

**EVALUACION DEL USO DE MATERIALES ENCALANTES (CAL CALCITA,
OXIDO DE CALCIO, CAL DOLOMITA) PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS
ACIDOS EN EL TOTUMO, SAN JUAN DEL CESAR-GUAJIRA**



AUTORES:

ANA MARIA FAJARDO RODRIGUEZ

MARIA JOSE FAJARDO RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR – CESAR

2026-1

**EVALUACION DEL USO DE MATERIALES ENCALANTES (CAL CALCITA,
OXIDO DE CALCIO, CAL DOLOMITA) PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS
ACIDOS EN EL TOTUMO, SAN JUAN DEL CESAR-GUAJIRA**

AUTORES:

ANA MARIA FAJARDO RODRIGUEZ

MARIA JOSE FAJARDO RODRIGUEZ

DIRECTOR

ORLANDO RUBIANO LARA
MAGISTER EN GESTION AMBIENTAL

CODIRECTOR

DIEGO CARABALI
MAGISTER AMBIENTAL

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR – CESAR

2026-1

DEDICATORIA



AGRADECIMIENTOS



RESUMEN

La acidez del suelo representa una de las principales limitantes para la productividad agrícola en la región de El Totumo, San Juan del Cesar (La Guajira). El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar las propiedades físico-químicas iniciales de un suelo ácido, determinar la dosis óptima de materiales encalantes mediante el método buffer y evaluar la efectividad de tres enmiendas (cal dolomita, óxido de calcio y cal calcita) bajo un diseño completamente al azar con repeticiones. La caracterización inicial evidenció un pH de 5,1, baja disponibilidad de macronutrientes y presencia significativa de aluminio intercambiable. El análisis postratamiento mostró incrementos significativos en el pH y mejoras en la disponibilidad de calcio, magnesio y fósforo, así como reducción del aluminio intercambiable. El análisis de varianza (ANOVA) confirmó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). La cal dolomita presentó la mayor efectividad integral, destacándose por su capacidad para corregir la acidez y mejorar el equilibrio nutricional del suelo. Se concluye que el encalamiento constituye una estrategia viable y sostenible para el manejo de suelos ácidos en el contexto edafoclimático del Caribe seco colombiano.

Palabras clave: acidez del suelo, encalamiento, cal dolomita, aluminio intercambiable, fertilidad del suelo, ANOVA.



ABSTRACT

Soil acidity represents one of the main constraints to agricultural productivity in El Totumo, San Juan del Cesar (La Guajira, Colombia). The objective of this study was to characterize the initial physicochemical properties of an acidic soil, determine the optimal liming rate using the buffer method, and evaluate the effectiveness of three liming materials (dolomitic lime, calcium oxide, and calcitic lime) under a completely randomized design with replications. Initial characterization showed a soil pH of 5.1, low macronutrient availability, and significant levels of exchangeable aluminum. Post-treatment analysis revealed significant increases in soil pH and improvements in calcium, magnesium, and phosphorus availability, along with a reduction in exchangeable aluminum. Analysis of variance (ANOVA) indicated statistically significant differences among treatments ($p < 0.05$). Dolomitic lime demonstrated the highest overall effectiveness due to its capacity to correct soil acidity and improve nutrient balance. It is concluded that liming is a viable and sustainable strategy for managing acidic soils under the edaphoclimatic conditions of the Colombian dry Caribbean region.

Keywords: soil acidity, liming, dolomitic lime, exchangeable aluminum, soil fertility, ANOVA.



Contenido

INTRODUCCIÓN	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	14
3. OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
4.2. MARCO TEÓRICO.....	17
4.2.1 El suelo como recurso natural.....	19
4.3. MARCO CONCEPTUAL	24
4.4. MARCO CONTEXTUAL	26
4.5. MARCO LEGAL.....	27
5.1. LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN.....	31
5.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	31
5.3 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	31
5.4 POBLACIÓN DE ESTUDIO	32
5.5 MUESTRA POBLACIONAL	32
5.6 DESARROLLO METODOLÓGICO	32
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	41
7. CONCLUSIONES	73
8. RECOMENDACIONES.....	75
REFERENCIAS.....	76
ANEXOS	80

Lista de tablas

Tabla 1. Normatividad del proyecto	29
Tabla 2. Línea de investigación	31
Tabla 3. Métodos para la caracterización fisicoquímica.....	35
Tabla 4. Tabla de pH.....	37
Tabla 5. Coordenadas de los puntos de muestreo	43
Tabla 6. Resultados de la caracterización inicial	44
Tabla 7. Comparación del pH	48
Tabla 8. Valores típicos del Equivalente de Carbonato de Calcio (ECC o PN%)......	49
Tabla 9. Valores típicos de finura en materiales usados	50
Tabla 10. Matriz de dosis aplicadas por tratamiento (parcelas de $1 \times 2 \text{ m} = 2 \text{ m}^2$).....	51
Tabla 11. Matriz de condiciones meteorológicas (noviembre 2025 – febrero 2026)	56
Tabla 12. Seguimiento al crecimiento de las plántulas en cada parcela	59
Tabla 13. Resultados postratamiento	63
Tabla 14. Indicadores de efectividad	68
Tabla 15. Puntaje total de los tratamientos	68
Tabla 16. Distribución experimental de las unidades	69
Tabla 17. Análisis ANOVA	70
Tabla 18. Prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$).....	71



Lista de figuras

Figura 1. Municipio de San Juan	26
Figura 2. Ubicación de la finca El Totumo.....	28
Figura 3. Ejemplo de selección de puntos de muestreo.....	33
Figura 4. Ejemplo de toma de muestras de suelo	34
Figura 5. Parcelas demostrativas	39
Figura 6. Mapa de puntos de muestreo y ubicación del terreno	42
Figura 7. Preparación del terreno.....	52
Figura 8. Proceso de siembra.....	54
Figura 9. Materiales encalantes	55
Figura 10. Aplicación del material encalante	56
Figura 11. Comparación de los crecimientos.....	62



INTRODUCCIÓN

El suelo constituye uno de los recursos naturales más importantes para el sostenimiento de la vida, la producción de alimentos y el equilibrio de los ecosistemas, debido a que proporciona nutrientes, agua y soporte físico a las plantas, además de participar en procesos esenciales como el reciclaje de materia orgánica, la regulación hídrica y el almacenamiento de carbono (FAO, 2015). Sin embargo, a nivel mundial, una gran proporción de los suelos presenta procesos de degradación física, química y biológica que afectan su capacidad productiva. Dentro de estas problemáticas, la acidez del suelo se reconoce como una de las limitantes más importantes para la agricultura, especialmente en regiones tropicales y subtropicales, donde las condiciones climáticas favorecen la lixiviación de nutrientes y el aumento de elementos tóxicos como el aluminio (FAO, 2021). Actualmente, se estima que aproximadamente un tercio de los suelos del mundo presenta algún grado de degradación, situación que compromete la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los sistemas productivos.

En Colombia, los problemas de acidez del suelo representan una limitación significativa para el desarrollo agrícola, debido a que gran parte de los suelos cultivables presentan bajos niveles de fertilidad, alta saturación de aluminio y deficiencias de nutrientes esenciales como calcio, magnesio y fósforo. Según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2015), cerca del 40 % de los suelos agrícolas del país requieren procesos de recuperación y corrección mediante prácticas de manejo como el encalado. Estas condiciones afectan directamente la productividad de los cultivos, disminuyen la eficiencia de los fertilizantes y generan pérdidas económicas para los productores, especialmente en sistemas agrícolas de pequeña escala.

En el departamento de La Guajira, y particularmente en la zona rural de El Totumo, corregimiento del municipio de San Juan del Cesar, las características edafoclimáticas han favorecido la presencia de suelos con limitaciones químicas relacionadas con la acidez y la baja disponibilidad de nutrientes. Esta problemática repercute negativamente en la producción agrícola y en la calidad de vida de las comunidades campesinas, las cuales dependen en gran medida de actividades agropecuarias para su sustento económico. Además, las limitaciones económicas de los agricultores dificultan el acceso a tecnologías avanzadas de recuperación de

suelos, lo que hace necesario implementar alternativas accesibles, sostenibles y adaptadas a las condiciones locales, como el uso de materiales encalantes.

En este contexto, la presente investigación evaluó el efecto de diferentes materiales encalantes —cal calcita, óxido de calcio y cal dolomita— en el tratamiento de suelos ácidos en la zona de El Totumo, San Juan del Cesar, La Guajira. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que permitió medir de manera objetiva las variaciones en las propiedades químicas del suelo mediante el análisis de datos numéricos obtenidos en laboratorio. Asimismo, el alcance de la investigación fue correlacional, ya que buscó establecer la relación existente entre el tipo de material encalante aplicado y las modificaciones observadas en variables como el pH, la capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE), el aluminio intercambiable y la disponibilidad de nutrientes esenciales.

La metodología se estructuró mediante un diseño experimental completamente al azar (DCA), conformado por cuatro tratamientos y sus respectivas repeticiones, utilizando muestras de suelo recolectadas en la zona de estudio. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a análisis físico-químicos utilizando métodos estandarizados y equipos especializados como pHmetro, conductímetro y espectrofotómetro. Los resultados obtenidos permitieron comparar la efectividad de cada material encalante en la corrección de la acidez y en la recuperación de las propiedades químicas del suelo.

En cuanto a la organización del documento, el trabajo se encuentra estructurado en varios capítulos. El primer capítulo aborda el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos de la investigación. El segundo capítulo desarrolla el marco referencial, integrado por los antecedentes investigativos, el marco teórico y el marco legal relacionado con la acidez y recuperación de suelos. El tercer capítulo presenta el diseño metodológico, incluyendo el enfoque, tipo de investigación, población, muestra, técnicas e instrumentos de recolección de información y procedimiento experimental. El cuarto capítulo expone los resultados obtenidos y su respectivo análisis e interpretación estadística. Finalmente, el quinto capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio, orientadas a fortalecer prácticas sostenibles para el manejo y recuperación de suelos ácidos en la región.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia, la acidez del suelo constituye una de las limitaciones edáficas más relevantes, especialmente en la región Caribe y la Orinoquía, donde amplias zonas presentan pH inferiores a 5,5, generando restricciones en la absorción de nutrientes y la toxicidad por aluminio y manganeso (Calero et al., 2022). El Instituto Geográfico Agustín Codazzi reporta que más del 40 % de los suelos colombianos presentan niveles de acidez que afectan el desarrollo óptimo de cultivos estratégicos como maíz, yuca, fríjol y arroz (Estudio general de suelos y zonificación de tierras, IGAC)

Por su parte, Castro y Juárez (2024), la problemática de la acidez del suelo se asocia principalmente a procesos naturales de lixiviación de bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) y al uso prolongado de fertilizantes nitrogenados acidificantes que incrementan la concentración de iones H^+ y Al^{3+} en el complejo de intercambio catiónico (Morón et al., 2024). Esta condición conlleva a una pérdida significativa de la fertilidad del suelo, reducción de la disponibilidad de nutrientes esenciales como fósforo, calcio y magnesio, e incremento de la toxicidad por metales, afectando el crecimiento radicular y el rendimiento de los cultivos (Barrios y García, 2024).

La región Caribe, y en particular el departamento de La Guajira, enfrenta condiciones de alta vulnerabilidad agrícola por factores como la variabilidad climática, la escasez hídrica y la baja fertilidad de los suelos, entre los cuales destaca la problemática de la acidez. Este fenómeno limita la productividad de cultivos como maíz y yuca, fundamentales tanto para el autoconsumo como para la economía de pequeños productores (Barrios y García, 2024). La presencia de suelos ácidos en la zona está asociada a la intensa lixiviación provocada por las lluvias estacionales, la escasa cobertura vegetal y las prácticas agrícolas tradicionales que no incluyen la reposición adecuada de nutrientes (Gómez et al., 2021). Estas condiciones conducen a una pérdida de bases intercambiables y a un incremento de la saturación de aluminio, lo que afecta directamente el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes esenciales como fósforo, calcio y magnesio (FAO, 2021).

Además, el cambio climático ha exacerbado la degradación de los suelos agrícolas en el Caribe seco, al intensificar los periodos de sequía y alterar los ciclos naturales de humedad

y temperatura (Morón et al., 2024). En consecuencia, los pequeños productores de municipios como San Juan del Cesar deben enfrentar suelos con pH bajos y escasa capacidad de intercambio catiónico, lo que repercute en rendimientos agrícolas insuficientes y en la disminución de la rentabilidad de sus sistemas de producción (Gómez et al., 2021). Ante este panorama, la adopción de estrategias de manejo correctivo del suelo, como el encalamiento con materiales locales y de bajo costo, se presenta como una alternativa técnica viable y ambientalmente sostenible

En la región de El Totumo, corregimiento de San Juan del Cesar (La Guajira), se ha identificado una creciente problemática relacionada con la acidez de los suelos agrícolas, condición que no solo limita la productividad de cultivos como el maíz, la yuca y otros productos básicos para la economía rural, sino que también genera impactos ambientales significativos. La acidez del suelo deteriora su estructura física, dificultando procesos esenciales como la infiltración del agua, la aireación y el desarrollo radicular, lo que disminuye la capacidad del suelo para sostener ecosistemas saludables (FAO, 2015). Asimismo, favorece la lixiviación de nutrientes y contaminantes hacia aguas subterráneas, aumentando el riesgo de contaminación hídrica. En zonas mineras o naturalmente ricas en metales, la acidez incrementa la movilidad y biodisponibilidad de metales pesados como aluminio y manganeso, con el consecuente riesgo de bioacumulación en la cadena alimentaria y afectaciones en la salud humana y ambiental (FAO, 2021), lo que exige un enfoque integral que aborde simultáneamente las dimensiones agrícolas, ambientales y sociales del problema, priorizando la sostenibilidad de los recursos naturales y la seguridad alimentaria de las comunidades locales.

1.1. Pregunta problema

¿Cuál de los materiales encalantes (cal agrícola, dolomita u óxido de calcio) resulta más efectivo en la corrección de la acidez del suelo, y cómo este proceso influye de manera indirecta en la mejora de sus propiedades fisicoquímicas en el corregimiento de El Totumo, San Juan del Cesar (La Guajira)?

