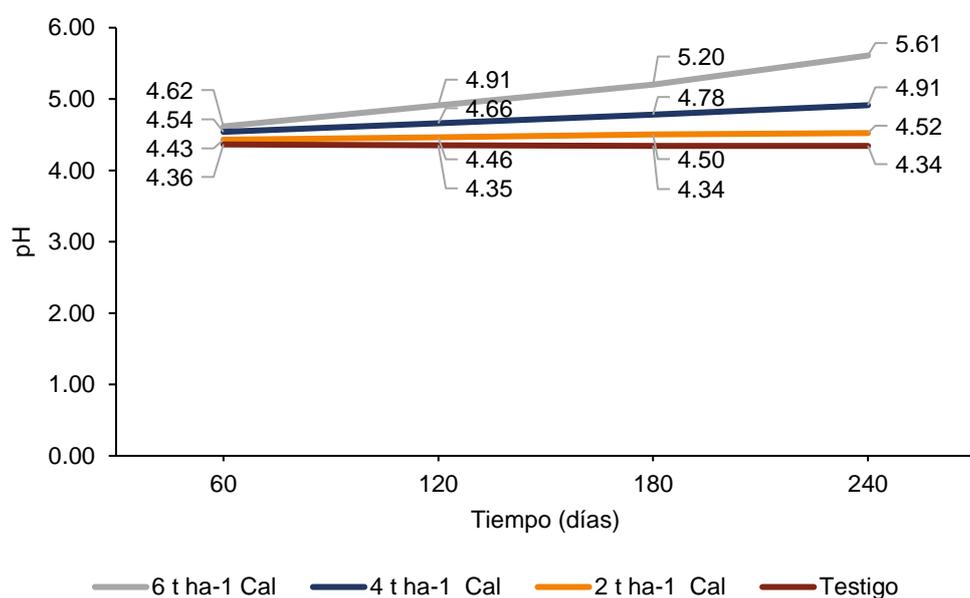
cal con granulometría (<0.3 mm) demostró ser la más eficiente, alcanzando un pH de 6.79 en dos meses. Según Espinosa y Molina (1999), la cal se disuelve fácilmente en el suelo, liberando iones Ca^{2+} y OH^{-1} , estos reaccionan con los iones hidrógeno en el suelo, formando H_2O y disminuyendo la concentración de H^{+} , lo que provoca un aumento del pH. Por su parte, Bernier y Alfaro (2006) manifiesta que la fineza de las partículas individuales de la cal determina su velocidad de reacción; es decir, a medida que se reduce el tamaño de la partícula del material de encalado se aumenta el área o superficie de contacto.

4.2 pH en el suelo en función del tiempo

En la Figura 6, se muestra los resultados de cómo influye las diferentes dosis de cal en el pH a través del tiempo. En los primeros 60 días, el tratamiento testigo presentó un pH de 4.36, indicando una acidez en el suelo. La aplicación de 2 t ha^{-1} de cal elevó el pH ligeramente a 4.43; mientras que, las dosis mayores de 4 y 6 t ha^{-1} aumentaron el pH a 4.54 y 4.62, respectivamente. Esto indica que la aplicación de cal a un corto plazo comienza a neutralizar la acidez del suelo. A los 120 días, los tratamientos de 2, 4 y 6 t ha^{-1} mostraron incrementos en el pH, alcanzando valores de 4.46, 4.66 y 4.91, respectivamente, en comparación con el testigo que permaneció prácticamente sin cambios (4.35). Esto indica una mejora continua en la neutralización de la acidez, especialmente en los tratamientos con mayores dosis de cal. A los 180 días, los tratamientos de 2, 4 y 6 t ha^{-1} continuaron mostrando aumentos en el pH, alcanzando 4.50, 4.78 y 5.20, respectivamente; mientras que, el testigo se mantuvo en 4.34. Estos resultados destacan el efecto del encalado en reducir la acidez del suelo, con una correlación clara entre la cantidad de cal aplicada. A los 240 días, el pH en el tratamiento testigo se mantuvo constante en 4.34 en comparación a los tratamientos con cal que mostraron un aumento, el 2, 4 y 6 t ha^{-1} presentaron pH de 4.52, 4.91 y 5.61, respectivamente. El tratamiento con 6 t ha^{-1} mostró el mayor incremento, lo que representa una reducción de la acidez del suelo.

Figura 6

pH en el suelo en función del tiempo.



Los resultados indican que la aplicación de 6 t ha⁻¹ de cal demostró un impacto más notable para reducir la acidez del suelo a través del tiempo, respecto a la dosis de 4 y 2 t ha⁻¹ de cal, que también influyeron, pero en menor concentración; es decir, la aplicación de cal en dosis más altas demuestra ser efectiva para neutralizar una mayor cantidad de acidez del suelo a través del tiempo. Estos resultados concuerdan con los de Haile et al. (2023), donde se observa una similitud en los resultados respecto al efecto de la cal en la corrección de la acidez del suelo a través del tiempo; es decir, que la relación del tiempo y concentración de pH es directamente proporcional. Al respecto, Haile et al. (2023) reportaron un incremento progresivo en el pH del suelo con el aumento de la dosis de cal, alcanzando un pH de 6.54 en parcelas que recibieron 8.22 t ha⁻¹. Además, indican que la cal aporta cationes como Ca²⁺ y OH⁻¹ que reemplazan los H⁺ en los sitios de intercambio formando H₂O; por ende, elevando el pH del suelo. Por otro lado, Tasilla (2021) indica que la cal es efectiva en la neutralización del suelo, siempre que la granulometría sea adecuada para una rápida reacción (< 0.3 mm).

4.3 Contenido de aluminio en el suelo

En la Tabla 11, se observa los resultados de análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar el efecto de la aplicación de cal en el contenido de aluminio en el suelo, el valor de significación (p-valor) obtenido para bloques es de 0.6443. Este valor es mayor que el 5%, lo que indica que no hay diferencias significativas en el contenido de Aluminio entre los bloques. Para los tratamientos, el valor de significación (p-valor = 0.0001) es menor al 5%, indicando que existen diferencias significativas en el contenido de aluminio entre los distintos tratamientos aplicados; es decir, que la aplicación de cal causó diferencias en la concentración de aluminio en el suelo.

El coeficiente de variación es de 4.11%, el cual indica que la variación de los resultados del contenido de aluminio en el suelo en las diferentes repeticiones de cada tratamiento es baja. Además, demuestra que el diseño utilizado en el experimento presentó un buen control sobre la variabilidad del contenido de aluminio en el suelo.

Tabla 11

Análisis de varianza (ANOVA) para el aluminio en el suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloques	0.0028	2	0.0014	0.4734	0.6443
Tratamientos	16.6210	3	5.5403	1862.2969	<0.0001
Error	0.0178	6	0.003		
Total	16.6417	11			

CV = 4.11%

Al realizar la prueba de Tukey al 5% de probabilidad (Tabla 12 y Figura 7), se observa que los resultados para analizar las diferencias en la concentración de aluminio en el suelo, el tratamiento testigo, mostró el nivel más alto de aluminio con un valor de 3.167 Cmol (+) kg⁻¹ y se agrupó en la categoría A. Esto indica que este tratamiento tiene la mayor concentración de aluminio y no se superpone con ningún otro tratamiento. El tratamiento con 2 t ha⁻¹, presentó una reducción en el contenido de aluminio, con un promedio de 1.523 Cmol (+) kg⁻¹, asignándosele la agrupación B. Este valor es menor que el testigo mostrando que incluso una dosis baja de cal puede disminuir la concentración de aluminio al neutralizar parte de la acidez del suelo. El tratamiento con 4 t ha⁻¹, presentó una concentración de aluminio de 0.453 Cmol (+) kg⁻¹, agrupándose en la categoría C. Este tratamiento reduce aún más la concentración de aluminio en comparación con 2 t ha⁻¹ y el testigo, demostrando que una mayor aplicación de cal conduce a una mayor neutralización de la acidez del suelo. Por último, el tratamiento con 6 t ha⁻¹, mostró la concentración de aluminio más baja, con un valor de 0.163 Cmol (+) kg⁻¹, clasificándose en la categoría D. Este resultado indica que la mayor dosis de cal fue la más efectiva para reducir la concentración de aluminio en el suelo, lo que resalta la capacidad de la cal para mitigar los efectos adversos de los suelos ácidos.

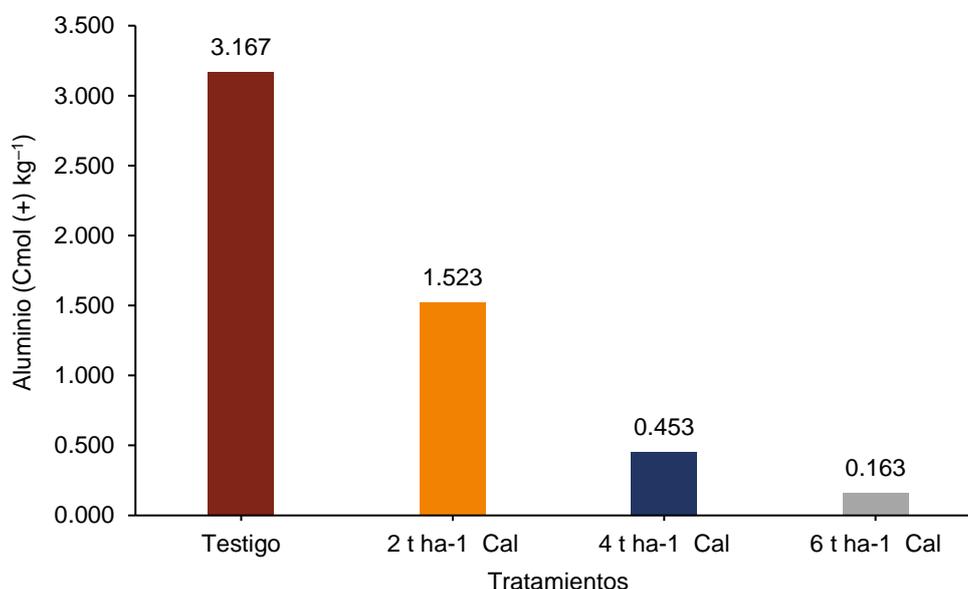
Tabla 12

Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad para el aluminio en el suelo

Tratamientos	Aluminio, Cmol (+) kg ⁻¹	Agrupación
Testigo	3.167	A
2 t ha ⁻¹ Cal	1.523	B
4 t ha ⁻¹ Cal	0.453	C
6 t ha ⁻¹ Cal	0.163	D

Figura 7

Promedio del aluminio en el suelo.



Los resultados indican que la aplicación de 6 t ha⁻¹ de cal influyó en una mayor reducción del aluminio alcanzando un valor de 0.163 Cmol (+) kg⁻¹, respecto a las dosis de 4 y 2 t ha⁻¹, que mostraron reducciones menos significativas en la concentración del aluminio; es decir, que la aplicación de cal influye en la reducción de la concentración de aluminio en el suelo, con una disminución significativa a medida que aumenta la dosis aplicada. Estos resultados son semejantes con los de Buni (2014), quien demostró que el encalado reduce significativamente el contenido de aluminio en suelos ácidos a medida que se incrementa la dosis de cal. En su estudio, la mayor dosis de encalado (3750 kg ha⁻¹) redujo el aluminio a 0.24 Cmol (+) kg⁻¹, un valor similar al obtenido en el tratamiento con 6 t ha⁻¹ de cal en el presente estudio. Por su parte, Vivanco (2016) encontró que la aplicación de cal en diferentes dosis redujo la concentración de aluminio en el suelo, especialmente en la capa superficial (0-20 cm). En su estudio, las dosis más altas de cal (3750 kg ha⁻¹) redujeron el aluminio a niveles prácticamente nulos, lo que demuestra la alta reactividad de la cal para neutralizar la acidez del suelo.

Según Espinosa y Molina (1999), al aplicar cal en un suelo ácido, se disocia liberando iones de calcio (Ca^{2+}) y grupos hidroxilo (OH^-), aumentando el pH del suelo. Además, Bernier y Alfaro (2006) sostienen que este aumento provoca la precipitación del aluminio mediante dos mecanismos principales: la precipitación del aluminio en forma de hidróxido de aluminio [$\text{Al}(\text{OH})_3$] y el desplazamiento del aluminio por el calcio en los sitios de intercambio catiónico.

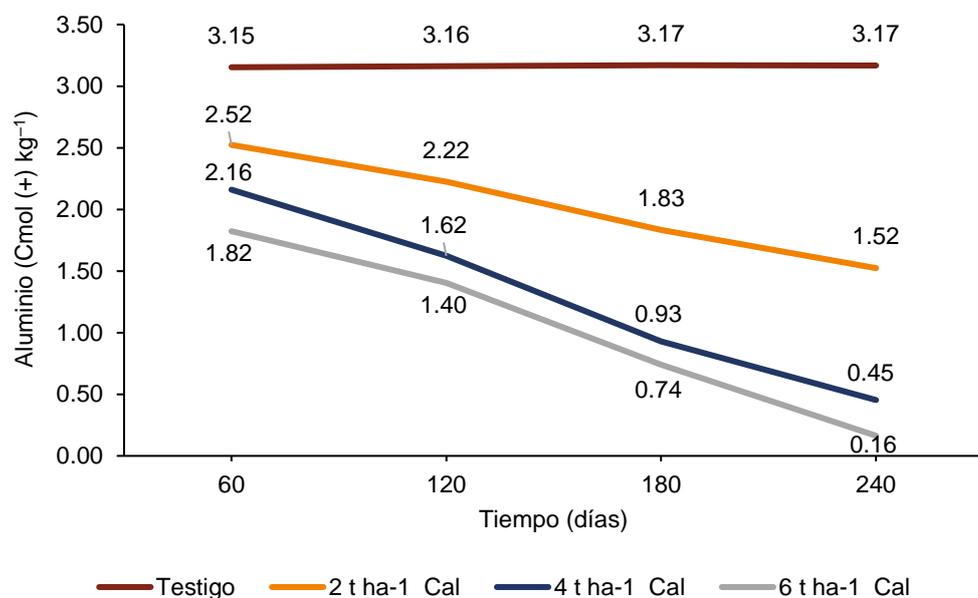
4.4 Contenido de aluminio en el suelo en función del tiempo

La Figura 8 muestra los resultados del contenido de aluminio a través del tiempo con la aplicación de diferentes dosis de cal. A los 60 días, los tratamientos con cal, se observó una disminución del aluminio, con 2 t ha^{-1} redujo la concentración a 2.52 Cmol (+) kg^{-1} , 4 t ha^{-1} a 2.16 Cmol (+) kg^{-1} y 6 t ha^{-1} a 1.82 Cmol (+) kg^{-1} . En comparación el tratamiento testigo presentó un contenido de aluminio de 3.15 Cmol (+) kg^{-1} . Esta reducción inicial en las concentraciones de aluminio indica que la cal está comenzando a neutralizar los iones de aluminio. A los 120 días, el contenido del aluminio en el tratamiento testigo se mantuvo estable en 3.16 Cmol (+) kg^{-1} ; mientras que, los tratamientos con cal mostraron una disminución, con 2, 4 y 6 t ha^{-1} redujo el aluminio a 2.22, 1.62 y 1.40 Cmol (+) kg^{-1} , respectivamente. Esto indica que el efecto de la cal en la reducción del aluminio se vuelve más pronunciado con el tiempo, especialmente en las dosis más altas. A los 180 días, los tratamientos continuaron mostrando disminuciones en el contenido de aluminio, con 2, 4 y 6 t ha^{-1} redujo el aluminio a 1.83, 0.93 y 0.74 Cmol (+) kg^{-1} , respectivamente, en comparación con el testigo, que siguió siendo estable, con 3,17 Cmol (+) kg^{-1} . Esto indica que el encalado tiene un efecto sostenido y acumulativo en la reducción del aluminio en el suelo. A los 240 días, la concentración de aluminio en el testigo se mantuvo en 3.17 Cmol (+) kg^{-1} ; mientras que, en los tratamientos con cal continuó disminuyendo, con 2 t ha^{-1} alcanzó 1.52 Cmol (+) kg^{-1} , 4 t ha^{-1} llegó a 0.45 Cmol (+) kg^{-1} y 6 t ha^{-1} a 0.16 Cmol (+) kg^{-1} . El tratamiento con 6 t ha^{-1} , mostró el nivel más bajo

en el contenido del aluminio, reduciendo la toxicidad para las plantas y mejorando la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

Figura 8

Contenido de aluminio en el suelo en función del tiempo.



La aplicación de cal efectivamente reduce el contenido de aluminio en el suelo, y esta reducción se incrementa con dosis mayores. La dosis de 6 t ha⁻¹ demostró ser la más efectiva, reduciendo significativamente los niveles de aluminio. Además, la reducción en la disponibilidad de aluminio mejora con el tiempo, destacando que el encalado tiene un efecto acumulativo y sostenido en la disminución de la concentración de aluminio en el suelo. Estos resultados son semejantes a los de los hallazgos de Nazar (2015), quien observó una reducción significativa en la concentración de aluminio con la aplicación de diferentes dosis de cal en suelos ácidos a través del tiempo. En su estudio, la dosis de 4 t ha⁻¹ fue la más efectiva, reduciendo la concentración de aluminio a 0.58 Cmol (+) kg⁻¹, un resultado que guarda similitud con la reducción observada en el presente estudio. Además, los resultados obtenidos son similares a lo reportado por Haile et al. (2023), quienes demostraron que la cal tiene un

efecto en la reducción del aluminio con el tiempo; es decir, a medida que transcurre el tiempo, el calcio reacciona con los iones de aluminio, reduciendo el contenido de aluminio en el suelo.

4.5 Contenido de hidrógeno en el suelo

En la Tabla 13, se observa los resultados de análisis de varianza (ANOVA) para el contenido de Hidrógeno en el suelo, en relación a los bloques mostro un p-valor de 0.8854, lo cual es mayor al 5%, indicando que no hay diferencias significativas en el contenido de hidrógeno entre los bloques. Para los tratamientos el valor es menor al 5% (p-valor = 0.0001), lo cual indica que existen diferencias significativas en el contenido de hidrógeno entre los diferentes tratamientos. Estos resultados muestran que la aplicación de cal tiene un impacto y significativo en la reducción de la acidez del suelo.