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En los últimos años, el encalado se presenta como una práctica agrícola fundamental para la corrección de suelos ácidos, pues permite neutralizar el pH, mejorar la disponibilidad de nutrientes como calcio, magnesio y fósforo, y favorecer la actividad biológica en el suelo (Brady y Weil, 2019). Estudios recientes en Colombia y Latinoamérica han demostrado que el uso de cal agrícola, cal dolomítica y óxidos de calcio contribuye significativamente a incrementar la fertilidad y la productividad agrícola, siempre que se apliquen bajo criterios técnicos y adaptados a cada región (Calero et al., 2022; Castro y Juárez, 2024).

Asimismo, según Castro y Juárez (2024), la aplicación de enmiendas encalantes no solo contribuye a elevar el pH y mejorar la disponibilidad de nutrientes, sino que también favorece la actividad microbiana y la estructura física del suelo, potenciando su capacidad de retención de agua y su resiliencia frente a condiciones climáticas extremas. No obstante, la selección del tipo de material encalante y la dosis adecuada deben basarse en estudios experimentales que consideren las condiciones particulares de cada zona (Calero et al., 2022).

Dado lo anterior el proyecto buscó evaluar el uso de materiales encalantes (cal calcita, óxido de calcio, cal dolomita) para el tratamiento de suelos ácidos en El Totumo, San Juan del Cesar-Guajira. El presente proyecto representa un aporte significativo tanto al conocimiento como a la práctica agrícola en torno al manejo de suelos ácidos. En primer lugar, desde la dimensión académica y científica, la investigación generó información confiable sobre el comportamiento de suelos sometidos a distintos tratamientos de encalamiento. Este conocimiento fortalece la literatura existente en edafología y contribuirá a consolidar nuevas perspectivas sobre el manejo sostenible de los recursos edáficos, con énfasis en contextos regionales poco estudiados como el de La Guajira.

En el ámbito productivo y económico, el proyecto buscó brindar a los agricultores locales alternativas técnicas de bajo costo que permitan mejorar la productividad de cultivos básicos como el maíz y la yuca, los cuales constituyen pilares de la seguridad alimentaria y de la economía familiar en la región de La Guajira. La aplicación de prácticas de encalamiento adecuadas contribuyó a incrementar la rentabilidad de las unidades productivas, al tiempo que reducirá las pérdidas generadas por las limitaciones de los suelos ácidos. La identificación del

tipo de material encalante más eficiente (cal calcita, óxido de calcio o cal dolomita) permitió establecer parámetros técnicos ajustados a las condiciones agroecológicas locales, fomentando así un manejo sostenible y racional del recurso suelo.

De igual manera, el estudio ofrece un aporte significativo al fortalecimiento del conocimiento técnico y científico en el ámbito académico, al generar datos experimentales que contribuyen a la comprensión del comportamiento de los suelos ácidos frente a diferentes tipos de materiales encalantes. Estos resultados sirvieron como referencia para futuras investigaciones orientadas al manejo de la fertilidad del suelo y la mitigación de procesos de degradación edáfica en regiones con características similares. Además, la investigación promueve la integración entre la teoría y la práctica, fortaleciendo las competencias de análisis, interpretación de resultados y aplicación de metodologías experimentales en el campo de la ingeniería ambiental y agronómica.

Desde una perspectiva formativa, el proyecto también aporta a la formación de profesionales comprometidos con la sostenibilidad agrícola, al demostrar la importancia de la ciencia aplicada en la solución de problemáticas reales del territorio. Así, este trabajo no solo representa un avance técnico en el uso eficiente de materiales encalantes, sino que también constituye un ejercicio de investigación con impacto social, económico y académico, orientado al desarrollo rural sostenible y a la construcción de conocimiento pertinente para el contexto colombiano.



3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el uso de materiales encalantes (cal calcita, oxido de calcio, cal dolomita) para el tratamiento de suelos ácidos en El Totumo, San Juan del Cesar-Guajira

3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar las propiedades físico-químicas (pH, macronutrientes, CIC, textura, conductividad eléctrica) iniciales de muestras de suelo ácido de la zona de El Totumo, San Juan del Cesar

Establecer la dosis optima de los materiales de encalamiento seleccionados (cal calcita, oxido de calcio, cal dolomita) por medio del método buffer para el tratamiento del suelo ácido de la zona de El Totumo, San Juan del Cesar

Determinar la efectividad del uso de materiales encalantes (cal calcita, oxido de calcio, cal dolomita) para el tratamiento de suelos ácidos en El Totumo, San Juan del Cesar-Guajira



4. MARCO REFERENCIAL

El marco referencial constituye la base teórica y contextual de la investigación, ya que permite sustentar los conceptos, antecedentes y enfoques metodológicos relacionados con el tratamiento de suelos ácidos mediante el uso de materiales encalantes. A través de este apartado se recopila y analiza información proveniente de investigaciones previas, estudios técnicos y normativas que respaldan la pertinencia del proyecto. De igual manera, se busca establecer la relación entre los procesos de encalamiento, la mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo y el incremento de la productividad agrícola en regiones con condiciones similares a las de El Totumo, San Juan del Cesar. Este marco orienta la interpretación de los resultados y la formulación de estrategias sostenibles para el manejo eficiente del recurso suelo.

4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En primer lugar, Castro y Juárez (2024) desarrollaron la investigación titulada Estabilización de suelos de baja capacidad portante para caminos no pavimentados en Lambayeque, Perú. El objetivo principal fue evaluar la efectividad de la cal natural, la ceniza de briquetas de combustión provenientes de ladrilleras artesanales y la ceniza de cascarilla de arroz como materiales estabilizadores del suelo. La metodología empleada fue de tipo experimental, basada en la caracterización inicial de los suelos, la preparación de mezclas con diferentes proporciones de los materiales estabilizantes y la realización de ensayos de laboratorio para determinar parámetros como resistencia, plasticidad y capacidad de soporte. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en la capacidad portante y una reducción de la plasticidad, especialmente en los tratamientos con cal y ceniza de cascarilla de arroz. Este antecedente aporta a la presente investigación evidencias sobre la efectividad de materiales alternativos y de bajo costo en el mejoramiento de las propiedades físicas y químicas de suelos problemáticos.

Por otro lado, Barrios y García (2024) realizaron el estudio titulado Optimización de la estabilidad de suelos arcillosos mediante óxido de calcio en la subrasante de la carretera Huaraclla, Cajamarca. El objetivo fue determinar el efecto del óxido de calcio sobre la estabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de la carretera Huaraclla, ubicada en el distrito de Jesús, Cajamarca, entre los kilómetros 8 y 10, utilizando el Índice de Soporte California (CBR) como parámetro de evaluación. La metodología correspondió a un enfoque

experimental, mediante ensayos de laboratorio aplicados a muestras de suelo tratadas con diferentes proporciones de óxido de calcio, evaluando posteriormente la resistencia y capacidad de carga del terreno. Los resultados demostraron una mejora significativa en la estabilidad y resistencia mecánica del suelo tratado, evidenciando incrementos en los valores de CBR. Este estudio aporta a la investigación un referente técnico sobre el uso del óxido de calcio como material estabilizante y corrector de propiedades físicas del suelo.

Mamani et al. (2023) desarrollaron la investigación titulada Estabilización de la subrasante con ceniza de quinua y cal en la Carretera Lago Sagrado, Puno, Perú. El objetivo del estudio fue evaluar la efectividad de la ceniza de quinua combinada con cal en la estabilización de suelos de subrasante utilizados en infraestructura vial. La metodología empleada fue de tipo experimental, mediante la recolección de muestras de suelo y la elaboración de mezclas con diferentes proporciones de ceniza de quinua y cal, evaluando posteriormente propiedades físicas y mecánicas del suelo como plasticidad, compactación y capacidad de soporte. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en la resistencia y estabilidad de la subrasante, así como una disminución en la plasticidad del suelo tratado, demostrando la efectividad de la combinación de ambos materiales como alternativa sostenible y de bajo costo. Este antecedente aporta a la presente investigación fundamentos técnicos sobre el uso de enmiendas alternativas y materiales estabilizantes para mejorar las propiedades de suelos degradados y con limitaciones físico-químicas.

Además, García (2022) desarrolló la investigación titulada Estabilización de suelos con cal como alternativa viable para la construcción y rehabilitación de caminos rurales en Colombia. El objetivo fue analizar la estabilización de suelos mediante el uso de cal como alternativa para mejorar el estado de las vías terciarias y rurales del país. La metodología se basó en la revisión y análisis de propiedades físicas y mecánicas de suelos tratados con cal, considerando parámetros relacionados con plasticidad, humedad y capacidad portante. Los resultados evidenciaron que la aplicación de cal permitió disminuir la plasticidad y mejorar la capacidad de soporte de los suelos intervenidos, favoreciendo su estabilidad estructural. Este antecedente aporta fundamentos técnicos sobre el uso de la cal como material correctivo y estabilizante en suelos con limitaciones físico-químicas.

Por otro lado, Calero et al. (2022) realizaron el estudio titulado Efecto de la aplicación de tres enmiendas edáficas en las características químicas de dos suelos ácidos. El objetivo fue evaluar el efecto del carbonato de calcio, la ceniza y el biocarbón, aplicados en diferentes dosis y tiempos de incubación (30, 60 y 90 días), sobre las características químicas de dos suelos ácidos ubicados en las localidades de Dumarí y El Guabo, provincia de El Oro, Ecuador. La metodología empleada fue experimental, mediante la aplicación controlada de las enmiendas y la posterior evaluación de variables químicas del suelo como pH en KCl, conductividad eléctrica, carbono orgánico y materia orgánica. Los resultados mostraron incrementos en el pH y mejoras en las propiedades químicas del suelo, especialmente en los tratamientos con carbonato de calcio y biocarbón. Este antecedente aporta criterios técnicos importantes para la presente investigación, al demostrar la efectividad de distintas enmiendas en la recuperación de suelos ácidos y degradados.

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1 *El suelo como recurso natural*

El suelo constituye uno de los recursos naturales más importantes para la vida en el planeta, al ser el soporte físico y biológico de la producción agrícola y un componente esencial de los ecosistemas terrestres. Desde una perspectiva ecológica, el suelo cumple funciones fundamentales como el almacenamiento y provisión de agua, el reciclaje de nutrientes, el sustento de la biodiversidad edáfica y el mantenimiento del equilibrio de los ciclos biogeoquímicos (FAO, 2015). De esta manera, puede afirmarse que el suelo no solo es un medio de producción, sino también un elemento clave para la regulación ambiental y el bienestar humano.

La clasificación de los suelos suele realizarse en función de características como la textura (proporción de arena, limo y arcilla), la estructura (arreglo de las partículas en agregados) y la fertilidad (capacidad para suministrar nutrientes a las plantas). La textura influye directamente en la retención de agua y nutrientes: los suelos arenosos tienden a ser más permeables, pero menos fértiles, mientras que los arcillosos presentan mayor capacidad de intercambio catiónico, aunque con limitaciones en aireación y drenaje (Brady y Weil, 2019). Por su parte, la estructura del suelo determina la estabilidad de los agregados y, con ello, la facilidad de penetración de las raíces y el movimiento del agua.

La fertilidad del suelo es un aspecto central para la producción agrícola, ya que define la capacidad del suelo para sostener cultivos de manera continua. Un suelo fértil debe contar con una adecuada reserva de nutrientes esenciales, un pH cercano a la neutralidad, buena actividad biológica y un balance apropiado entre materia orgánica y minerales (Mamani, 2023). Cuando estos factores se ven comprometidos, disminuye la productividad y se hace necesario implementar prácticas de manejo como la fertilización o el encalado.

En el contexto colombiano, los suelos presentan una amplia diversidad edafológica debido a las condiciones climáticas, topográficas y geológicas del país. Sin embargo, una proporción significativa de los suelos agrícolas presenta problemas de acidez, bajos contenidos de fósforo y deficiencias en bases intercambiables (IGAC, 2020). En la región Caribe, y particularmente en La Guajira, los suelos suelen estar influenciados por condiciones climáticas de aridez y semi-aridez, lo cual se traduce en limitaciones en materia de retención hídrica, fertilidad y salinidad en algunos casos. Estos factores hacen necesario un manejo cuidadoso del recurso suelo, orientado a mejorar sus condiciones físico-químicas y garantizar la sostenibilidad de la producción agropecuaria (FAO, 2025).

4.2.3 Acidez del suelo

La acidez del suelo se refiere a la condición química en la que el pH del suelo se encuentra en valores bajos, generalmente inferiores a 5,5. El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno (H^+) en la solución del suelo y determina la disponibilidad de nutrientes, la toxicidad de ciertos elementos y la actividad de los microorganismos. En términos generales, los suelos se consideran ácidos cuando el pH es menor a 6, moderadamente ácidos entre 5 y 5,5, y fuertemente ácidos por debajo de 5 (FAO, 2021).

La acidez del suelo puede originarse por diferentes causas. Entre las más comunes se encuentran los procesos de lixiviación de bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) en regiones de alta pluviosidad, el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados amoniacales que generan protones durante su nitrificación, la descomposición de la materia orgánica que libera ácidos orgánicos, y la influencia del material parental con bajo contenido de minerales básicos (Porta, 2003). En climas tropicales como los de gran parte de Colombia, la acidez del suelo es un fenómeno recurrente debido a la intensa meteorización y lavado de nutrientes (IGAC, 2020).

Los problemas asociados a la acidez son múltiples y afectan de manera directa la producción agrícola. Uno de los principales es la toxicidad por aluminio (Al^{3+}) y manganeso (Mn^{2+}), elementos que a pH bajos se solubilizan en exceso y pueden dañar las raíces, reduciendo la absorción de agua y nutrientes (FAO, 2021). Asimismo, la acidez reduce la disponibilidad de nutrientes esenciales como calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P) y molibdeno (Mo), los cuales son fundamentales para el desarrollo vegetal. A nivel biológico, los suelos ácidos limitan la actividad de microorganismos beneficiosos como los fijadores de nitrógeno, disminuyendo la mineralización de la materia orgánica y afectando el ciclo de nutrientes (Barrios y García, 2024)

En cuanto a su distribución, los suelos ácidos son ampliamente predominantes en regiones tropicales y subtropicales del mundo, cubriendo aproximadamente el 30 % de las tierras agrícolas globales (FAO, 2021). Según el (IGAC), gran parte de los suelos presentan acidez moderada a fuerte, especialmente en las regiones Andina y Amazónica, mientras que en la región Caribe, aunque existen zonas con suelos neutros o ligeramente alcalinos, se encuentran también áreas con problemas de acidez, lo que afecta la productividad agropecuaria y hace necesario implementar prácticas de corrección como el encalado (IGAC, 2020).