El coeficiente de variación es de 3.13%, el cual indica que la variabilidad de los resultados en el contenido de hidrogeno en el suelo dentro de los tratamientos es baja. Además, indica que el diseño empleado en el experimento presentó un buen control sobre la variabilidad en el contenido de hidrógeno.

Tabla 13

Análisis de varianza (ANOVA) para el hidrógeno en el suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloques	0.0008	2	0.0004	0.1243	0.8854
Tratamientos	9.5406	3	3.1802	967.7658	<0.0001
Error	0.0197	6	0.0033		
Total	9.5611	11			

CV = 3.13%

Al realizar la prueba de Tukey al 5% de probabilidad (Tabla 14 y Figura 9), se observa que el tratamiento testigo, presentó una concentración de hidrógeno de 2.69 Cmol (+) kg⁻¹, ubicándose en la agrupación A. Este resultado refleja la condición natural del suelo en la zona de estudio, lo cual indica que hay una alta concentración de iones de hidrógeno, a su vez servirá para comparar la efectividad de los demás tratamientos. El tratamiento con 2 t ha⁻¹ presentó una ligera reducción en la concentración de hidrógeno a 2.5233 Cmol (+) kg⁻¹ en comparación testigo, ubicándose en la categoría B. Es decir, que incluso una dosis moderada de cal puede reducir la concentración de hidrógeno en el suelo, aunque de manera limitada. El tratamiento con 4 t ha⁻¹, resultó en una mayor disminución en los niveles de hidrógeno, con un promedio de 1.6633 Cmol (+) kg⁻¹, y se clasificó en la categoría C. Esto indica que una mayor cantidad de cal conduce a una reducción más en los iones de hidrógeno. Por último, el tratamiento con 6 t ha⁻¹, registró el contenido de hidrógeno más bajo con un valor de 0.44 Cmol (+) kg⁻¹, agrupado en la categoría D. Este resultado indica que la mayor dosis de cal fue la más efectiva para reducir la acidez del suelo, lo cual se manifiesta en una disminución sustancial de los iones de hidrógeno.

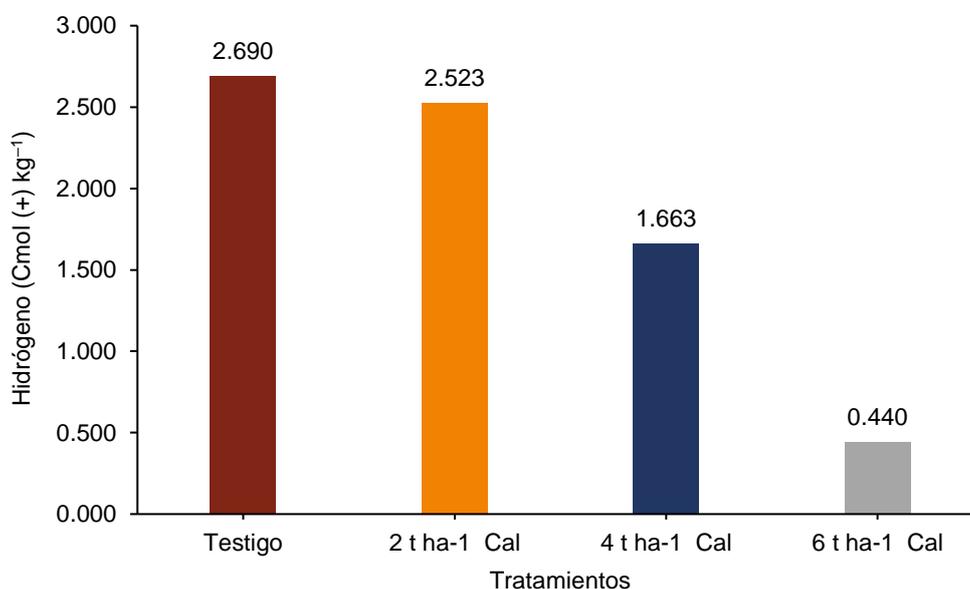
Tabla 14

Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad para el hidrógeno en el suelo

Tratamientos	Hidrógeno, Cmol (+) kg ⁻¹	Agrupación
Testigo	2.690	A
2 t ha ⁻¹ Cal	2.523	B
4 t ha ⁻¹ Cal	1.663	C
6 t ha ⁻¹ Cal	0.440	D

Figura 9

Promedio del contenido de hidrógeno en el suelo.



El tratamiento con la dosis de 6 t ha⁻¹ de cal mostró una mayor reducción de los iones hidrógeno [0.440 Cmol (+) kg⁻¹], en comparación al testigo que el contenido de hidrógeno se mantuvo alto [2.690 Cmol (+) kg⁻¹]; por tanto, la aplicación de cal en dosis mayores es más efectiva para reducir la acidez del suelo, lo cual se manifiesta en una disminución de los iones de hidrógeno. Estos resultados son similares con los de Rosas-Patiño et al. (2017), quienes demostraron la efectividad de la cal en la neutralización del contenido de hidrógeno en el suelo. Los resultados mostraron que las dosis más altas de cal influenciaron en la reducción del contenido de hidrógeno en el suelo. En su estudio, sin la aplicación de cal, el contenido de hidrógeno fue de 0.78 Cmol (+) kg⁻¹, y con la aplicación de 5 t ha⁻¹ de cal, este valor se redujo a 0.18 Cmol (+) kg⁻¹, observando la misma tendencia en esta investigación, que, a mayores dosis de cal, la reducción del contenido de hidrógeno es más pronunciado.

Según Espinosa y Molina (1999), cuando la cal se aplica al suelo, el hidróxido de calcio se disocia en iones de calcio (Ca²⁺) e iones hidroxilo (OH⁻). Los iones hidroxilo reaccionan con los iones de hidrógeno (H⁺) presentes en el suelo, formando agua (H₂O) y reduciendo la

concentración de H^+ , que es directamente responsable de la acidez del suelo. Por su parte, Mori (2012) indica que, al aplicarse la cal, los iones de calcio (Ca^{2+}) desplazan a los iones de hidrógeno de las superficies de las partículas de arcilla, liberándolos en la solución del suelo, estos iones hidroxilo (OH^-) neutralizan los iones de hidrógeno libres, lo que resulta en la formación de agua y una reducción de la acidez del suelo.

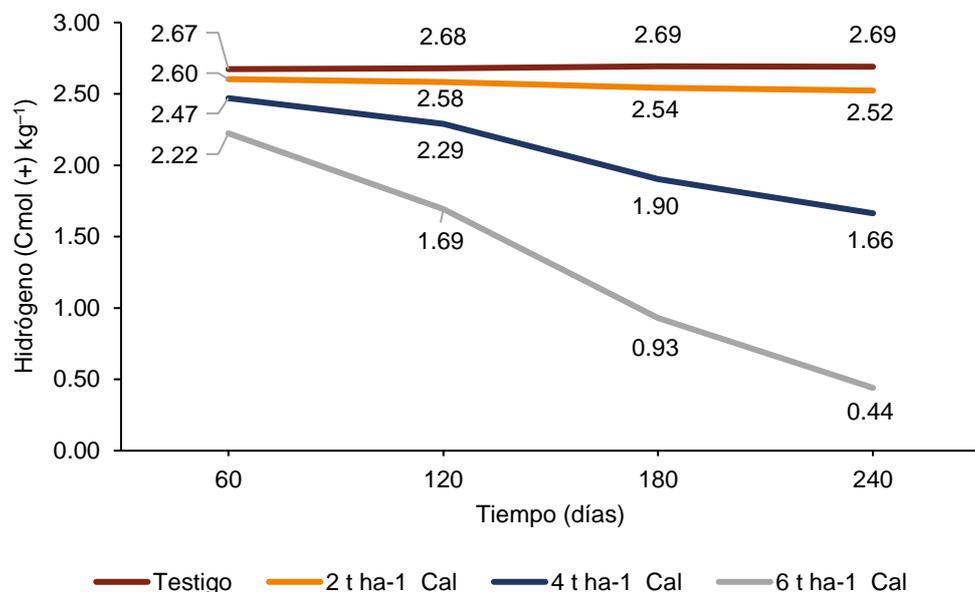
4.6 Contenido de hidrógeno en el suelo en función del tiempo

En la Figura 10, se muestra los resultados de cómo influye la cal en diferentes dosis en el contenido de hidrógeno a través del tiempo. A los 60 días, el tratamiento testigo presentó 2.67 Cmol (+) kg^{-1} de hidrógeno, indicando una acidez en el suelo. En los tratamientos con cal, se observó una disminución en el contenido de hidrógeno, con 2, 4 y 6 t ha^{-1} redujo el hidrógeno a 2.60, 2.47 y 2.22 Cmol (+) kg^{-1} , respectivamente. Esto indica que, la cal comienza a neutralizar la acidez del suelo, reduciendo la concentración de iones de hidrógeno responsables de la acidez. A los 120 días, los tratamientos con cal mostraron una reducción más notable, con 2, 4 y 6 t ha^{-1} mostraron reducciones en el contenido de hidrógeno, alcanzando valores de 2.58, 2.29 y 1.69 Cmol (+) kg^{-1} , respectivamente, en comparación con el testigo se mantuvo constante en 2.28 Cmol (+) kg^{-1} . Esta tendencia descendente indica que la efectividad de la cal para neutralizar la acidez del suelo aumenta con el tiempo, especialmente a dosis mayores. A los 180 días, el contenido de hidrógeno del tratamiento testigo, continuó siendo alto, con 2.69 Cmol (+) kg^{-1} . Los tratamientos con 2, 4 y 6 t ha^{-1} presentaron contenidos de hidrógeno de 2.52, 1.66 y 0.44 Cmol (+) kg^{-1} , respectivamente. Este descenso progresivo indica que el encalado tiene un efecto sostenido y acumulativo en la reducción del hidrógeno en el suelo. A los 240 días, los tratamientos con cal continuaron mostrando una disminución, con 2 t ha^{-1} redujo el hidrógeno a 2.52 Cmol (+) kg^{-1} , 4 t ha^{-1} a 1.66 Cmol (+) kg^{-1} y 6 t ha^{-1} a 0.44 Cmol (+) kg^{-1} , en comparación con el testigo que se mantuvo constante en el contenido de

hidrógeno con un valor de 2.69 Cmol (+) kg⁻¹. La disminución del contenido de hidrógeno con la aplicación de 6 t ha⁻¹ de cal indica que neutraliza la acidez en el suelo.

Figura 10

Contenido de hidrógeno en el suelo en función del tiempo.



Según los resultados obtenidos muestran que a 6 t ha⁻¹ de cal produce una disminución más significativa del contenido de hidrógeno, demostrando una mayor eficacia en la reducción de la acidez del suelo. La aplicación de 2 y 4 t ha⁻¹ de cal, también influye en la reducción, pero en menor concentración en comparación al tratamiento de 6 t ha⁻¹; sin embargo, son menores al testigo; es decir, que la aplicación de cal tiene un efecto positivo y sostenido en la reducción del contenido de hidrógeno en el suelo a través del tiempo. Estos resultados de asemejan con lo de Rosas-Patiño et al. (2017), quien mostró una reducción gradual en el contenido de aluminio a lo largo del tiempo con la aplicación de cal, en su estudio, la aplicación de 5 t ha⁻¹ de cal redujo el contenido de hidrógeno a 0.18 Cmol (+) kg⁻¹. En la presente investigación la tendencia es similar: dosis más altas de cal resultan en una mayor reducción del contenido de hidrógeno.

4.7 Acidez intercambiable en el suelo

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para la acidez intercambiable en el suelo (Tabla 15), el p-valor obtenido para bloques es de 0.748, lo cual es mayor 5%. Indicando que las diferencias entre los bloques no tienen un efecto significativo sobre la acidez intercambiable del suelo. Para los tratamientos, el valor de significación (p-valor = 0.0001), es menor al 5%, indicando que la aplicación de cal tiene un impacto claro en la reducción de la acidez intercambiable del suelo.

El coeficiente de variación es de 3.40%, el cual indica que la variación de los resultados en la acidez intercambiable en el suelo dentro de los tratamientos, es baja. Además, demuestra que el diseño utilizado en el experimento presentó un buen control sobre la variabilidad en la acidez intercambiable en el suelo.

Tabla 15

Análisis de varianza (ANOVA) para la acidez intercambiable en el suelo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	p-valor
Bloques	0.007	2	0.004	0.305	0.7480
Tratamientos	46.978	3	15.659	1360.690	<0.0001
Error	0.069	6	0.012		
Total	47.054	11			

$$CV = 3.40\%$$

En la Tabla 16 y Figura 11, se muestran los resultados de Tukey al 5% de probabilidad, en la cual se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. La mayor acidez intercambiable presentó el tratamiento testigo, con un valor de 5.853 Cmol (+) kg⁻¹, agrupado en la categoría A. Este valor es el más alto entre todos los tratamientos, indicando que la acidez intercambiable se mantuvo alta en ausencia de cal. El tratamiento con 2 t ha⁻¹ de cal, mostró una reducción en la acidez intercambiable, registrando un valor de 4.043 Cmol (+) kg⁻¹, ubicándose en la categoría B. Este resultado indica una reducción de la acidez intercambiable

en comparación con el testigo. El tratamiento con 4 t ha⁻¹ de cal, presentó una acidez intercambiable de 2.117 Cmol (+) kg⁻¹ y se agrupa en el grupo C. Este valor es menor al testigo y 2 t ha⁻¹, indicando una mayor efectividad en la reducción de la acidez del suelo a medida que se incrementa la dosis de cal. Por último, el tratamiento con 6 t ha⁻¹ de cal, alcanzó una acidez intercambiable de 0.603 Cmol (+) kg⁻¹ y se encuentra en el grupo D. Este resultado es el más bajo de todos los tratamientos, demostrando que la aplicación de 6 t ha⁻¹ de cal es la más efectiva en reducir la acidez intercambiable del suelo a niveles mínimos.

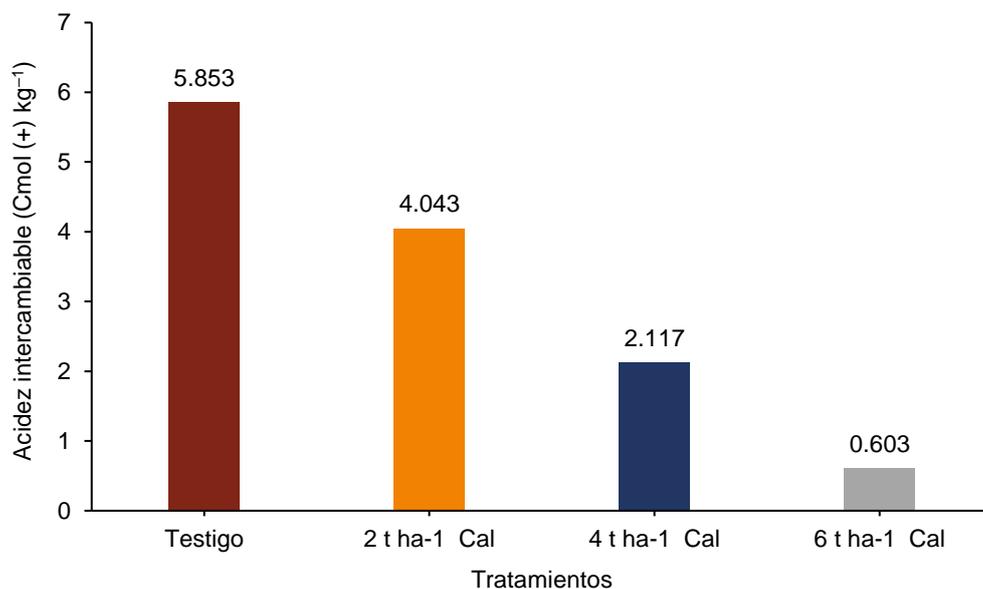
Tabla 16

Prueba de significación de Tukey al 5% de probabilidad para la acidez intercambiable en el suelo

Tratamientos	Acidez intercambiable, Cmol (+) kg ⁻¹	Agrupación
Testigo	5.853	A
2 t ha ⁻¹ Cal	4.043	B
4 t ha ⁻¹ Cal	2.117	C
6 t ha ⁻¹ Cal	0.603	D

Figura 11

Promedio la acidez intercambiable en el suelo.



La aplicación de 6 t ha⁻¹ de cal resultó ser más eficaz para neutralizar la acidez intercambiable en el suelo con un valor de [0.603 Cmol (+) kg⁻¹], en comparación al de 4 y 2 t ha⁻¹ que alcanzaron [2.117 y 4.043 Cmol (+) kg⁻¹], respectivamente; es decir, que a mayores dosis de cal son más eficaces para disminuir la acidez intercambiable en suelos ácidos, con una relación inversa entre la dosis de cal aplicada y la reducción de la acidez. Estos resultados concuerdan con el estudio de Alemu et al. (2022), quienes mostraron que la aplicación de cal, hasta 14 t ha⁻¹, redujo significativamente la acidez intercambiable a 0.048 Cmol (+) kg⁻¹ de suelo, con los valores más bajos observados en los tratamientos de mayor dosis de cal, en la presente investigación, la tendencia es similar: a mayor cantidad de cal aplicada, mayor es la reducción en la acidez intercambiable.

De manera similar, Haile et al. (2023) demostraron que la aplicación de cal redujo significativamente la acidez intercambiable. En su estudio, el valor más bajo de acidez intercambiable, 0.16 Cmol (+) kg⁻¹, se obtuvo con una dosis de 8.22 t ha⁻¹ de cal. Aunque este valor es ligeramente inferior al registrado en el presente estudio con la dosis de 6 t ha⁻¹ [0.603 Cmol (+) kg⁻¹], ambos estudios coinciden en que las dosis más altas de cal son las más efectivas para reducir la acidez del suelo. Por último, el estudio de Ramírez et al. (2021), demostró que la efectividad del encalado en la reducción de la acidez intercambiable en suelos ácidos. En dicho estudio, la aplicación de 6 t ha⁻¹ de cal redujo la acidez intercambiable a 0.91 Cmol (+) kg⁻¹, un valor muy cercano al obtenido en la presente investigación [0.603 Cmol (+) kg⁻¹] con la misma dosis.