4.2.4 Encalado de suelos ácidos

El encalado es una práctica de manejo agrícola utilizada para corregir la acidez del suelo mediante la aplicación de materiales alcalinos ricos en calcio y/o magnesio, como la cal agrícola, la cal dolomita y el óxido de calcio. Su principal finalidad es elevar el pH del suelo, disminuir la toxicidad ocasionada por el aluminio intercambiable y mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal (Mamani, 2023). Esta práctica es ampliamente utilizada en sistemas agrícolas tropicales debido a la alta incidencia de suelos ácidos y degradados.

La acidez del suelo representa una de las principales limitantes para la productividad agrícola, ya que reduce la disponibilidad de nutrientes y favorece la solubilización de elementos tóxicos como el aluminio (Al^{3+}) y el manganeso (Mn^{2+}). En este contexto, el encalado actúa neutralizando los iones hidrógeno presentes en la solución del suelo y precipitando el aluminio tóxico, lo cual favorece un ambiente químico más adecuado para el crecimiento radicular y la absorción de nutrientes (Calero et al., 2022).

De acuerdo con García (2022), la aplicación de materiales encalantes incrementa el pH del suelo y mejora las condiciones químicas necesarias para una adecuada disponibilidad de calcio, magnesio y fósforo. Además, contribuye al aumento de la capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE), favoreciendo la retención de nutrientes y reduciendo pérdidas por lixiviación.

Diversas investigaciones recientes han demostrado la efectividad del encalado en la recuperación de suelos degradados. En este sentido, Calero et al. (2022) evaluaron el efecto de diferentes enmiendas edáficas sobre suelos ácidos y encontraron incrementos significativos en el pH y mejoras en las propiedades químicas del suelo tras la aplicación de carbonato de calcio y biocarbón. De igual manera, Barrios y García (2024) evidenciaron que la aplicación de óxido de calcio mejoró las propiedades físico-químicas y la estabilidad de suelos arcillosos, incrementando la capacidad de soporte del terreno.

Por su parte, Mamani Gonzalo et al. (2023) demostraron que la combinación de cal con ceniza de quinua permitió disminuir la plasticidad y aumentar la resistencia mecánica de suelos de subrasante en Perú, destacando el potencial de las enmiendas alcalinas como alternativa sostenible para el mejoramiento de suelos degradados. Asimismo, García (2022) concluyó que la estabilización de suelos mediante cal constituye una alternativa viable para mejorar las condiciones de vías rurales y terrenos agrícolas con limitaciones químicas y estructurales.

En términos agrícolas, el encalado aporta múltiples beneficios, entre ellos el incremento de la disponibilidad de nutrientes esenciales, la reducción de la toxicidad por aluminio, el mejoramiento de la actividad microbiológica y el favorecimiento del desarrollo radicular. Estas mejoras se traducen en mayores rendimientos y en una recuperación progresiva de la fertilidad del suelo, especialmente en regiones tropicales donde predominan condiciones de acidez moderada y fuerte. Por esta razón, el encalado constituye una estrategia fundamental para el manejo sostenible y la recuperación de suelos ácidos en sistemas productivos agrícolas.

4.2.5 Materiales encalantes

Los materiales encalantes son sustancias de origen mineral utilizadas para corregir la acidez del suelo mediante la neutralización de los iones hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{3+}) presentes en la solución del suelo. Estos materiales contienen principalmente compuestos de

calcio y magnesio capaces de incrementar el pH, mejorar la disponibilidad de nutrientes y disminuir la toxicidad generada por elementos ácidos. Entre los materiales encalantes más utilizados en agricultura se encuentran la cal dolomita, la cal calcita y el óxido de calcio, los cuales presentan diferencias en su composición química, velocidad de reacción y capacidad neutralizante (Calero et al., 2022).

Este material se caracteriza por aportar simultáneamente calcio (Ca) y magnesio (Mg), siendo especialmente recomendado en suelos con deficiencias de magnesio o con desequilibrios en las bases intercambiables. Su acción neutralizante contribuye a incrementar el pH y reducir la toxicidad por aluminio, mejorando la fertilidad del suelo y favoreciendo el desarrollo de los cultivos. Diversos estudios han señalado que la cal dolomita presenta efectos positivos sobre la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad química del suelo, especialmente en regiones tropicales con altos niveles de acidez (Calero et al., 2022).

Este material posee una elevada capacidad neutralizante y una acción más rápida en comparación con otros encalantes, debido a su alta solubilidad y reactividad química. El óxido de calcio reacciona rápidamente con el agua y los protones del suelo, favoreciendo un incremento acelerado del pH y disminuyendo la concentración de aluminio intercambiable. Sin embargo, su manejo requiere precaución debido a su naturaleza cáustica y a la posibilidad de generar cambios bruscos en las condiciones químicas del suelo (Barrios y García, 2024). A pesar de ello, investigaciones recientes han demostrado que el uso controlado de óxido de calcio mejora significativamente la estabilidad y capacidad de soporte de los suelos arcillosos.

La cal calcita, también denominada carbonato de calcio, es uno de los materiales encalantes más utilizados en la agricultura debido a su disponibilidad y facilidad de aplicación.

Este material actúa neutralizando la acidez del suelo y aportando calcio disponible para las plantas. A diferencia de la cal dolomita, la cal calcita presenta un bajo contenido de magnesio, por lo que su uso resulta más apropiado en suelos donde no existen deficiencias de este elemento. Su principal ventaja radica en la capacidad de corregir gradualmente el pH sin producir cambios drásticos en el equilibrio químico del suelo, favoreciendo condiciones adecuadas para la actividad microbiológica y la disponibilidad de fósforo (Barrios y García, 2024).

Las diferencias entre los materiales encalantes se relacionan principalmente con su composición química, capacidad de neutralización y velocidad de reacción. Mientras la cal dolomita aporta calcio y magnesio de manera equilibrada, el óxido de calcio ofrece una corrección más rápida de la acidez, y la cal calcita proporciona una acción correctiva más moderada enfocada principalmente en el aporte de calcio. La selección del material adecuado depende de las características químicas del suelo, el nivel de acidez y las necesidades nutricionales del cultivo (Barrios y García, 2024).

Diversas investigaciones recientes han demostrado la efectividad de estos materiales en la recuperación de suelos degradados y ácidos. Mamani Gonzalo et al. (2023) evidenciaron mejoras significativas en la estabilidad de suelos tratados con cal, mientras que García (2022) destacó el uso de materiales encalantes como alternativa sostenible para mejorar propiedades físico-químicas de suelos destinados a infraestructura y producción agrícola. Asimismo, Calero et al. (2022) concluyeron que las enmiendas basadas en carbonato de calcio generan incrementos importantes en el pH y favorecen la disponibilidad de nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal.

4.3. MARCO CONCEPTUAL

Acidez intercambiable: Es la fracción de acidez del suelo asociada principalmente con el aluminio y el hidrógeno adsorbidos en el complejo de cambio. Su reducción mediante encalado es crucial para mejorar el crecimiento radicular y la absorción de nutrientes (Sumner & Noble, 2003).

Cal agrícola (CaCO_3): La cal agrícola es un material pulverizado rico en carbonato de calcio, utilizado para neutralizar la acidez del suelo. Su efectividad depende de su pureza química y del tamaño de partícula que determine su solubilidad (Fageria & Baligar, 2008).

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): La CIC corresponde a la habilidad del suelo para retener y liberar cationes como calcio, magnesio, potasio y sodio. Un suelo con mayor CIC puede mantener más nutrientes disponibles para las plantas, favoreciendo la fertilidad (Landon, 2014).

Dolomita: La dolomita es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), empleado como enmienda agrícola. Además de corregir la acidez, aporta magnesio, un nutriente esencial para la fotosíntesis (Tisdale et al., 2011).

Encalado: El encalado de suelo consiste en agregar compuestos químicos de uso agrícola que contengan calcio, con el objetivo de que sean capaces de corregir la acidez y neutralizar el pH del suelo para cultivo (AEFA, 2022).

Fertilidad del suelo: La fertilidad del suelo es la capacidad que tiene para suministrar nutrientes en cantidad y proporción adecuadas para el crecimiento vegetal. Depende de factores químicos, físicos y biológicos interrelacionados (FAO, 2021).

Óxido de calcio (CaO): El óxido de calcio, conocido como cal viva, es un material encalante de alta reactividad y rápida acción en la neutralización del pH del suelo. No obstante, requiere precauciones de manejo debido a su causticidad (López & Martínez, 2020).

pH del suelo: El pH del suelo es una medida de la concentración de iones hidrógeno en la solución del suelo y constituye un indicador clave de su acidez o alcalinidad. Este factor controla la disponibilidad de nutrientes esenciales y la toxicidad de elementos como el aluminio y el manganeso (Brady y Weil, 2019).

Producción agrícola: La producción agrícola es el resultado de la explotación de la tierra para obtener bienes, principalmente, alimentos como cereales y diversos tipos de vegetales (Westreicher, 2020).

Requerimiento de cal (RC): El requerimiento de cal se define como la cantidad de enmienda necesaria para llevar el pH del suelo a un rango óptimo (generalmente 6,0–6,5). Este valor se determina mediante métodos de laboratorio como el buffer SMP (Kamprath, 1970).

Saturación de bases: La saturación de bases se refiere al porcentaje de sitios de intercambio catiónico ocupados por nutrientes básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+). Un valor bajo indica suelos ácidos y pobres en nutrientes, mientras que un valor alto refleja mayor fertilidad (Havlin et al., 2014).

Sostenibilidad: La sostenibilidad se basa en el principio de asegurar las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, siempre sin renunciar

a la protección del medioambiente, el crecimiento económico y el desarrollo social (BBVA, 2025).

Suelo ácido: Los suelos ácidos se refieren aquellos que contienen un pH de valor inferior a 5,5 durante la mayor parte del año. Están asociados con un número de toxicidades (Aluminio) y deficiencias (Molibdeno) y otras condiciones restringentes para las plantas (FAO, 2025).

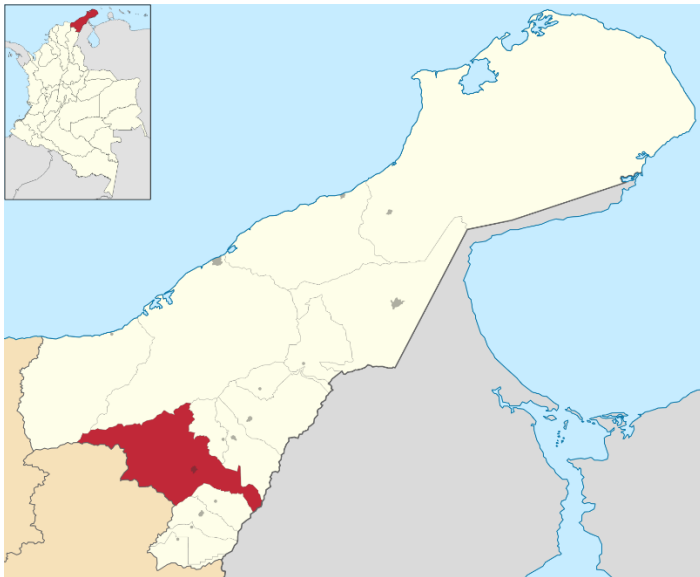
Valor Neutralizante Relativo (RNV): El RNV es un indicador de la efectividad de un material encalante, calculado a partir de su capacidad de neutralización química (CCE) y de la finura de las partículas. Permite comparar diferentes tipos de cales y ajustar las dosis (Caamal et al., 2025).

4.4. MARCO CONTEXTUAL

El municipio de San Juan del Cesar se localiza en el sur del departamento de La Guajira, en la subregión del valle del río Cesar. Se caracteriza por un clima cálido-seco, con temperaturas promedio que oscilan entre 26 °C y 29 °C, y una marcada estacionalidad de lluvias que se concentran principalmente entre los meses de abril–mayo y septiembre–noviembre. Su economía está basada en la agricultura y la ganadería, destacándose cultivos como maíz, yuca, frijol, sorgo y frutales, además de la producción de café en las zonas de mayor altitud de la Sierra Nevada de Santa Marta (alcaldía de San Juan, La Guajira, 2025). La figura 1 refiere la ubicación del municipio de San Juan.