Según Sampedro (2005), la cal actúa principalmente a través de dos mecanismos químicos fundamentales. Primero, al disolverse en el suelo, la cal libera iones de calcio (Ca²⁺) e hidróxido (OH⁻). Los iones de hidróxido reaccionan con los iones de hidrógeno (H⁺) presentes en el suelo, formando agua (H₂O), lo que reduce la concentración de protones libres, responsables de la acidez del suelo (Campillo y Sadzawka, 2006). En segundo lugar, los iones

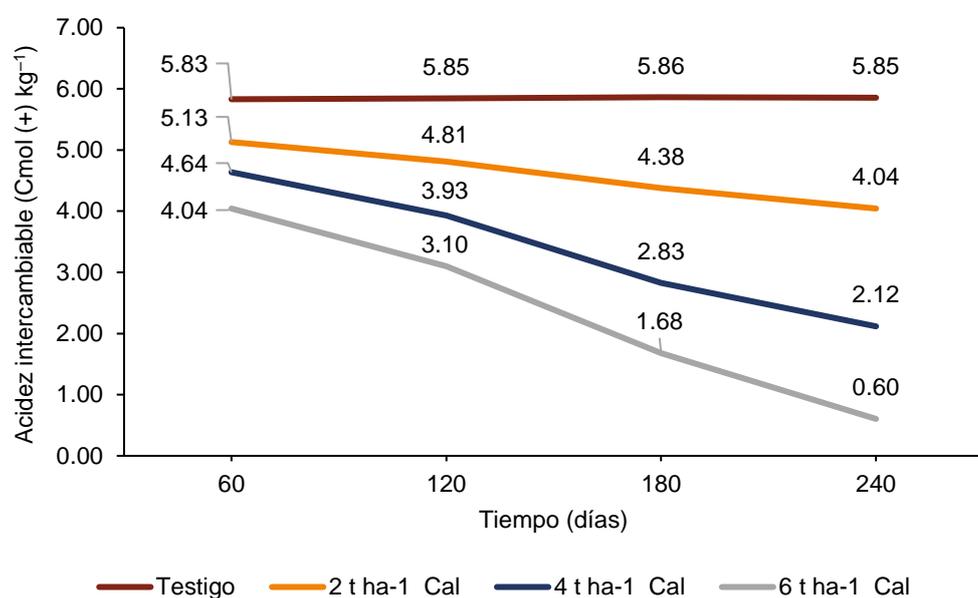
de calcio desplazados por la disociación de la cal reemplazan a los iones de hidrógeno y aluminio en el complejo de intercambio catiónico del suelo (Carbonero, 1984). Al ser sustituido por calcio, el aluminio precipita en forma de compuestos como el hidróxido de aluminio (Al(OH)_3), que es menos soluble y no contribuye a la acidez del suelo (Toledo, 2016).

4.8 Acidez intercambiable en el suelo en función del tiempo

La Figura 12 muestra los resultados de la acidez intercambiable a través del tiempo con la aplicación de diferentes dosis de cal. A los 60 días, el tratamiento testigo presentó un valor de $5.83 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$. Los tratamientos con cal mostraron una disminución con el aumento de la dosis, con 2 t ha^{-1} tuvo un valor de acidez de $5.13 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$, 4 t ha^{-1} alcanzó $4.64 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$ y 6 t ha^{-1} mostró el valor de $4.04 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$. Esta reducción inicial indica que la cal está comenzando a neutralizar los cationes ácidos en el suelo. A los 120 días, los tratamientos con cal continuaron mostrando reducciones, con $2, 4$ y 6 t ha^{-1} redujo la acidez a $4.81, 3.93$ y $3.10 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$ respectivamente, en comparación con el testigo, que se mantuvo constante en $5.85 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$. Esto indica que la cal continúa neutralizando los componentes ácidos del suelo con el tiempo. A los 180 días, el tratamiento testigo permaneció elevado, en $5.85 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$. Sin embargo, los tratamientos con cal mostraron una disminución: $2, 4$ y 6 t ha^{-1} con valores de $4.38, 2.83$ y $1.68 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$, respectivamente. Este descenso indica que la cal tiene un efecto sostenido y acumulativo en la reducción de la acidez intercambiable en el suelo. Por último, a los 240 días, el tratamiento testigo se mantuvo en $5.85 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$. Por otro lado, los tratamientos con cal continuaron mostrando disminuciones en la acidez, con 2 t ha^{-1} redujo la acidez a $4.04 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$, 4 t ha^{-1} a $2.12 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$, y 6 t ha^{-1} a $0.60 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$. Estos resultados finales destacan la efectividad del encalado, especialmente a dosis más altas, para reducir la acidez intercambiable y, por ende, mejorar la calidad del suelo para las plantas.

Figura 12

Acidez intercambiable en el suelo en función del tiempo.



La aplicación de cal en dosis de 2, 4 y 6 t ha⁻¹ produce un efecto positivo en la reducción de la acidez intercambiable en el suelo, con efectos más pronunciados y sostenidos a lo largo del tiempo. La dosis de 6 t ha⁻¹ se destaca como la más efectiva para reducir la acidez intercambiable; es decir, la cal es eficaz para reducir la acidez intercambiable en el suelo, y que esta eficacia es inversamente proporcional a la dosis aplicada. Estos resultados se asemejan con los de Alemu et al. (2022), quienes mostraron una disminución progresiva de la acidez intercambiable con el aumento en la dosis de cal aplicada en relación al tiempo, lo que muestra un efecto similar al observado en esta investigación. La consistencia entre ambos estudios indica que la cal es efectiva en la neutralización de la acidez del suelo.

Por otro lado, Haile et al. (2023) encontraron que el efecto de la cal tiene una relación inversa entre la dosis de cal y la acidez intercambiable, donde la dosis más alta (8.22 t ha⁻¹) resultó en un valor de acidez intercambiable de 0.16 Cmol (+) kg⁻¹, en comparación con 3.37 Cmol (+) kg⁻¹ en el tratamiento testigo, en esta investigación el efecto es similar, a mayor dosis de cal la acidez intercambiable disminuye. Finalmente, son similares a los de Ramírez et al.

(2021), quienes observaron una disminución significativa en la acidez intercambiable al aplicar cal en suelos ácidos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se concluyó que la aplicación de cal influye directamente en el aumento del pH del suelo. Se observó que mayores dosis de cal generan un incremento significativo en el pH, siendo el tratamiento con 6 t ha^{-1} el más efectivo, elevando el pH a 5.61 frente al 4.34 del tratamiento testigo.

Se determinó que la aplicación de cal reduce significativamente la concentración de aluminio en el suelo. El testigo presentó la mayor concentración de aluminio con $3.1667 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$; mientras que, el tratamiento con 6 t ha^{-1} de cal logró reducir este valor a $0.1633 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$.

El contenido de hidrógeno redujo significativamente con la aplicación de cal, mostrando el tratamiento con 6 t ha^{-1} la mayor reducción, con un valor de $0.440 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$; mientras que, el testigo presentó un contenido de hidrógeno de $2.690 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$.

En cuanto a la acidez intercambiable en el suelo, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos de cal aplicados. La dosis de 6 t ha^{-1} de cal fue la más efectiva, alcanzando una reducción considerable a $0.603 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$, en comparación con el testigo que presentó un valor de $5.853 \text{ Cmol (+) kg}^{-1}$.

5.2 Recomendaciones

De acuerdo a lo realizado, puedo recomendar:

- Aplicar dosis de cal de acuerdo con las necesidades específicas del suelo. Dado que el efecto del encalado no es permanente y tiende a disminuir con el tiempo.
- Implementar prácticas sostenibles de manejo del suelo, dado que la acidez limita el rendimiento de los cultivos. Además del encalado, es conveniente incorporar prácticas agrícolas como la rotación de cultivos, el uso de abonos orgánicos y la siembra de cultivos de cobertura.
- Que los agricultores reciban capacitación sobre el uso adecuado de la cal, incluyendo la dosis, el momento de aplicación y la combinación con otras prácticas de manejo del suelo.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agegnehu, G., Amede, T., Erkossa, T., Yirga, C., Henry, C., Tyler, R., Nosworthy, M. G., Beyene, S., & Sileshi, G. W. (2021). Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Soil & Plant Science*, 71(9), 852-869. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239>
- Alcarraz, O. T. (2010). *Efecto del encalado y gallinaza en el rendimiento de papa (Solanum tuberosum) variedad amarilla Tumbay en Andahuaylas, Apurímac a 3850 msnm* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional UNSCH. http://repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/UNSCH/3215/1/TESIS%20AG852_Alc.pdf
- Alemu, E., Selassie, Y. G., & Yitaferu, B. (2022). Effect of lime on selected soil chemical properties, maize (*Zea mays* L.) yield and determination of rate and method of its application in Northwestern Ethiopia. *Heliyon*, 8(1), e08657. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08657>
- Alleoni, L. R. F., Cambri, M. A., Caires, E. F., & Garbuió, F. J. (2010). Acidity and Aluminum Speciation as Affected by Surface Liming in Tropical No-Till Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 74(3), 1010-1017. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0254>
- Aragón, C. I., y Vivas, C. A. (2021). *Diagnóstico del nivel de acidez y estimación de las necesidades de enmienda agrícola en suelos del municipio Pamplona, Norte de Santander mediante pruebas de incubación en laboratorio* [Tesis de pregrado, Universidad de Pamplona]. Repositorio Institucional Universidad de Pamplona. <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/2263>

- Arévalo, Y. G., Pérez, W. E., Samaniego, T. D., y Solórzano, R. A. (2024). *Manual de encalado de suelos ácidos*. Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA]. <https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/2492>
- Aya, S. M. (2024). Crisis socioecológica del sistema agroalimentario: aproximaciones al desafío de la restauración agroecológica. *Revista Controversia*, 222, 17-46. <https://doi.org/10.54118/controver.vi222.1312>
- Behera, S. K., & Shukla, A. K. (2014). Spatial Distribution of Surface Soil Acidity, Electrical Conductivity, Soil Organic Carbon Content and Exchangeable Potassium, Calcium and Magnesium in Some Cropped Acid Soils of India. *Land Degradation & Development*, 26(1), 71-79. <https://doi.org/10.1002/ldr.2306>
- Bernier, R., y Alfaro, M. (2006). *Acidez de los suelos y efectos del encalado* (Boletín INIA N.º 151). Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA Remehue. <https://biblioteca.inia.cl/items/5105afbd-d62e-4c75-9aa7-0e3247685514>
- Bloom, P. R., Skyllberg, U. L., & Sumner, M. E. (2005). Soil Acidity. En M. A. Tabatabai & D. L. Sparks (Eds.), *Chemical Processes in Soils* (Vol. 8, pp. 411-459). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser8.c8>
- Buni, A. (2014). Effects of Liming Acidic Soils on Improving Soil Properties and Yield of Haricot Bean. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 5(1), 248. <http://dx.doi.org/10.4172/2161-0525.1000248>
- Cai, Z., Wang, B., Xu, M., Zhang, H., He, X., Zhang, L., & Gao, S. (2014). Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 15(2), 260-270. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0989-y>

- Calva, C., y Espinosa, J. (2017). Efecto de la aplicación de cuatro materiales de encalado en control de la acidez de un suelo de Loreto, Orellana. *Siembra*, 4(1), 110-120. <https://doi.org/10.29166/siembra.v4i1.505>
- Calvert, J. G., Lazrus, A., Kok, G. L., Heikes, B. G., Walega, J. G., Lind, J., & Cantrell, C. A. (1985). Chemical mechanisms of acid generation in the troposphere. *Nature*, 317, 27-35. <https://doi.org/10.1038/317027a0>
- Campillo, R., y Sadzawka, A. (2006). *La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA Carillanca. <https://biblioteca.inia.cl/items/9c8466cf-f0f6-4147-80bd-e67dfebada2d>
- Carbonero, P. (1984). *Química del Suelo y los Fertilizantes*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas – UPM. <https://oa.upm.es/54493/>
- Carrizo, M. E., Alesso, C. A., Billoud, H., y Pilatti, M. Á. (2014). Comparación del poder de neutralización de enmiendas calcáreo-magnésicas en suelos de la Pampa llana santafesina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Cuyo*, 46(2), 73-82. <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/5605/4310>
- Ejigu, W., Selassie, Y. G., Elias, E., & Molla, E. (2023). Effect of lime rates and method of application on soil properties of acidic Luvisols and wheat (*Triticum aestivum*, L.) yields in northwest Ethiopia. *Heliyon*, 9(3), e13988. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13988>
- Enesi, R. O., Dyck, M., Chang, S., Thilakarathna, M. S., Fan, X., Strelkov, S., & Gorim, L. Y. (2023). Liming remediates soil acidity and improves crop yield and profitability - a meta-analysis. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1194896. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1194896>

- Espinosa, J., y Molina, E. (1999). *Acidez y Encalado de los Suelos*. International Plant Nutrition Institute [IPNI]. <http://www.cia.ucr.ac.cr/sites/default/files/2021-09/01%20Acidez%20y%20encalado%20de%20suelos%2C%20libro%20por%20%20J%20Espinosa%20y%20E%20Molina.pdf>
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2008). Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 99, pp. 345-399). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0)
- Fageria, N. K., & Nascente, A. S. (2014). Management of Soil Acidity of South American Soils for Sustainable Crop Production. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 128, pp. 221-275). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00006-8>
- Gómez, M. I. (2005). Análisis de suelos como herramienta de diagnóstico en la evaluación química de la fertilidad en el cultivo de la papa. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA]*. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/17455/41899_44482.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Goulding, K. W. T. (2016). Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use and Management*, 32(3), 390-399. <https://doi.org/10.1111/sum.12270>
- Guerrero, F. P. (2007). *Efecto del encalado sobre el rendimiento de papa Solanum tuberosum L. en la parroquia de Julio Andrade Provincia del Carchi* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/140>
- Haile, G., Berihun, H., Abera, H., Agegnehu, G., & Lemenih, M. (2023). Soil Properties, Crop Yield, and Economic Return in Response to Lime Application on Acidic Nitisols of

- Southern Highlands of Ethiopia. *International Journal of Agronomy*, 1-13.
<https://doi.org/10.1155/2023/6105725>
- Hurtado, J. A. (2020). *Gestión ambiental municipal y su rol en el distrito de Bellavista* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Digital Institucional de la Universidad César Vallejo. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/62651/Hurtado_SNJA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA]. (2015). *Semana de la Ciencia y Tecnología. Jornada de Puertas Abiertas*. INIA Tacuarembó.
<http://inia.uy/Documentos/P%C3%BAblicos/INIA%20Tacuaremb%C3%B3/2015/El%20Suelo%2020%20de%20mayo.pdf>
- Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura [Intagri]. (s. f.). *Estrategias para reducir la acidificación de suelos*. Recuperado 10 de diciembre de 2023, de <https://www.intagri.com/articulos/suelos/estrategias-para-reducir-la-acidificacion-de-suelos>
- Krug, E. C., & Frink, C. R. (1983). Acid Rain on Acid Soil: A New Perspective. *Science*, 221(4610), 520-525. <https://doi.org/10.1126/science.221.4610.520>
- Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. (2023). *Análisis de Suelos*.
- León, R., Bonifaz, N., y Gutiérrez, F. (2018). *Pastos y forrajes del Ecuador: siembra y producción de pasturas*. Editorial Universitaria ABYA-YALA de la UPS.
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19019>
- Li, X., Wang, Y., Zhang, Y., Wang, Y., & Pei, C. (2021). Response of soil chemical properties and enzyme activity of four species in the Three Gorges Reservoir area to simulated acid rain. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111457.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111457>

- Maldonado, Y. (2021, octubre 27). *Cal: Tipos, propiedades, usos e importancia*. Geologiaweb. <https://geologiaweb.com/materiales/cal/>
- Molina, E. (2014). *Acidez de suelos y uso de enmiendas* (Nota Técnica #1). Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. http://www.cia.ucr.ac.cr/sites/default/files/2021-09/Nota%20t%C3%A9cnica%201-2014_Acidez%20de%20suelos%20y%20uso%20de%20enmiendas.pdf
- Molina, E., y Alvarado, A. (2012). Manejo de la acidez y el encalado del suelo. En A. Alvarado y J. Raigosa (Eds.), *Nutrición y Fertilización Forestal en Regiones Tropicales* (pp. 163-181). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo [ACCS]. https://www.researchgate.net/profile/Alfredo-Alvarado-Hernandez/publication/324165376_Nutricion_y_Fertilizacion_Forestal_en_Regiones_Tropicales/links/5ac2b2c40f7e9bfc045f3529/Nutricion-y-Fertilizacion-Forestal-en-Regiones-Tropicales.pdf
- Morales, C., Dascal, G., y Aranibar, Z. (2013). *Estudio de los costos de la desertificación y degradación de las tierras en el departamento de Piura (Perú)*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. <https://hdl.handle.net/11362/35900>
- Mori, M. M. (2012). *Uso de diferentes dosis de calcio y silicio para el mejor cuajado de frutos en el cultivo de pepinillo híbrido em american slicer 160 f-1 en Lamas – San Martín* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Martín. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/1169>
- Nazar, J. (2015). *Efecto del encalado en el crecimiento de la valeriana pilosa R&P en Huanico, Cajamarca* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/1555>