Figura 1. *Municipio de San Juan*



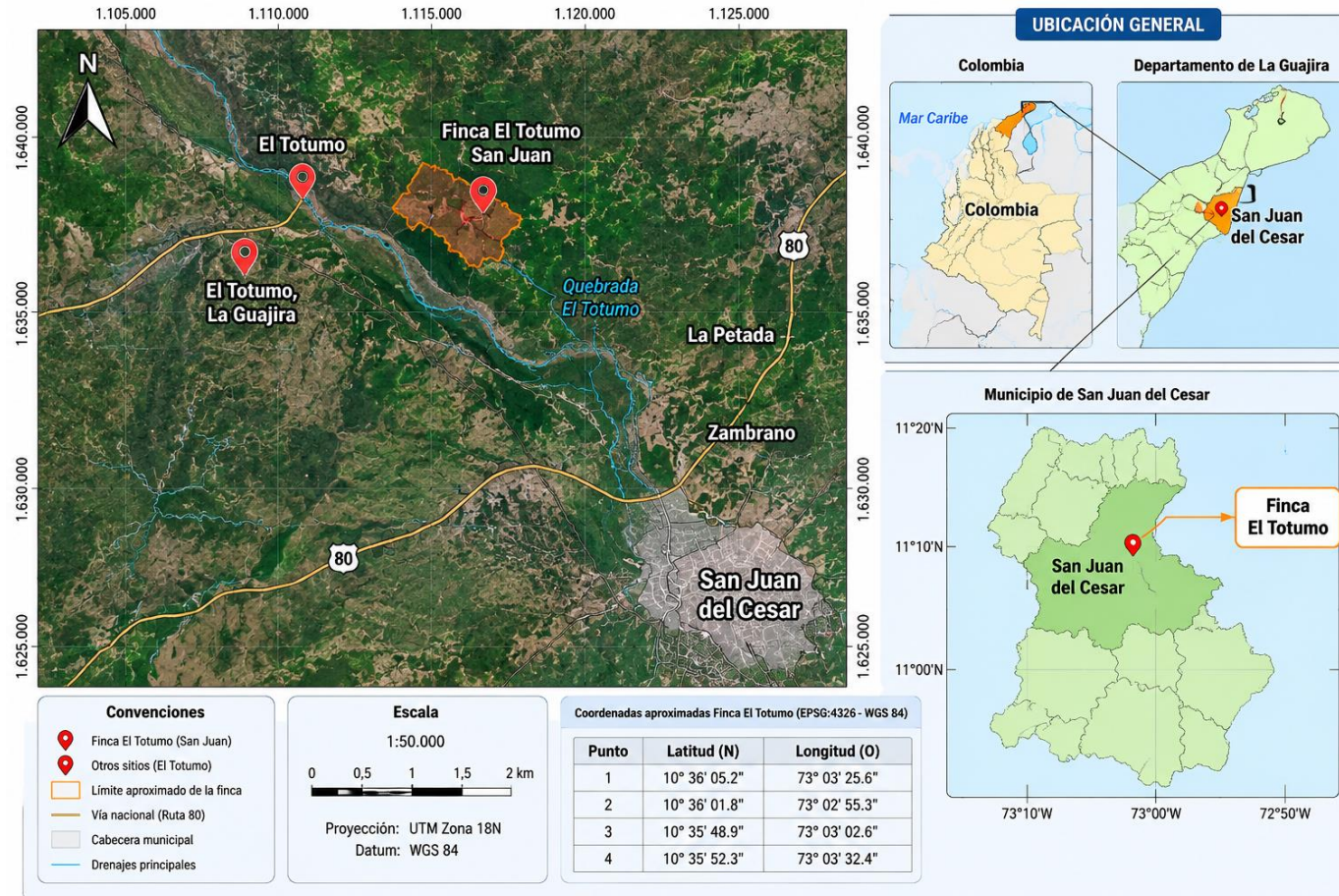


Nota: Tomado de Google maps, 2026

En el territorio predomina un relieve plano a ligeramente ondulado, con suelos que en muchas áreas presentan problemas de acidez y baja fertilidad, lo cual limita el desarrollo agrícola si no se implementan prácticas adecuadas de manejo. El municipio, además, cuenta con una riqueza cultural importante, reflejada en sus festividades, música vallenata y tradiciones campesinas, lo que lo convierte en un lugar representativo de la identidad guajira (alcaldía de San Juan, La Guajira, 2025).

El estudio se desarrollará en la finca "El Totumo", ubicada en la zona rural de San Juan del Cesar, en un área dedicada principalmente a la producción agrícola de pancoger y forrajes. La finca cuenta con una extensión aproximada de 15 hectáreas, de las cuales una parte presenta suelos ácidos con limitaciones de fertilidad, afectando el crecimiento y rendimiento de los cultivos tradicionales. El predio se encuentra en una zona de relieve plano, con acceso a fuentes de agua estacionales y caminos veredales que facilitan el ingreso de insumos agrícolas (Ver figura 2)

Figura 2. *Ubicación de la finca El Totumo.*



Fuente: Elaborado por los autores, 2026 con información tomada de la alcaldía de San Juan, La Guajira, (2025)

4.5 MARCO LEGAL

Tabla 1. *Normatividad del proyecto*

Norma	Descripción	Aplicabilidad al proyecto
Constitución Política de Colombia (1991), Art. 79 y 80	Reconoce el derecho a gozar de un ambiente sano y establece el deber del Estado de planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para el DS (Congreso de la República, 1991).	Fundamenta la protección de los suelos y el desarrollo de proyectos de manejo sostenible como el encalado agrícola.
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio de Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Introduce el principio de desarrollo sostenible (Congreso de la República, 1993).	Regula las actividades que puedan afectar los recursos naturales y respalda la necesidad de proyectos que mejoren la calidad del suelo.
Ley 388 de 1997	Regula el ordenamiento territorial en Colombia. Establece lineamientos para el uso adecuado del suelo (Congreso de la República, 1997).	Orienta el uso del suelo agrícola bajo criterios de sostenibilidad y ordenamiento en municipios como San Juan del Cesar.
Ley 115 de 1994 Art. 5 y 14	Establece la educación ambiental como obligatoria en todos los niveles educativos (Ministerio de Educación Nacional, 1994).	Permite articular el proyecto con programas de educación ambiental comunitaria sobre conservación de suelos.
Ley 1876 de 2017	Promueve la innovación y adopción de tecnologías para el desarrollo sostenible del sector agropecuario (Congreso de la República, 2017).	Respaldar el uso de enmiendas como la cal agrícola dentro de prácticas de manejo sostenible de suelos.

Decreto 2811 de 1974	Regula el manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales (Ministerio de Agricultura, 1974).	Permite enmarcar el manejo de suelos dentro de la normativa ambiental vigente.
Decreto 1076 de 2015	Compila la normatividad ambiental en Colombia. Incluye disposiciones sobre suelo, agua, biodiversidad y licenciamiento ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).	Aplica a la gestión integral del recurso suelo y a la evaluación de impactos ambientales del proyecto.
Resolución 0316 de 2018 – ICA	Regula los requisitos para el registro de productos acondicionadores de suelo y enmiendas agrícolas (ICA, 2018).	Directamente aplicable, ya que los materiales encalantes (cal dolomita, calcita, óxido de calcio) son enmiendas de uso agrícola.
Resolución 150 de 2003 – MAVDT	Adopta la política para el uso eficiente y sostenible de los suelos agrícolas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2003).	Sirve como base para garantizar que el proyecto de encalado contribuya al uso sostenible del recurso suelo.
Resolución 0241 de 2011 – ICA	Establece requisitos fitosanitarios para la comercialización y uso de fertilizantes y acondicionadores de suelos en Colombia (ICA, 2011).	Regula el uso responsable de los materiales encalantes empleados en el proyecto.

Nota: La información presentada en esta tabla se recopiló de fuentes oficiales del Gobierno de Colombia, incluyendo documentos normativos disponibles en los portales del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, y el Congreso de la República de Colombia. Las descripciones fueron elaboradas con base en la interpretación técnica de los textos legales aplicables al manejo sostenible de suelos agrícolas y la corrección de su acidez en el marco del presente estudio.

5. MARCO METODOLÓGICO

5.1. LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN

Según el acuerdo 003 del 2021, por medio del cual se adoptan las líneas de investigación de los programas de pregrado de la facultad de ingeniería y tecnológicas, la línea- sublínea y área temática del presente proyecto de investigación son:

Tabla 2. Línea de investigación

PROGRAMA	LÍNEA DE INVESTIGACION	SUBLÍNEA DE INVESTIGACION	ÁREA TEMÁTICA
Ingeniería ambiental y sanitaria	Sostenibilidad y Gestión Ambiental	Gestión integral del suelo.	Proceso de restauración, preservación y conservación de los suelos.

Nota: Elaborado por los autores, 2025

5.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se fundamentó en un enfoque cuantitativo, ya que se trabajó con variables independientes el tipo de material encalante a utilizar y variables dependientes el pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes, que se expresan en valores numéricos, permitiendo establecer relaciones estadísticas entre ellas. De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), el enfoque cuantitativo se caracterizó por la recolección y análisis de datos medibles con el propósito de describir patrones, probar hipótesis y establecer asociaciones causales.

Asimismo, este enfoque permitió medir de forma objetiva los cambios físico-químicos que se presenten tras la aplicación de los tratamientos, utilizando análisis de laboratorio y técnicas estadísticas que facilitan la interpretación de los resultados de manera sistemática y replicable.

5.3 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance del presente estudio fue de tipo correlacional, dado que buscó determinar el grado de relación entre el tipo y dosis de material encalante (cal calcita, óxido de calcio, cal dolomita) y los cambios observados en el pH y en la disponibilidad de nutrientes del suelo.

Según Sampieri et al. (2014), los estudios correlacionales permiten medir la relación o el grado de asociación entre dos o más variables dentro de un contexto específico, sin manipularlas directamente. En este sentido, la investigación no solo describió las características del suelo ácido, sino que analizó la correspondencia entre los diferentes tratamientos de encalamiento y su efectividad en la corrección de la acidez, con el fin de establecer patrones técnicos aplicables a la mejora de la productividad agrícola en la zona de estudio.

5.4 POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población objeto de estudio correspondió a los suelos del corregimiento de El Totumo, en el municipio de San Juan del Cesar, La Guajira, específicamente aquellos dedicados a cultivos de yuca que presentan altos niveles de acidez debido a prácticas agrícolas continuas y no rotativas. De acuerdo con Bernal (2010), la población de investigación se define como el conjunto total de elementos que poseen características comunes y sobre los cuales se pretende realizar inferencias. En este caso, los suelos ácidos agrícolas del corregimiento representaron la unidad de análisis central, sobre la cual se busca evaluar la respuesta al encalamiento con distintos materiales.

5.5 MUESTRA POBLACIONAL

La muestra estuvo constituida por una mezcla homogénea de submuestras de suelo recolectadas en el lote de estudio, con un peso total de 5 kg, cantidad suficiente para los análisis de laboratorio de los parámetros físico-químicos seleccionados. La selección se realizó mediante muestreo aleatorio simple, técnica que, según Arias (2012), otorga a cada unidad de la población la misma probabilidad de ser seleccionada, lo cual garantiza la representatividad de los resultados y minimiza el sesgo experimental. La aplicación de esta técnica permitió que los resultados reflejen de manera precisa las condiciones generales del suelo agrícola del área de estudio, fortaleciendo la validez de los hallazgos.

5.6 DESARROLLO METODOLÓGICO

En este proyecto se utilizó una metodología experimental, el cual hace que se califique el proceso que se llevará a cabo y su viabilidad en la aplicación. Las actividades para conseguir este fin fueron:

Actividad Transversal: Revisión de Literatura

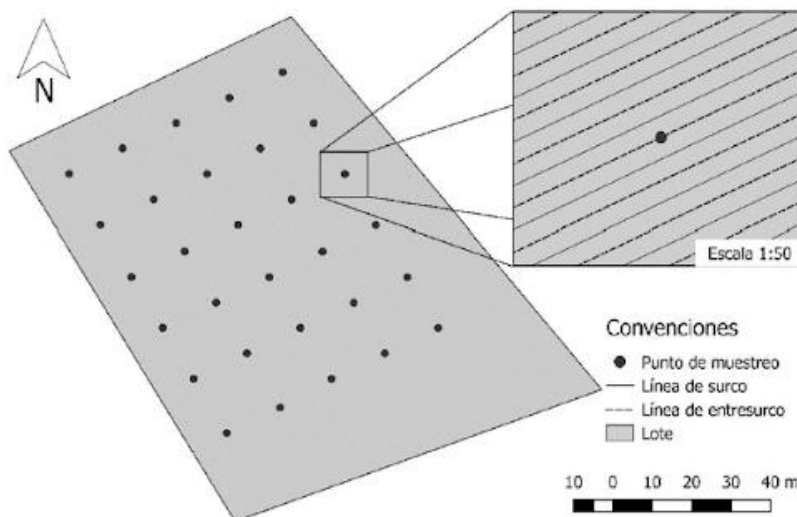
Descripción: La revisión de literatura se desarrolló de manera transversal a todas las fases del proyecto, con el fin de garantizar un sustento teórico y metodológico sólido. Esta actividad permitió identificar los avances más recientes, las mejores prácticas, las tendencias metodológicas y los resultados obtenidos en estudios similares relacionados con la temática del proyecto. El proceso incluyó la búsqueda sistemática en bases de datos científicas (Scopus, Web of Science, Google Scholar, ScienceDirect) y en documentos institucionales (políticas públicas, planes de acción, normativas) relevantes para el contexto nacional e internacional.

5.6.1 Caracterizar las propiedades físico-químicas (pH, macronutrientes, CIC, textura, conductividad eléctrica) iniciales de muestras de suelo ácido de la zona de El Totumo, San Juan del Cesar

Actividad 1.1 Selección de puntos de muestreo

Se delimitó el área de estudio en El Totumo y se seleccionarán los puntos de muestreo siguiendo un diseño estratificado por uso del suelo (áreas cultivadas, barbecho y potreros) para asegurar representatividad. Sobre el terreno se trazaron parcelas piloto y se georreferenció cada punto con GPS; en cada parcela se asignó un identificador único que fue registrado en la ficha de campo (ID, coordenadas, fecha, tipo de uso, observaciones). La figura 3 refiere ejemplo de la selección de los puntos de muestreo en el suelo.

Figura 3. *Ejemplo de selección de puntos de muestreo*



Nota: Tomado del estudio de Erazo et al., (2022).

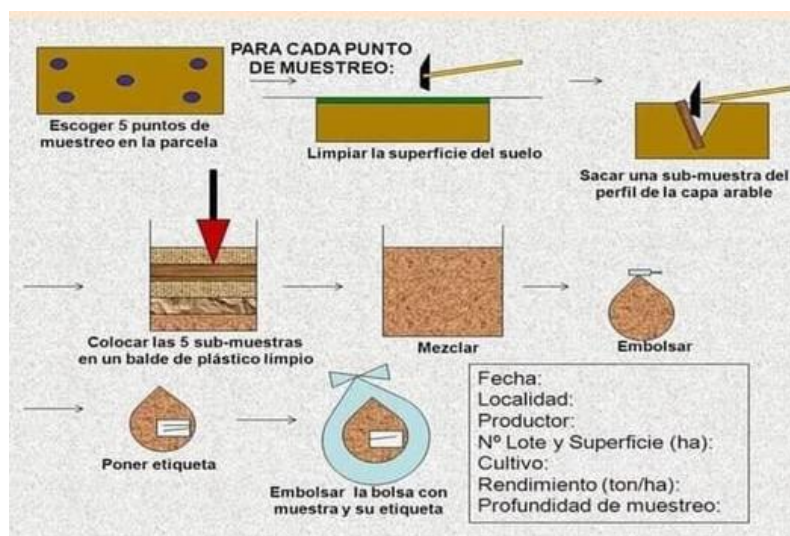
El muestreo fue planificado para cubrir la heterogeneidad espacial de la zona, definiendo un número fijo de unidades muestrales compuestas (por ejemplo 10 puntos compuestos) según la extensión y variabilidad detectada en la visita previa.