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (s. f.). *Suelos Ácidos* | Portal de Suelos de la FAO. Recuperado 10 de diciembre de 2023, de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (1996). *Ecología y Enseñanza Rural: Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas*. <https://www.fao.org/3/w1309s/w1309s00.htm#TopOfPage>
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 1-4. <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf>
- Pender, J. L., y Hazell, P. (Eds.). (2000). *Fomentar el desarrollo sustentable en las zonas poco favorecidas. Punto de Enfoque 4, Una Visión 2020*. International Food Policy Research Institute [IFPRI]. <https://core.ac.uk/download/pdf/6288836.pdf>
- Pereira, C. A., Maycotte, C. C., Restrepo, B. E., Mauro, F., Calle, A., Esther, M. J., Marín, G. L., Álvarez, M. L., y Portela, H. (2011). *Edafología 1*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4776/>
- Powlson, D. S., Gregory, P. J., Whalley, W. R., Quinton, J. N., Hopkins, D. W., Whitmore, A. P., Hirsch, P. R., & Goulding, K. W. T. (2011). Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food Policy*, 36, S72-S87. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.025>
- Prakash, J., Agrawal, S. B., & Agrawal, M. (2023). Global Trends of Acidity in Rainfall and Its Impact on Plants and Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), 398-419. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01051-z>
- Rahman, M. A., Lee, S.-H., Ji, H. C., Kabir, A. H., Jones, C. S., & Lee, K.-W. (2018). Importance of Mineral Nutrition for Mitigating Aluminum Toxicity in Plants on Acidic

- Soils: Current Status and Opportunities. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(10), 3073. <https://doi.org/10.3390/ijms19103073>
- Ramírez, J. F., González, P. J., Rivera, R., & Hernández, A. (2021). Response of different Urochloa pastures to liming, cultivated in Sabana de Manacas region, Cuba. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(2), 247-256. <https://www.cjascience.com/index.php/CJAS/article/view/1016/1331>
- Reina, C. E., y Martínez, J. R. (2008). *Evaluación de dos fuentes de cal con cuatro niveles, sobre el rendimiento de una Mezcla Forrajera de corte en Montúfar, Carchi* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/165>
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J., y Menjivar-Flores, J. C. (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. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742
- Roselló, M. (2016). *Estrategias de resistencia a aluminio en dos variedades de Oriza sativa: exclusión vs detoxificación* [Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona]. TDX Tesis Doctorals en Xarxa. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/399682/mrs1de1.pdf?sequence=1>
- Roth, C. H., Pavan, M. A., Chaves, J. C. D., Meyer, B., & Frede, H. G. (1986). Efeitos das aplicacoes de calcario e gesso sobre a estabilidade de agregados e infiltrabilidade de agua em um latossolo roxo cultivado com cafeeiros. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 10(2), 163-166. <https://agris.fao.org/search/en/providers/123819/records/6473625d08fd68d54604af4b>

- Sadeghian, S. (2016). *La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café*. Centro Nacional de Investigaciones de Café [Cenicafé]. <http://hdl.handle.net/10778/704>
- Sadeghian, S., y Díaz, C. (2020). Corrección de la acidez del suelo: alteraciones químicas del suelo. *Cenicafé*, 71(1), 7-20. https://www.cenicafe.org/es/publications/1-CorreccionAcidez_%281%29.pdf
- Salas, R. E., Smyth, T. J., Alpízar, D., Boniche, J., Alvarado, A., y Rivera, A. (2002). Corrección de la acidez del suelo con Ca y Mg y su efecto en el desarrollo del sistema radical del palmito en la etapa de previvero. *Agronomía Costarricense*, 26(2), 87-94. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43626208.pdf>
- Sampedro, Á. (2005). *Tratamientos de suelos con cal. Planteamiento general, diseño y control de calidad*. Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España [ANCADE]. [http://www.vialidad.gba.gov.ar/documentos/archivs/70-Publicaciones%20y%20Biblioteca/202403111144500.SL-MANUAL_DE_ESTABILIZACION ANCADE.pdf](http://www.vialidad.gba.gov.ar/documentos/archivs/70-Publicaciones%20y%20Biblioteca/202403111144500.SL-MANUAL_DE_ESTABILIZACION_ANCADE.pdf)
- Sanchez, P. A. (2019). *Properties and Management of Soils in the Tropics* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316809785>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (2024). *Datos Hidrometeorológicos*. SENAMHI Cajamarca - Estaciones. <https://www.senamhi.gob.pe/servicios/main.php?dp=cajamarca&p=estaciones>
- Taboada, M. A., y Lavado, R. S. (Eds.). (2009). *Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones*. Editorial Facultad Agronomía Universidad de Buenos Aires. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/libros/L9789502911625.pdf>

- Tasilla, L. (2021). *Variación de la reacción del suelo a la aplicación de cal de diferente granulometría en la Encañada-Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/4482>
- Tkaczyk, P., Mocek-Płóćiniak, A., Skowrońska, M., Bednarek, W., Kuśmierz, S., & Zawierucha, E. (2020). The Mineral Fertilizer-Dependent Chemical Parameters of Soil Acidification under Field Conditions. *Sustainability*, 12(17), 7165. <https://doi.org/10.3390/su12177165>
- Toledo, M. (2016). *Manejo de suelos ácidos en las zonas altas de Honduras: conceptos y métodos*. Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria [DICTA]. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3108/BVE17069071e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Toneatti, M. J. N. (2006). *Evaluación de la tolerancia a aluminio en 125 accesiones de bromo (bromus valdivianus Phil.)* [Tesis de maestría, Universidad Austral de Chile]. Tesis Electrónicas UACH. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/egt664e/doc/egt664e.pdf>
- Tusar, H. M., Uddin, M. K., Mia, S., Suhi, A. A., Wahid, S. B. A., Kasim, S., Sairi, N. A., Alam, Z., & Anwar, F. (2023). Biochar-Acid Soil Interactions—A Review. *Sustainability*, 15(18), 13366. <https://doi.org/10.3390/su151813366>
- Usón, A., Boixadera, J., Bosch, Á., y Enrique, A. (Eds.). (2010). *Tecnología de suelos: estudio de casos*. Pressas Universitarias de Zaragoza y Edicions de la Universitat de Lleida. https://books.google.co.ve/books?id=b2h1gY9dPuoC&printsec=copyright&hl=es&source=gbs_pub_info_r#v=onepage&q&f=false
- van Breemen, N., Driscoll, C. T., & Mulder, J. (1984). Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters. *Nature*, 307, 599-604. <https://doi.org/10.1038/307599a0>

- van Breemen, N., Mulder, J., & Driscoll, C. T. (1983). Acidification and alkalization of soils. *Plant and Soil*, 75(3), 283-308. <https://doi.org/10.1007/BF02369968>
- Vargas-Rodríguez, D. F., Cerón-González, A., Olivares-Martínez, L. D., y Bobadilla-Ballesteros, M. D. (2020). *Manual de Evaluación de Suelos. Énfasis en Memoria Edáfica, Materia Orgánica e Hidroedafología* [3er Concurso Mexicano de Evaluación de Suelos]. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. <https://www.smcsmx.org/files/concurso/2020/Manual3CMES2020.pdf>
- Vásquez, V. (2014). *Diseños experimentales con SAS* (CONCYTEC/FONDECYT, Ed.). Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica [CONCYTEC].
- Vázquez, M. E., y Millán, G. J. (2017). Acidez del suelo. Origen, diagnóstico, consecuencias y tratamiento. En M. E. Vázquez (Ed.), *Manejo y Conservación de Suelos. Con especial énfasis en situaciones argentinas* (pp. 229-271). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/154576>
- Vázquez, M., y Pagani, A. (2018). *Unidad Didáctica C5 (1 de 2). Manejo de Suelos Ácidos*. Universidad Nacional de La Plata. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/75162/mod_resource/content/1/Tirada%20Interna%20UDC%20C5%20%281%20de%20%29%20Suelos%20%C3%81cidos.pdf
- Vistoso, E. M., y Martínez-Lagos, J. (2019). *Encalado de suelo* [Ficha Técnica n.º 15]. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA Remehue. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/66897>
- Vivanco, F. (2016). *Fuentes y niveles de encalado en el crecimiento de plántulas de Cacao (Theobroma cacao L.) en dos profundidades de un suelo* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1248>

- Wang, Y., Yao, Z., Zhan, Y., Zheng, X., Zhou, M., Yan, G., Wang, L., Werner, C., & Butterbach-Bahl, K. (2021). Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. *Global Change Biology*, 27(12), 2807-2821. <https://doi.org/10.1111/gcb.15607>
- Zapata, R. D. (2004). *Química de la acidez del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3280>
- Zhang, H. (2022, agosto). *Causa y Efectos de la Acidez del Suelo*. OSU Extension. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/causa-y-efectos-de-la-acidez-del-suelo.html>
- Zhang, H., Wang, L., Fu, W., Xu, C., Zhang, H., Xu, X., Ma, H., Wang, J., & Zhang, Y. (2024). Soil Acidification Can Be Improved under Different Long-Term Fertilization Regimes in a Sweetpotato–Wheat Rotation System. *Plants*, 13(13), 1740. <https://doi.org/10.3390/plants13131740>
- Zhang, X., Guo, J., Vogt, R. D., Mulder, J., Wang, Y., Qian, C., Wang, J., & Zhang, X. (2020). Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands. *Geoderma*, 366, 114234. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114234>

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de la fase de laboratorio

Tabla 17

Resultados del pH del suelo obtenidos a los 60 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	4.38	4.42	4.48	4.59
II	4.36	4.43	4.54	4.57
III	4.35	4.44	4.60	4.69
Promedio	4.36	4.43	4.54	4.62