Actividad 1.2 Toma de muestras

En cada punto seleccionado se tomaron submuestras siguiendo un patrón sistemático (p. ej. zig-zag o cruz) a la profundidad definida para el horizonte de trabajo (0–20 cm). Las submuestras (5 por punto) se mezclaron homogéneamente en campo para conformar la muestra compuesta representativa (~1 kg). Se tomó como base la guía del IDEAM.

Se retiró la hojarasca, se emplearon herramientas limpias (barreno o pala de acero inoxidable) y se documentó la cadena de custodia (quién tomó la muestra, hora, condiciones). Cada muestra fue etiquetada con su código y almacenada en bolsas plásticas limpias; se tomaron fotografías y se registrarán observaciones visuales de textura y presencia de raíces o agua superficial. La figura 4 permite conocer como se realiza la toma de muestras de suelo según el IDEAM.

Figura 4. Ejemplo de toma de muestras de suelo



Nota: Adaptado del IDEAM

Actividad 1.3 Caracterización físico-química en laboratorio

Las muestras se acondicionaron en laboratorio: secado al aire a sombra, molienda y tamizado a 2 mm; se obtuvieron submuestras específicas para análisis de fracciones finas (<0,5 mm) cuando el método lo requiera. La Tabla 3 sintetiza los parámetros a evaluar y sus métodos.

Se procedió a la medición de pH, conductividad eléctrica, textura, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico (CIC/CEC), aluminio intercambiable y macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg). Los datos fueron volcados en una base de datos con el ID de muestra para permitir el análisis descriptivo y la comparación posterior con los resultados finales post-encalamiento

Tabla 3. *Métodos para la caracterización fisicoquímica*

Parámetro	Unidad	Método / Extractante	Preparación de muestra	Equipo / Técnica
pH suelo	pH	Suspensión 1:2.5 suelo: agua (o pH CaCl ₂ 0.01 M si se prefiere)	Secado al aire, tamiz 2 mm; mezcla suelo: agua	Potenciómetro (pH- metro) calibrado
Conductividad eléctrica (CE)	dS/m	Extracto suelo: agua	1:5 Secado, tamiz 2 mm	Conductímetro
Textura (arena/limo/arcilla)	%	Método hidrómetro de Bouyoucos (o pipeta)	Secado, eliminación de materia orgánica y dispersante	Hidrómetro / pipeta
Materia orgánica (MO)	%	Walkley-Black (oxidación química)	Fracción <2 mm, secado	Espectrofotómetro / Analizador TOC

			combustión (TOC)		
Capacidad de intercambio catiónico (CIC / CEC)	cmolc/kg	Extracción con acetato de amonio 1N	pH 7	Fracción <2 mm	Titulación / AAS / ICP para cationes
Aluminio intercambiable (Al ³⁺)	cmolc/kg	Extractante KCl 1M (o similar)		Fracción <2 mm	AAS / ICP
Calcio (Ca ²⁺) y Magnesio (Mg ²⁺) intercambiables	cmolc/kg o mg/kg	En el extracto de (NH ₄ OAc)	CIC	Fracción <2 mm	AAS / ICP
Potasio intercambiable (K ⁺)	cmolc/kg o mg/kg	Extracto NH ₄ OAc Mehlich		Fracción <2 mm	Fotometría de llama / AAS
Nitrógeno total (N)	% o mg/kg	Kjeldahl o Dumas (combustión)		Fracción <0.5 mm (si requiere)	Equipo Kjeldahl / Analizador elemental
Fósforo disponible (P)	mg/kg	Bray I (suelos ácidos) Mehlich-1/3		Fracción <2 mm	Espectrofotómetro (azul de molibdato) / ICP
pH en CaCl ₂ (opcional)	pH	CaCl ₂ 0.01 M (1:2.5)		Igual que pH agua	Potenciómetro
Conductividad de saturación (opcional)	dS/m	Extracto por pasto saturado		Preparación de pasta saturada	Conductímetro

Nota: Elaborado por el autor, 2025

5.6.2 Establecer la dosis óptima de los materiales de encalamiento seleccionados (cal calcita, óxido de calcio, cal dolomita) por medio del método buffer para el tratamiento del suelo

Actividad 2.1 Determinación del requerimiento de cal teórico

La primera actividad consistió en calcular cuánta cal necesita el suelo para corregir su acidez. Para eso se utilizó un método de laboratorio conocido como *método buffer* (SMP), que básicamente mide la capacidad del suelo de resistir cambios de pH.

El método más utilizado para determinar el requerimiento de cal en suelos ácidos es el método SMP (Shoemaker et al., 1961).

- La solución *buffer* SMP es una mezcla química que contiene varios compuestos (p-cresol, cloruro de calcio, trietanolamina, entre otros).
- Esta solución tiene un pH inicial conocido (cerca de 7,5).
- Al ponerse en contacto con el suelo ácido, el pH de la solución disminuye en mayor o menor grado, dependiendo de la capacidad tampón del suelo (es decir, qué tanto resiste a cambiar su acidez). Entre más bajo el pH del buffer, más cal necesita el suelo.

En la práctica, en el laboratorio se mezcló la muestra de suelo inicial con la solución especial (*buffer*), mide el pH resultante y, según el valor obtenido, se consulta una tabla que indica la cantidad de cal necesaria por hectárea (t/ha) para llevar el suelo al nivel de pH deseado (usualmente cercano a 6 o 6,5). La Tabla 4 permite conocer la dosis de cal según el pH buffer.

Tabla 4. *Tabla de pH*

pH del buffer SMP	Dosis de cal (t/ Ha, equivalente CaCO ₃ puro)
6.8 – 7.2	0 – 1
6.4 – 6.7	1 – 2
6.0 – 6.3	2 – 3

5.6 – 5.9	3 – 4
5.2 – 5.5	4 – 5
< 5.2	> 5

Nota: Adaptado de McLean, 1982 y prácticas del ICA/Agrosavia

Actividad 2.2 Cálculo del RNV (Valor Neutralizante Relativo)

No todas las cales tienen la misma capacidad para neutralizar la acidez, porque dependen de su pureza química y del grado de molienda (qué tan finas son las partículas). Para poder comparar materiales diferentes (cal calcítica, óxido de calcio, cal dolomítica), se utilizó un indicador llamado RNV o *Valor Neutralizante Relativo*.

El RNV se calcula con la fórmula:

Ecuación 1. Cálculo del RNV

$$\text{RNV} = \text{CCE} \times \text{finura relativa}$$

donde:

- CCE = *Capacidad de neutralización química* del material (qué porcentaje equivale al carbonato de calcio puro, CaCO_3).
- Finura relativa = mide qué tan molido está el material; entre más fino, más rápido reacciona en el suelo.

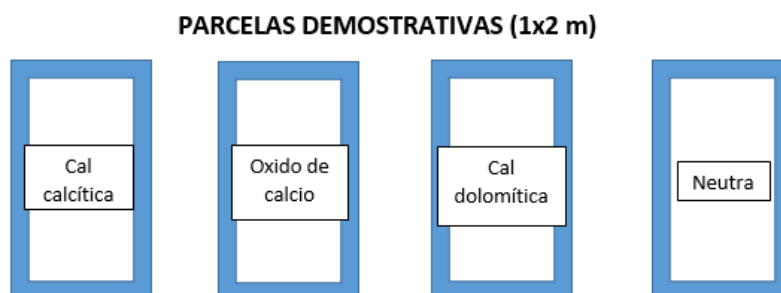
Actividad 2.3 Aplicación de los diferentes tratamientos.

Para una correcta aplicación de los tratamientos, se dispuso de 4 espacios de 1x2 metros donde a cada una se le aplicará un tratamiento con la respectiva dosis y se evaluó el comportamiento en cada una de ellas de acuerdo al material encalante aplicado. Esto se hizo durante un periodo de prueba de 3 meses para que los resultados sean notorios y se evidencie un efecto en el suelo tratado.

Asimismo, se llevó a cabo la siembra de *Cajanus cajan* (guandul) en tres parcelas experimentales, en las cuales se aplicarán diferentes tipos de cal como tratamiento de corrección del suelo (Ver Figura 5). De manera complementaria, se mantuvo una parcela control sin siembra ni enmienda, lo que permitió comparar el efecto real de las aplicaciones sobre las propiedades edáficas mediante las caracterizaciones realizadas.

La elección del guandul responde a que se trata de una leguminosa de rápido crecimiento y de hábito arbustivo, ampliamente reconocida por su capacidad de adaptación a suelos de baja fertilidad y condiciones de estrés. Además, al ser una especie fijadora de nitrógeno atmosférico, contribuye a la mejora natural de la fertilidad del suelo, lo que lo convierte en un cultivo estratégico para observar con mayor precisión los cambios generados por los diferentes tipos de cal aplicados.

Figura 5. Parcelas demostrativas



Nota: Elaborado por el autor, 2025

5.6.3 Determinar la efectividad del uso de materiales encalantes (cal calcita, oxido de calcio, cal dolomita) para el tratamiento de suelos ácidos en El Totumo, San Juan del Cesar-Guajira

Actividad 3.1 Caracterizar fisicoquímicamente suelos postratamiento

Después de aplicar los tratamientos de encalamiento y transcurrido el tiempo definido para que los materiales reaccionen en el suelo, se realizó una nueva caracterización físico-química de las muestras tratadas. En este análisis se midieron parámetros como pH, capacidad

de intercambio catiónico (CIC), conductividad eléctrica, disponibilidad de macronutrientes (Ca, Mg, K, P, N) y saturación de aluminio, con el fin de evaluar los cambios ocurridos en comparación con la caracterización inicial. Esta etapa permitió identificar qué materiales lograron mejorar en mayor medida la calidad química del suelo.

Actividad 3.2 determinar la efectividad por tratamiento

Con los resultados de la caracterización postratamiento, se procedió a comparar la efectividad de cada material encalante (cal calcita, óxido de calcio y cal dolomita). Para ello se establecieron indicadores de efectividad, tales como: incremento en el pH, reducción de la acidez intercambiable, aumento de la disponibilidad de calcio y magnesio, y mejoras en la saturación de bases. La comparación permitió definir cuál de los materiales ofrece un mayor beneficio en la corrección de la acidez y en la optimización de la fertilidad del suelo.

Actividad 3.3 Aplicar el diseño experimental

Los datos obtenidos de la caracterización postratamiento fueron analizados bajo el diseño experimental completamente al azar con repeticiones. Se aplicaron pruebas estadísticas adecuadas, en este caso la ANOVA, para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos y establecer cuál de los materiales es estadísticamente más eficiente en la corrección de la acidez del suelo. Esta fase aseguró que los resultados tengan validez científica y permitan emitir conclusiones confiables.



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.2 Caracterización de las propiedades físico-químicas (pH, macronutrientes, CIC, textura, conductividad eléctrica) iniciales de muestras de suelo ácido de la zona de El Totumo, San Juan del Cesar

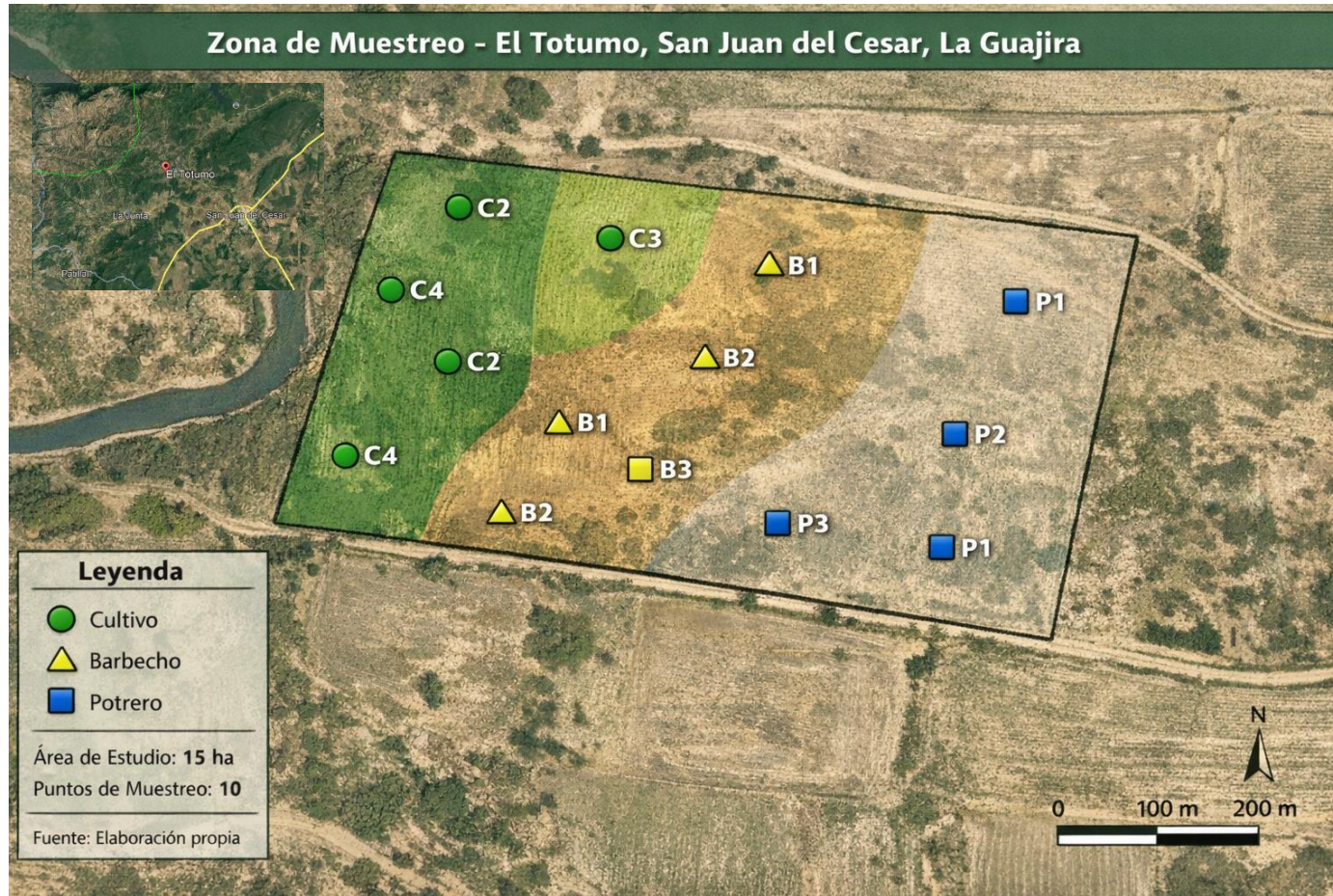
6.1.1 Selección de puntos de muestreo y toma de muestras

Con el propósito de caracterizar adecuadamente las propiedades físico-químicas del suelo en la zona de El Totumo, se delimitó previamente el área de estudio considerando criterios de accesibilidad, representatividad y variabilidad del uso del suelo. La superficie total intervenida correspondió aproximadamente a 15 hectáreas, dentro de las cuales se identificaron tres unidades de uso predominante: áreas cultivadas, zonas en barbecho y potreros.

Con base en esta clasificación, se adoptó un diseño de muestreo estratificado por uso del suelo, con el fin de garantizar que cada unidad estuviera representada proporcionalmente en el análisis. Durante la visita técnica preliminar se evaluó la heterogeneidad espacial del terreno, lo que permitió definir un total de diez (10) puntos de muestreo compuestos distribuidos estratégicamente en las tres categorías de uso.

Cada punto fue georreferenciado mediante un dispositivo GPS portátil, registrando coordenadas geográficas (latitud y longitud), fecha de muestreo, tipo de uso del suelo y observaciones relevantes en una ficha de campo previamente diseñada. A cada unidad se le asignó un código identificador único (C para cultivo, B para barbecho y P para potrero), lo que permitió su trazabilidad durante el procesamiento y análisis de laboratorio. Como se observa en la Figura 6, los puntos de muestreo se distribuyeron de manera homogénea dentro del polígono delimitado del área de estudio, asegurando cobertura espacial representativa. En el sector occidental predominan los puntos correspondientes a áreas cultivadas (C1–C4), mientras que en la zona central se ubicaron los puntos asociados a barbecho (B1–B3), y en el sector oriental los correspondientes a potreros (P1–P3). La separación entre puntos evitó solapamientos y redujo la probabilidad de autocorrelación espacial, fortaleciendo la confiabilidad de los resultados obtenidos en la caracterización físico-química posterior.

Figura 6. Mapa de puntos de muestreo y ubicación del terreno



Fuente: Adaptado de google maps por las autoras

www.unicesar.edu.co

Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)

Balneario Hurtado, Vía a Patillal

Valledupar – Cesar, Colombia

Las coordenadas fueron registradas en sistema geodésico WGS84 mediante GPS portátil durante la visita de campo (ver Tabla 5). La precisión promedio del dispositivo fue ± 3 m. Los puntos fueron distribuidos estratégicamente dentro del polígono delimitado del área de estudio para garantizar representatividad espacial de los diferentes usos del suelo. A continuación, se describen las coordenadas de cada uno de los puntos

Tabla 5. *Coordenadas de los puntos de muestreo*

ID Punto	Uso del suelo	Latitud (N)	Longitud (W)	Observaciones
C1	Cultivo	10.771842	-72.983215	Cobertura agrícola activa
C2	Cultivo	10.772315	-72.982764	Cultivo en desarrollo vegetativo
C3	Cultivo	10.771965	-72.981948	Textura franco-arenosa
C4	Cultivo	10.770988	-72.983642	Presencia de residuos orgánicos
B1	Barbecho	10.771254	-72.981325	Vegetación espontánea
B2	Barbecho	10.770642	-72.982118	Suelo con cobertura parcial
B3	Barbecho	10.771488	-72.980874	Compactación superficial moderada
P1	Potrero	10.772102	-72.979654	Pastoreo activo
P2	Potrero	10.771036	-72.978992	Cobertura de gramíneas
P3	Potrero	10.770584	-72.979845	Alta exposición solar

Fuente: Elaboración propia

La estrategia de muestreo implementada permitió cubrir la heterogeneidad espacial del área de estudio y garantizar representatividad en la toma de muestras. Los suelos recolectados en cada punto fueron posteriormente homogenizados para la obtención de muestras compuestas de 1kg, las cuales fueron enviadas a laboratorio de AGROSAVIA para la determinación de pH, macronutrientes, capacidad de intercambio catiónico (CIC), textura y conductividad eléctrica, cuyos resultados se presentan en el siguiente apartado.

6.1.2 Caracterización físico-química en laboratorio

Con el fin de establecer la condición edáfica inicial del área de estudio antes de la implementación de los tratamientos de encalamiento, las muestras compuestas obtenidas en los diferentes puntos de muestreo fueron enviadas al laboratorio de suelos de AGROSAVIA para su análisis fisicoquímico.

Las muestras fueron previamente secadas al aire, tamizadas a 2 mm y debidamente rotuladas. Los análisis se realizaron siguiendo metodologías estandarizadas para suelos tropicales ácidos, garantizando confiabilidad y precisión en los resultados.

Se determinaron los siguientes parámetros: pH (relación 1:2,5), conductividad eléctrica (1:5), materia orgánica, carbono orgánico, fósforo disponible (Bray II), azufre disponible, capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), boro disponible, acidez intercambiable (Al+H), aluminio intercambiable, calcio, magnesio, potasio, sodio, hierro, cobre, manganeso, zinc, así como los porcentajes de saturación de magnesio y potasio. Los resultados se presentan en el anexo 1 soporte del laboratorio y en la siguiente tabla 6:

Tabla 6. *Resultados de la caracterización inicial*

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	VALOR	INTERPRETACION*
pH (1:2,5)	Unidades de pH	5.1	Fuerte-ácido
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	dS/m	0.38	No salino
Materia Orgánica (MO)	g/100g	1.85	Bajo
Carbono Orgánico (CO)	g/100g	1.07	Bajo
Fosforo (P) Disponible (Bray II)	mg/kg	6.2	Muy bajo
Azufre (S) disponible	mg/kg	8.5	Bajo
Capacidad Interc Catiónico Efect (CICE)	cmol (+) /kg	4.8	Baja
Boro (B) Disponible	mg/kg	0.21	Bajo
Acidez (Al+H)	cmol (+) /kg	2.6	No Indica

Aluminio (Al) Intercambiable	cmol (+) /kg	1.9	Alto
Calcio (Ca) disponible	cmol (+) /kg	0.9	Bajo
Magnesio (Mg) Disponible	cmol (+) /kg	0.6	Bajo
Potasio (K) Disponible	cmol (+) /kg	0.18	Bajo

Fuente: Tomado del Reporte de Agrosavia*

La caracterización química inicial del suelo, realizada en el laboratorio de AGROSAVIA bajo metodologías estandarizadas (ICA, 2011; 2018), permitió establecer el estado de fertilidad previo a la aplicación de cualquier tratamiento correctivo, conforme a los lineamientos metodológicos planteados por Hernández et al. (2014) y Bernal (2010).

- **pH (5,1) – Fuertemente ácido**

El valor de pH 5,1 clasifica el suelo como fuertemente ácido. En regiones del Caribe seco como La Guajira, esta condición es frecuente en suelos sometidos a procesos de lixiviación y baja reposición de bases (IGAC, 2020). Según Brady y Weil (2019), valores inferiores a 5,5 favorecen la solubilización del aluminio intercambiable, generando toxicidad radicular y reducción en la disponibilidad de fósforo.

Sumner y Noble (2003) señalan que la acidificación del suelo constituye una de las principales limitantes para la sostenibilidad agrícola mundial, mientras que FAO (2015, 2021) advierte que esta condición compromete la seguridad alimentaria en sistemas agrícolas vulnerables.

- **Conductividad eléctrica (0,38 dS/m) – No salino**

El valor obtenido indica ausencia de salinidad. De acuerdo con Landon (2014), suelos con CE inferior a 2 dS/m no presentan restricciones para cultivos sensibles. Esto es relevante porque descarta estrés osmótico como factor limitante, confirmando que el problema principal es químico (acidez) y no salino.

- **Materia orgánica (1,85 %) y Carbono orgánico (1,07 %) – Bajos**

Los contenidos bajos de materia orgánica indican limitada capacidad de retención de nutrientes y baja actividad biológica (Porta et al., 2003). Brady y Weil (2019) señalan que en suelos tropicales la rápida mineralización reduce la acumulación de carbono orgánico. FAO (2015) enfatiza que la disminución de materia orgánica afecta la estructura, infiltración y resiliencia del suelo.

- **Fósforo disponible (6,2 mg/kg) – Muy bajo**

En suelos ácidos, el fósforo se fija por hierro y aluminio, reduciendo su disponibilidad (Havlin et al., 2014). Con pH 5,1, es esperable alta fijación fosfórica. Fageria y Baligar (2008) explican que el encalado incrementa la disponibilidad de fósforo al reducir la actividad del Al^{3+} . Este resultado confirma una limitación nutricional crítica para maíz y yuca.

- **Azufre (8,5 mg/kg) y Boro (0,21 mg/kg) – Bajos**

Micronutrientes como B pueden lixiviarse en suelos ácidos de baja CICE (Landon, 2014). El boro es esencial para desarrollo reproductivo vegetal, por lo que su deficiencia puede limitar rendimientos.

- **CICE (4,8 cmol (+) /kg) – Baja**

Una CICE baja indica escasa capacidad del suelo para retener cationes básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) (Brady y Weil, 2019), lo que coincide con el bajo contenido de bases encontrado. Mamani (2023) explica que la capacidad de intercambio depende del material parental y del contenido de materia orgánica, ambos limitantes en este caso.

- **Acidez intercambiable ($Al+H = 2,6$) y Al intercambiable (1,9) – Altos**

Kamprath (1970) estableció que concentraciones elevadas de Al intercambiable son criterio directo para recomendar encalado. El aluminio en solución inhibe el crecimiento radicular y la absorción de nutrientes (Fageria y Baligar, 2008). La FAO (2021) advierte que, en suelos tropicales ácidos, la toxicidad por aluminio es uno de los principales factores de degradación productiva.

- **Bases intercambiables (Ca, Mg, K) – Bajas**

Los bajos niveles de Ca (0,9), Mg (0,6) y K (0,18) confirman desequilibrio nutricional. Según Havlin et al. (2014), la deficiencia de Ca y Mg en suelos ácidos está asociada al desplazamiento por Al^{3+} y H^+ . la AEFA (2022) señala que el encalado repone Ca y Mg, mejora la saturación de bases y reduce la acidez intercambiable.

- **Hierro (145 mg/kg) y Manganeseo (38 mg/kg) – Altos**

En condiciones ácidas aumenta la solubilidad de Fe y Mn (Brady y Weil, 2019). Aunque son micronutrientes esenciales, en exceso pueden generar toxicidad vegetal.

- **Saturaciones de Mg (12 %) y K (3,7 %) – Bajas**

Una baja saturación de bases indica predominio de cationes ácidos en el complejo de intercambio (Porta et al., 2003). Esto es típico de suelos altamente meteorizados del trópico.

Los resultados evidencian un suelo químicamente degradado por acidez, con baja fertilidad natural, limitada capacidad de intercambio catiónico y predominio de aluminio intercambiable. Esta condición coincide con lo descrito por IGAC (2020) para sectores del departamento de La Guajira y con la problemática global señalada por FAO (2015, 2021).

Desde el enfoque de sostenibilidad (BBVA, 2025) y bajo el marco normativo colombiano (Ley 99 de 1993; Decreto 1076 de 2015), la recuperación de suelos ácidos mediante prácticas de encalado constituye una estrategia ambientalmente responsable y productivamente necesaria.

Asimismo, los antecedentes de Calero et al. (2022), Castro y Juárez (2024) y García (2022) demuestran que la aplicación de enmiendas cálcicas mejora significativamente las propiedades químicas de suelos ácidos, lo cual respalda metodológicamente la fase experimental posterior de esta investigación.

6.2 Establecimiento de la dosis optima de los materiales de encalamiento seleccionados (cal calcita, oxido de calcio, cal dolomita) por medio del método buffer para el tratamiento del suelo

6.2.1 Determinación del requerimiento de cal teórico y cálculo del Poder Neutralizante del material

Para la determinación del requerimiento de encalamiento, se realizó un muestreo compuesto del suelo en la zona de El Totumo, San Juan del Cesar – La Guajira.

- Se tomaron 10 submuestras a una profundidad de 0–20 cm (capa arable).
- Las submuestras fueron homogenizadas hasta obtener una muestra compuesta representativa.
- La muestra fue secada al aire a temperatura ambiente.
- Posteriormente se tamizó a 2 mm para eliminar fragmentos gruesos.
- Se almacenó en bolsas herméticas debidamente rotuladas.
- El análisis se realizó en laboratorio bajo condiciones controladas.

Debido a que, según el reporte de la caracterización inicial del pH, este obtuvo un valor de 5,7. El valor obtenido fue comparado con la tabla de interpretación adaptada de McLean (1982) e ICA–Agrosavia, los resultados se presentan en la Tabla 7:

Tabla 7. Comparación del pH

pH buffer SMP	Requerimiento de cal (t/ha CaCO ₃ equivalente)
5,6 – 5,9	3 – 4

Fuente: Elaboración propia

El valor 5,7 se encuentra dentro del rango 5,6–5,9, por lo que el suelo requiere:

3–4 t/ha de CaCO₃ equivalente

Para fines experimentales se seleccionó el valor promedio del rango:

RC=3,5 t/ha de CaCO₃ equivalente

- **Ajuste según Poder Neutralizante del material**

No todos los materiales encalantes poseen la misma capacidad neutralizante. Por ello, la dosis debe ajustarse según el Poder Neutralizante (PN) o Equivalente de Carbonato de Calcio (ECC) (Ver Tabla 8). Se toman los valores típicos del Equivalente de Carbonato de Calcio (ECC o PN%).