Tabla 18

Resultados del pH del suelo obtenidos a los 120 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	4.38	4.46	4.59	4.85
II	4.35	4.45	4.68	4.88
III	4.33	4.48	4.71	5.01
Promedio	4.35	4.46	4.66	4.91

Tabla 19

Resultados del pH del suelo obtenidos a los 180 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	4.37	4.49	4.70	5.13
II	4.34	4.51	4.83	5.16
III	4.32	4.51	4.81	5.31
Promedio	4.34	4.50	4.78	5.20

Tabla 20*Resultados del pH del suelo obtenidos a los 240 días posteriores a la realización del encalado*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	4.36	4.51	4.93	5.60
II	4.35	4.54	4.92	5.61
III	4.32	4.52	4.89	5.63
Promedio	4.34	4.52	4.91	5.61

Tabla 21*Resultados del contenido de aluminio en el suelo obtenidos a los 60 días posteriores a la realización del encalado*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	3.13	2.76	2.24	2.01
II	3.18	2.51	2.15	1.91
III	3.15	2.30	2.09	1.55
Promedio	3.15	2.52	2.16	1.82

Tabla 22*Resultados del contenido de aluminio en el suelo obtenidos a los 120 días posteriores a la realización del encalado*

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	3.14	2.22	1.66	1.58
II	3.16	2.24	1.63	1.34
III	3.19	2.21	1.58	1.29
Promedio	3.16	2.22	1.62	1.40

Tabla 23

Resultados del contenido de aluminio en el suelo obtenidos a los 180 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	3.13	1.87	0.95	0.79
II	3.17	1.78	0.91	0.74
III	3.21	1.85	0.93	0.69
Promedio	3.17	1.83	0.93	0.74

Tabla 24

Resultados del contenido de aluminio en el suelo obtenidos a los 240 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	3.14	1.58	0.41	0.22
II	3.1	1.48	0.42	0.15
III	3.19	1.51	0.53	0.12
Promedio	3.17	1.52	0.45	0.16

Tabla 25

Resultados del contenido de hidrógeno en el suelo obtenidos a los 60 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	2.64	2.65	2.58	2.28
II	2.67	2.62	2.44	2.22
III	2.71	2.54	2.39	2.17
Promedio	2.67	2.60	2.47	2.22

Tabla 26

Resultados del contenido de hidrógeno en el suelo obtenidos a los 120 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	2.66	2.59	2.33	1.71
II	2.67	2.60	2.29	1.69
III	2.71	2.56	2.25	1.68
Promedio	2.68	2.58	2.29	1.69

Tabla 27

Resultados del contenido de hidrógeno en el suelo obtenidos a los 180 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	2.66	2.57	1.92	0.97
II	2.69	2.52	1.88	0.93
III	2.73	2.54	1.91	0.89
Promedio	2.69	2.54	1.90	0.93

Tabla 28

Resultados del contenido de hidrógeno en el suelo obtenidos a los 240 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	2.64	2.58	1.62	0.50
II	2.68	2.48	1.68	0.43
III	2.75	2.51	1.69	0.39
Promedio	2.69	2.52	1.66	0.44

Tabla 29

Resultados de la acidez intercambiable del suelo obtenidos a los 60 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	5.78	5.42	4.84	4.28
II	5.85	5.13	4.59	4.13
III	5.86	4.84	4.48	3.72
Promedio	5.83	5.13	4.64	4.04

Tabla 30

Resultados de la acidez intercambiable del suelo obtenidos a los 120 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	5.80	4.82	4.02	3.29
II	5.83	4.85	3.94	3.03
III	5.91	4.77	3.83	2.97
Promedio	5.84	4.81	3.93	3.10

Tabla 31

Resultados de la acidez intercambiable del suelo obtenidos a los 180 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	5.79	4.44	2.87	1.78
II	5.86	4.30	2.79	1.67
III	5.94	4.39	2.83	1.58
Promedio	5.86	4.38	2.83	1.68

Tabla 32

Resultados de la acidez intercambiable del suelo obtenidos a los 240 días posteriores a la realización del encalado

Bloques	Tratamientos			
	T0	T1	T2	T3
I	5.78	4.16	2.03	0.72
II	5.84	3.96	2.10	0.58
III	5.94	4.01	2.22	0.51
Promedio	5.85	4.04	2.12	0.60

Anexo 2. Análisis de suelos

Figura 13

Análisis de suelo inicial del campo experimental.



ANÁLISIS DE SUELOS



1. DATOS

SOLICITANTE:		MUESTREADO POR:	
DEPARTAMENTO:	CAJAMARCA	FECHA DE RECEPCIÓN:	20/07/2023
PROVINCIA:	SAN MIGUEL	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	20/07/2023
DISTRITO:	CALQUIS	FECHA DE REPORTE:	
LUGAR:	-----	RECIBO O FACTURA:	
CULTIVO:		OBSERVACIÓN:	-----

2. RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO										Baases Cambiables %	Acidez Cambiable %	Saturación de Aluminio %									
	CODIGO DEL LAB.	CASERIO	Arena %	Arcilla %	Limo %	Clase Textural	pH	CE ds/m	M.O. %	N %	C %	P disponible ppm				K ppm	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe
1	S1093	La Totora	41.52	15.76	42.72	Franco	4.34	0.166	2.936	0.147	1.703	16.577	120.597	---	1.099	0.130	0.184	0.169	3.167	2.690	7.439	21.265	58.570	76.370

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE. Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María



Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

Figura 14

Interpretación del análisis de suelo del campo experimental.

MÉTODOS ANALÍTICOS

01. pH método del potenciómetro, relación suelo - agua 1:1
02. C.E. Conductímetro – Extracto Acuoso
03. Materia orgánica: Método de Walkley y Black
04. Nitrógeno Total: Micro Kjeldahl
05. Fósforo disponible: Método de Olsen modificado. Extracto de NHCO_3 0.5M, pH 8.5
06. Potasio Disponible: Método de acetato de amonio 1N, pH 7.0
07. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): Método de acetato de amonio 1N, pH 7.0
Ca Mg K Na : Absorción atómica
08. C.I.C efectiva: Desplazamiento con KCl 1N (Suelos en pH < 5.5)
Aluminio más Hidrógeno: Método de Yuan.
09. Densidad Aparente, Densidad Real, Porcentaje de Porosidad: Método de la Probeta
10. Humedad Relativa, Capacidad de Campo: Método de la Probeta
11. Determinación de elementos menores Hierro, Cobre, Zinc y Manganeso: Método Melich III – EAA
12. Determinación del Boro: Método de la Azometina – H
13. Cadmio y Plomo disponible: Método EDTA – EAA
14. Cadmio Total: Extracción USEPA 3050 – EAA
15. Cadmio Soluble: Lectura directa de la solución en el espectrofotómetro de Absorción Atómica.
16. Determinación colorimétrica de molibdeno

INTERPRETACIÓN DEL pH

Según Scheffer y Schachtschabel	pH en KCl	UNALM	pH en agua
Extremadamente ácido	< 4.0	Fuertemente ácido	< 5.5
Fuertemente ácido	4.0 - 4.9	Moderadamente ácido	5.5 - 6.0
Medianamente ácido	5.0 - 5.9	Ligeramente ácido	6.1 - 6.5
Ligeramente ácido	6.0 - 6.9	Neutro	7.0
Neutro	7.0	Ligeramente alcalino	7.2 - 7.8
Ligeramente alcalino	7.1 - 8.0	Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4
Mediana alcalino	8.1 - 9.0	Fuertemente alcalino	> 8.5
Fuertemente alcalino	9.1 - 10		
Extremadamente alcalino	> 10		

Interpretación de Salinidad	Rango (dS/m)
No salino	0-2
Muy ligeramente salino	2-4
Ligeramente salino	4-8
Moderadamente salino	8-16
Fuertemente salino	> 16

Interpretación de Potasio Disponible	Rango (Kg K ₂ O/ha)	Rango (ppm)
Bajo	< 300	< 100
Medio	300-600	100-240
Alto	> 600	> 240

Interpretación de Carbonato de Calcio	Rango (%)
Bajo	< 1
Medio	1-5
Alto	5-15
Muy alto	> 15

Interpretación de Materia Orgánica	Rango (%)
Bajo	< 2
Medio	2-4
Alto	> 4

Interpretación de Nitrógeno Total	Rango (%)
Bajo	< 0.1
Medio	0.1-0.2
Alto	> 0.2

Interpretación de Fósforo Disponible	Rango (ppm)
Bajo	< 7
Medio	7-14
Alto	> 14



GRACIAS POR LA CONFIANZA Y PREFERENCIA

Anexo 3. Panel de fotografías de la fase de campo y laboratorio

Figura 15

Granulometría del material encalante por tamizado. A: Tamizado de la cal. B: Pesaje de la cal.



Figura 16

Preparación del terreno.



Figura 17

Delimitación y trazado de parcelas en el campo experimental.



Figura 18

Encalado del campo experimental.



Figura 19

Muestreo de suelos.



Figura 20

Pesaje de muestras de suelo, previo envío al laboratorio para su análisis. A: Etiquetado de bolsas. B: Pesaje de muestras.