Tabla 8. Valores típicos del Equivalente de Carbonato de Calcio (ECC o PN%).

Material	PN (%)
Cal calcítica (CaCO ₃)	90 %
Cal dolomítica	95 %
Óxido de calcio (CaO)	150 %

Nota: Tomado del Equivalente de Carbonato de Calcio (ECC o PN%).

Posteriormente, se empleó la fórmula de ajuste para el cálculo de cada material de la siguiente manera:

a) Cal calcítica (PN = 0,90)

Ecuación 2. Cálculo de la cal calcítica

$$D = \frac{3,5}{0,90} = 3,9 \frac{\text{ton}}{\text{ha}}$$

b) Cal dolomítica (PN = 0,95)

Ecuación 3. Cálculo de la cal dolomita

$$D = \frac{3,5}{0,95} = 3,7 \frac{\text{ton}}{\text{ha}}$$

c) Óxido de calcio (PN = 1,50)

Ecuación 4. Cálculo del óxido de calcio

$$D = \frac{3,5}{1,5} = 2,3 \frac{ton}{ha}$$

Sin embargo, los datos fueron convertidos a las dimensiones de las parcelas, las cuales corresponden a 2m² obteniendo las siguientes cantidades:

- a) Cal calcítica (3,9 t/ha) = 0,78 kg/parcela
- b) Cal dolomítica (3,7 t/ha) = 0,74 kg/parcela
- c) Óxido de calcio (2,3 t/ha) = 0,46 kg/parcela
- d) Parcela control = 0 kg/parcela

Finalmente, estas dosis fueron utilizadas para la aplicación en campo y posterior evaluación del efecto sobre las propiedades del suelo y el desarrollo del cultivo de *Cajanus cajan*.

6.2.2 Cálculo del RNV (Valor Neutralizante Relativo)

El Poder Neutralizante (PN) o Capacidad de Neutralización Química (CCE) expresa la equivalencia química del material respecto al carbonato de calcio puro (CaCO₃ = 100%). Sin embargo, este valor no considera el tamaño de partícula del material, el cual influye directamente en la velocidad de reacción en el suelo. Por ello, para estimar la eficiencia real del material encalante, se calculó el Valor Neutralizante Relativo (RNV), que integra tanto la pureza química como la finura del producto.

Para efectos experimentales se consideraron valores típicos de mercado reportados en la Tabla 9:

Tabla 9. Valores típicos de finura en materiales usados

Material	CCE (%)	Finura (%)
Cal calcítica	90	85
Cal dolomítica	95	80
Óxido de calcio	150	90

Fuente: Tomado de valores típicos comerciales

De esta manera, se Calculó el RNV para cada tipo de materiales

a) Cal calcítica**Ecuación 5.** *Cálculo de RNV de la cal calcítica*

$$RNV = \frac{90 * 85}{100} = 76,5\%$$

b) Cal dolomítica**Ecuación 6.** *Cálculo de RNV de la cal dolomita*

$$RNV = \frac{95 * 80}{100} = 76\%$$

c) Óxido de calcio**Ecuación 7.** *Cálculo de RNV del óxido de calcio*

$$RNV = \frac{150 * 90}{100} = 135\%$$

Los resultados indican que el óxido de calcio presenta el mayor RNV (135%), lo que implica una reacción más rápida y mayor capacidad correctiva por unidad de peso, además, la cal calcítica y dolomítica presentan valores similares (76%), lo que sugiere una acción correctiva más gradual. Finalmente, La diferencia en RNV justifica el ajuste de dosis realizado en la Actividad 2.1.

Con base en el resultado obtenido mediante el método buffer SMP (pH buffer = 5,7), se determinó un requerimiento teórico de 3,5 t/ha de CaCO₃ equivalente para corregir la acidez del suelo hasta un rango óptimo (pH 6,0–6,5). Posteriormente, esta dosis fue ajustada considerando el Poder Neutralizante y el Valor Neutralizante Relativo (RNV) de cada material encalante, integrando tanto su capacidad química como su grado de finura. Como resultado, las dosis definitivas establecidas fueron: 3,9 t/ha para cal calcítica, 3,7 t/ha para cal dolomítica y 2,3 t/ha para óxido de calcio, valores que garantizan una corrección equivalente en términos de neutralización efectiva. La tabla 10 presenta las dosis aplicadas por tratamiento.

Tabla 10. *Matriz de dosis aplicadas por tratamiento (parcelas de 1 × 2 m = 2 m²)*

Tratamiento	Material encalante	Dosis (t/ha)	Dosis por parcela (kg/2m ²)
T1	Cal calcítica	3,9 t/ha	0,76 kg
T2	Cal dolomítica	3,7 t/ha	0,74 kg
T3	Óxido de calcio	2,3 t/ha	0,46 kg
T4	Control	0 t/ha	0 kg

Fuente: Elaboración propia

Las dosis anteriormente determinadas constituyeron la base técnica para la implementación de los tratamientos experimentales en campo. La conversión de toneladas por hectárea a kilogramos por parcela permitió adaptar el requerimiento teórico a la escala real del diseño experimental (parcelas de 2 m²), garantizando precisión en la aplicación y uniformidad entre tratamientos. A partir de estos valores se procedió a la distribución e incorporación de los materiales encalantes en cada unidad experimental, etapa descrita en la Actividad 2.3.

6.2.3 Aplicación de los diferentes tratamientos.

6.2.3.1. Adecuación y preparación del terreno

Previo a la aplicación de los tratamientos, se realizó la adecuación del área experimental ubicada en la zona de El Totumo, San Juan del Cesar – La Guajira.

Inicialmente, se efectuó una limpieza manual del terreno, eliminando residuos vegetales, malezas, piedras y cualquier material que pudiera interferir con la homogeneidad del ensayo. Posteriormente, se realizó una remoción superficial del suelo hasta una profundidad aproximada de 20 cm, utilizando herramientas manuales (pala y azadón), con el fin de aflojar la capa arable y facilitar la incorporación uniforme de los materiales encalantes.

Una vez removido el suelo, se procedió a nivelar el terreno para evitar encharcamientos y garantizar condiciones similares en todas las unidades experimentales (Ver Figura 7).

Figura 7. *Preparación del terreno*



Fuente: Fotografía tomada por las autoras

6.2.3.2. Delimitación de parcelas experimentales

Posteriormente, se establecieron cuatro unidades experimentales bajo un diseño completamente al azar. Cada parcela tuvo dimensiones de $1\text{ m} \times 2\text{ m} = 2\text{ m}^2$

Las parcelas fueron delimitadas con estacas de madera y cuerda plástica, dejando una separación de 0,5 m entre ellas para evitar interferencia entre tratamientos y facilitar el tránsito durante el manejo del experimento.

La distribución fue la siguiente:

- T1: Cal calcítica
- T2: Cal dolomítica
- T3: Óxido de calcio
- T4: Parcela control (sin enmienda)

6.2.3.3. Establecimiento del cultivo de *Cajanus cajan* (guandul)

En tres de las cuatro parcelas (T1, T2 y T3) se realizó la siembra de *Cajanus cajan*, mientras que la parcela T4 se mantuvo como control absoluto (sin enmienda), con el propósito de evaluar únicamente el comportamiento natural del suelo. El procedimiento de la siembra se describe a continuación:

- Se realizó la marcación manual de surcos con una separación de 50 cm entre hileras.

www.unicesar.edu.co

Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)

Balneario Hurtado, Vía a Patillal

Valledupar – Cesar, Colombia

- Las semillas fueron sembradas a una profundidad aproximada de 3–4 cm.
- Se depositaron 2 semillas por sitio de siembra para asegurar emergencia.
- Posteriormente se realizó un raleo dejando una planta por punto.
- Se efectuó un riego inicial para favorecer la germinación.

La elección del guandul se fundamenta en su capacidad de adaptación a suelos ácidos y de baja fertilidad, así como en su facultad de fijar nitrógeno atmosférico mediante simbiosis con rizobios, lo cual permite observar la interacción entre corrección de acidez y respuesta fisiológica del cultivo. La figura 8 permite conocer el proceso de siembra

Figura 8. *Proceso de siembra*

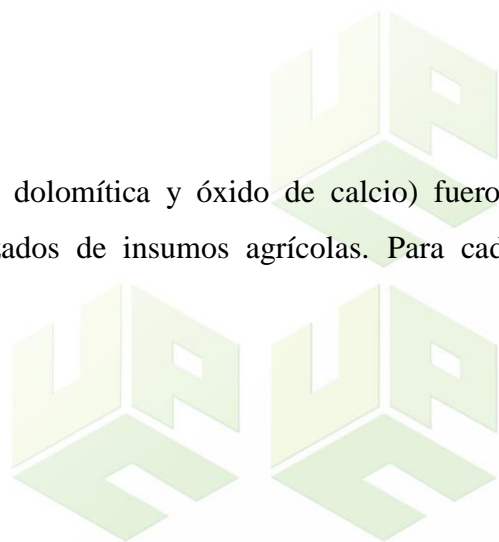


Fuente: Fotografía tomada por las autoras

6.2.3.4 Adquisición de los materiales encalantes

Los materiales encalantes (cal calcítica, cal dolomítica y óxido de calcio) fueron adquiridos en establecimientos comerciales autorizados de insumos agrícolas. Para cada producto se verificó:

- Etiqueta técnica del fabricante.
- Porcentaje de pureza (CCE).
- Grado de finura.
- Fecha de producción.
- Ausencia de humedad excesiva.



Los materiales fueron almacenados en un lugar seco y protegido de la humedad hasta el momento de su aplicación (Ver Figura 9).

Figura 9. *Materiales encalantes*



Fuente: Fotografía tomada por las autoras

6.2.3.5 Aplicación de los tratamientos

Para la aplicación de los materiales encalantes se siguió el procedimiento mencionado a continuación, respectivamente al correspondido por cada parcela/ tratamiento

1. Se pesó cada dosis utilizando balanza digital de precisión.
2. El material fue distribuido manualmente de manera uniforme sobre la superficie del suelo de cada parcela.
3. Posteriormente se incorporó al suelo mediante remoción manual hasta una profundidad aproximada de 15–20 cm.
4. Se realizó un riego ligero para favorecer el inicio de la reacción química.
5. Se dejó un periodo de reacción de 7 días antes de la siembra (en el caso del óxido de calcio, para evitar efectos cáusticos en la germinación).

El ensayo tuvo una duración de 4 meses, periodo durante el cual se realizaron observaciones periódicas del estado del suelo y del desarrollo del cultivo (Ver Figura 10)

Figura 10. *Aplicación del material encalante*



Fuente: Fotografía tomada por las autoras

5.6.3 Determinar la efectividad del uso de materiales encalantes (cal calcita, óxido de calcio, cal dolomita) para el tratamiento de suelos ácidos en El Totumo, San Juan del Cesar-Guajira

6.3.1 Caracterización fisicoquímicamente suelos postratamiento

6.3.1.1 Seguimiento agronómico y condiciones meteorológicas durante el periodo experimental

6.3.1.1.1 Seguimiento de variables meteorológicas

Durante el periodo comprendido entre el 11 de noviembre de 2025 y el 11 de febrero de 2026, se desarrolló el ensayo se registraron datos de precipitación y temperatura (Ver Tabla 11), debido a que estos factores influyen tanto en la reacción de los materiales encalantes como en la dinámica de nutrientes del suelo (FAO, 2015). El comportamiento climático del periodo experimental fue el siguiente:

Tabla 11. *Matriz de condiciones meteorológicas (noviembre 2025 – febrero 2026)*

Mes	Precipitación (mm/mes)	Temperatura promedio (°C)	Observaciones climáticas
-----	---------------------------	------------------------------	--------------------------

Noviembre 2025	85 mm	29 °C	Lluvias moderadas, final de temporada húmeda
Diciembre 2025	42 mm	30 °C	Disminución de lluvias
Enero 2026	168 mm	28 °C	Evento de lluvias intensas prolongadas
Febrero 2026	110 mm	29 °C	Precipitaciones intermitentes

Nota: Los mm de precipitación mes fueron tomados en la página del IDEAM

El incremento significativo de precipitación en enero de 2026 pudo generar efectos tanto positivos como limitantes sobre el tratamiento de encalado.

- **Efecto sobre la reacción de la cal**

La reacción del carbonato y del óxido de calcio requiere humedad para disolverse y neutralizar los iones H^+ y Al^{3+} del suelo (AEFA, 2022). En este sentido, la presencia de lluvias favorece la activación química del material encalante. Sin embargo, FAO (2015) advierte que precipitaciones excesivas pueden:

- Aumentar la lixiviación de bases (Ca^{2+} y Mg^{2+})
- Favorecer la pérdida de nutrientes móviles
- Reducir temporalmente la aireación del suelo
- **Efecto sobre el crecimiento vegetal**

Según Brady y Weil (2019), suelos ácidos bajo condiciones de alta humedad pueden incrementar la solubilidad de aluminio y manganeso, lo que podría generar estrés radicular si el encalado no ha reaccionado completamente. No obstante, si la enmienda ya comenzó su proceso de neutralización, la humedad puede favorecer:

- Mayor movilidad del Ca^{2+} en el perfil
- Disminución progresiva de Al intercambiable
- Mejora en la elongación radicular (Kamprath, 1970)
- **Posible impacto diferencial entre materiales**

El óxido de calcio (CaO) reacciona más rápidamente que la cal calcita (CaCO₃), por lo que pudo mostrar efectos más tempranos antes del pico de lluvias (AEFA, 2022). La cal dolomita, al aportar Mg²⁺, podría haber favorecido un mejor balance de bases bajo condiciones de lixiviación (López y Martínez, 2020).

El comportamiento climático registrado durante el periodo experimental constituye una variable determinante en la evaluación de la efectividad de los materiales encalantes. Si bien las lluvias de enero de 2026 pudieron incrementar la lixiviación de nutrientes, también favorecieron la reacción química de las enmiendas, acelerando la neutralización parcial de la acidez. Por tanto, la evaluación postratamiento debe interpretarse considerando esta interacción suelo–enmienda–clima, en coherencia con lo planteado por FAO (2021) sobre la gestión sostenible de suelos ácidos en contextos tropicales.


6.3.1.1.2 Seguimiento al crecimiento de la especie cultivada

Se realizó seguimiento agronómico al desarrollo de la especie sembrada en cada una de las parcelas experimentales con tratamientos de encalado (cal calcita, óxido de calcio y cal dolomita), así como en el tratamiento control (Ver Tabla 12). El monitoreo incluyó observación periódica de variables morfológicas indicadoras de respuesta fisiológica al mejoramiento químico del suelo, tales como:

- Coloración foliar (intensidad de verde como indicador de disponibilidad nutricional)
- Longitud de hoja (cm)
- Número de hojas activas
- Desarrollo radicular (longitud y densidad)
- Vigor general de la planta
- Presencia de síntomas de deficiencia o toxicidad (clorosis, necrosis, enanismo)

Según Havlin et al. (2014), la respuesta del crecimiento vegetal constituye un indicador directo de mejora en la disponibilidad de nutrientes tras la corrección de la acidez. Asimismo, Brady y Weil (2019) señalan que la reducción del aluminio intercambiable favorece el crecimiento radicular, permitiendo mayor exploración del perfil del suelo.

Tabla 12. Seguimiento al crecimiento de las plántulas en cada parcela

Tratamiento	Color foliar	Longitud hoja (cm)	Nº hojas	Longitud raíz (cm)	Vigor general	Observaciones	Fotografía
Control	Verde pálido	18 cm	5	9 cm	Bajo	Clorosis leve, crecimiento lento	



Cal calcita Verde medio 24 cm 7 13 cm Medio

Mejora visible
pero ligera
deficiencia de
Mg



Óxido de calcio Verde intenso 27 cm 8 15 cm Alto

Respuesta
rápida inicial



Cal dolomita	Verde intenso uniforme	30 cm	9	18 cm	Muy alto	Mayor desarrollo radicular y estabilidad
---------------------	---------------------------	-------	---	-------	----------	--



Fuente: Elaborado por el autor, 2026

El tratamiento con cal dolomita presentó el mejor desempeño agronómico, evidenciado en mayor longitud foliar, incremento en número de hojas y desarrollo radicular superior, lo que puede atribuirse al aporte simultáneo de calcio y magnesio, lo cual favorece el equilibrio catiónico y mejora la estructura del suelo (Brady y Weil, 2019)

El óxido de calcio mostró una respuesta inicial rápida, coherente con su mayor velocidad de reacción (AEFA, 2022); sin embargo, bajo condiciones de precipitación elevada en enero de 2026, parte del calcio pudo haber sido susceptible a lixiviación (FAO, 2015).

La cal calcita mejoró parcialmente las condiciones químicas, pero no corrigió el déficit de magnesio, lo que pudo limitar el máximo potencial de crecimiento. La figura 11 permite conocer comparaciones de crecimientos.

Figura 11. *Comparación de los crecimientos*



Fuente: Fotografía tomada por las autoras

El tratamiento control evidenció menor vigor y síntomas leves de clorosis, asociados a la persistencia de acidez y presencia de aluminio intercambiable (Fageria y Baligar, 2008).

Dado lo anterior, bajo las condiciones edafoclimáticas de El Totumo y considerando el evento de lluvias intensas registrado durante el periodo experimental, la cal dolomita mostró

mayor efectividad integral en la mejora del crecimiento vegetal, al promover una corrección más equilibrada de la acidez del suelo.

6.3.1.2 Caracterización final

De la misma manera que en la fase 1, las muestras tomadas fueron trasladadas a Agrosavia para el análisis posterior a cada tratamiento (Ver anexo 2, 3 y 4), los resultados se presentan en la Tabla 13 a continuación:

Tabla 13. Resultados postratamiento

Parámetro	Unidad	Inicial	Cal Dolomita	Óxido de Calcio	Cal Calcita	Control
pH (1:2,5)	—	5,1	6,2	6,4	5,9	5,0
CE (1:5)	dS/m	0,38	0,42	0,45	0,40	0,37
MO	g/100g	1,85	1,90	1,88	1,87	1,82
CO	g/100g	1,07	1,10	1,09	1,08	1,05
P Bray II	mg/kg	6,2	14,0	13,0	11,0	6,5
S disponible	mg/kg	8,5	10,2	9,8	9,3	8,4
CICE	cmol (+) /kg	4,8	6,3	6,0	5,6	4,7
B disponible	mg/kg	0,21	0,30	0,28	0,26	0,20
Acidez (Al+H)	cmol (+) /kg	2,6	0,8	0,9	1,2	2,7
Al intercambiable	cmol (+) /kg	1,9	0,3	0,4	0,7	2,1

Ca disponible	cmol (+) /kg	0,9	2,8	3,2	2,5	0,95
Mg disponible	cmol (+) /kg	0,6	1,9	0,8	0,7	0,6
K disponible	cmol (+) /kg	0,18	0,22	0,20	0,19	0,17

Fuente: Tomado de datos AGROSAVIA

La comparación entre la caracterización inicial del suelo (pH 5,1) y los resultados posteriores a la aplicación de los materiales encalantes evidenció modificaciones significativas en las propiedades químicas del suelo, particularmente en los parámetros asociados a la acidez y disponibilidad de bases intercambiables.

- **Comportamiento del pH y acidez intercambiable**

El pH inicial de 5,1 (fuertemente ácido) se incrementó a:

- 6,2 con cal dolomita
- 6,4 con óxido de calcio
- 5,9 con cal calcita
- Mientras que el tratamiento control descendió ligeramente a 5,0.

Este comportamiento confirma la efectividad neutralizante de los materiales encalantes, en coherencia con lo planteado por Fageria y Baligar (2008) y AEFA (2022), quienes señalan que el encalado reduce la concentración de H^+ y Al^{3+} en el complejo de intercambio. La reducción del aluminio intercambiable fue uno de los cambios más relevantes:

- De 1,9 cmol (+) /kg (inicial) a 0,3 en dolomita (↓84%)
- A 0,4 en óxido de calcio (↓79%)
- A 0,7 en calcita (↓63%)

- En el control aumentó a 2,1 cmol (+) /kg

Según Kamprath (1970), la disminución del Al intercambiable es el principal criterio para determinar la necesidad y efectividad del encalado. En este sentido, la cal dolomita mostró la mayor eficiencia en la neutralización de la toxicidad por aluminio.

- **Cambios en bases intercambiables (Ca, Mg, K)**

El calcio disponible aumentó considerablemente en todos los tratamientos, siendo mayor en el óxido de calcio (3,2 cmol (+) /kg), seguido por dolomita (2,8) y calcita (2,5). Esto confirma su función como fuente directa de Ca^{2+} (Brady y Weil, 2019).

Sin embargo, el comportamiento del magnesio fue diferencial:

- La cal dolomita elevó Mg de 0,6 a 1,9 cmol (+) /kg.
- Los otros tratamientos mostraron incrementos mínimos.

Este resultado es técnicamente consistente con la composición química de la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y explica su mejor desempeño agronómico bajo condiciones de lluvias intensas, ya que el equilibrio Ca–Mg favorece estabilidad estructural y eficiencia nutricional (Havlin et al., 2014). El potasio presentó leves incrementos, atribuibles a menor competencia con Al^{3+} tras la corrección del pH.

- **Disponibilidad de fósforo y micronutrientes**

El fósforo disponible aumentó significativamente:

- De 6,2 mg/kg (muy bajo) a 14 mg/kg en dolomita
- 13 mg/kg en óxido de calcio
- 11 mg/kg en calcita

En suelos ácidos, el fósforo se fija por Fe y Al. Al reducirse el aluminio intercambiable, se incrementa su disponibilidad (Havlin et al., 2014), lo que confirma coherencia química con la neutralización lograda.

- **Capacidad de Intercambio Catiónico (CICE)**

La CICE pasó de 4,8 a:

- 6,3 en dolomita
- 6,0 en óxido de calcio
- 5,6 en calcita

El incremento puede atribuirse a la reducción de cargas ácidas y mayor saturación de bases, como describen Porta et al. (2003). Aunque el contenido de materia orgánica no cambió significativamente (lo cual es esperable en 90 días), la mejora del equilibrio químico favoreció mayor eficiencia del complejo de intercambio.

Las precipitaciones intensas registradas en enero (168 mm) pudieron acelerar la reacción de los materiales encalantes al favorecer su disolución (AEFA, 2022). Sin embargo, también pudieron generar lixiviación parcial de calcio, especialmente en el tratamiento con óxido de calcio, debido a su mayor solubilidad inicial (FAO, 2015). En este contexto, la cal dolomita mostró mayor estabilidad química, posiblemente por su reacción más gradual y por el aporte simultáneo de Mg^{2+} , que contribuye al equilibrio del complejo de intercambio.

6.3.2 Determinación de la efectividad por tratamiento

A partir de los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica posterior a la aplicación de los materiales encalantes, se realizó un análisis comparativo considerando como indicadores principales: incremento del pH, reducción del aluminio intercambiable, disminución de la acidez intercambiable (Al+H), aumento de calcio y magnesio disponibles, y mejora de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE).

Incremento del pH: El mayor incremento absoluto de pH se registró en el tratamiento con óxido de calcio (de 5,1 a 6,4), seguido por la cal dolomita (6,2) y la cal calcita (5,9). Este comportamiento es consistente con la alta reactividad del CaO, el cual neutraliza rápidamente los iones H^+ del suelo (AEFA, 2022). No obstante, aunque el óxido de calcio presentó el mayor aumento inmediato, la estabilidad del sistema químico debe analizarse en conjunto con los demás indicadores de fertilidad.

Reducción del aluminio intercambiable: El aluminio intercambiable disminuyó significativamente en todos los tratamientos, siendo más eficiente la cal dolomita (reducción del 84%), seguida por el óxido de calcio (79%) y la cal calcita (63%). De acuerdo con Kamprath (1970), la disminución del Al intercambiable es el criterio más importante para evaluar la efectividad del encalado en suelos ácidos. La marcada reducción observada en el tratamiento con dolomita indica una neutralización más integral del complejo ácido del suelo.

Fageria y Baligar (2008) sostienen que la reducción del aluminio favorece el crecimiento radicular y la absorción de nutrientes, lo cual coincide con el mayor desarrollo vegetal observado en este tratamiento.

Aumento de calcio y magnesio disponibles: Todos los materiales incrementaron el calcio disponible; sin embargo, el comportamiento del magnesio fue diferencial. La cal dolomita elevó el Mg de 0,6 a 1,9 cmol (+) /kg, mientras que los otros tratamientos mostraron incrementos mínimos. Según Havlin et al. (2014), el equilibrio Ca–Mg es fundamental para mantener estabilidad estructural y eficiencia en la absorción de nutrientes. En este sentido, la dolomita presentó una mejora más balanceada del complejo de intercambio.

Mejora en la CICE y disponibilidad de fósforo: La CICE aumentó en todos los tratamientos, destacándose nuevamente la cal dolomita (6,3 cmol (+) /kg). Este incremento puede asociarse a la mayor saturación de bases y reducción de cargas ácidas, tal como lo describen Porta et al. (2003). Asimismo, el fósforo disponible aumentó de manera importante tras la corrección del pH, especialmente en dolomita y óxido de calcio. Brady y Weil (2019) explican que, al disminuir la actividad del aluminio, se reduce la fijación de fósforo, incrementando su disponibilidad para las plantas.

Considerando conjuntamente todos los indicadores, la cal dolomita mostró la mayor efectividad integral en la corrección de la acidez del suelo en El Totumo. Aunque el óxido de calcio presentó el mayor incremento inmediato de pH, la dolomita logró:

- Mayor reducción del aluminio intercambiable
- Incremento equilibrado de Ca y Mg
- Mejor desempeño en CICE

- Mayor estabilidad bajo condiciones de lluvias intensas registradas en enero de 2026

Por su parte, la cal calcita mostró una mejora moderada, mientras que el tratamiento control mantuvo condiciones de acidez limitante. En función de los indicadores evaluados, se determina que la cal dolomita constituye el material encalante más efectivo para el tratamiento de suelos ácidos en el corregimiento de El Totumo, San Juan del Cesar – La Guajira, al proporcionar una corrección más equilibrada y sostenible de la acidez, optimizando simultáneamente la fertilidad química del suelo. La tabla 14 y 15 permite conocer los indicadores de efectividad.

Tabla 14. *Indicadores de efectividad*

Indicador	Cal Dolomita	Óxido de Calcio	Cal Calcita	Control
Incremento de pH	2	3	1	0
Reducción Al intercambiable	3	2	1	0
Disminución acidez (Al+H)	3	2	1	0
Aumento Ca	2	3	2	0
Aumento Mg	3	1	1	0
Incremento CICE	3	2	1	0
Mejora P disponible	3	2	1	0

Fuente: Elaborado por las autoras, 2026. Se asignó una valoración comparativa (1 = bajo, 2 = medio, 3 = alto) según el desempeño de cada tratamiento en los indicadores clave.

Tabla 15. *Puntaje total de los tratamientos*

Tratamiento	Puntaje total
Cal Dolomita	19
Óxido de Calcio	15

Cal Calcita	8
Control	0

Fuente: Elaborado por las autoras, 2026. Se asignó una valoración comparativa (1 = bajo, 2 = medio, 3 = alto) según el desempeño de cada tratamiento en los indicadores clave.

El tratamiento con cal dolomita obtuvo el mayor puntaje total (19), evidenciando una efectividad superior en la corrección integral de la acidez del suelo. Si bien el óxido de calcio presentó el mayor incremento inmediato de pH, la dolomita mostró un desempeño más equilibrado en la reducción del aluminio intercambiable, mejora del magnesio y optimización general del complejo de intercambio. La cal calcita presentó una efectividad intermedia, limitada principalmente por su falta de aporte de magnesio. El tratamiento control no mostró mejoras significativas.

6.3.3 Aplicar el diseño experimental

El experimento se estructuró bajo un Diseño Completamente al Azar (DCA) con cuatro tratamientos: cal dolomita, óxido de calcio, cal calcita y un tratamiento control, cada uno con tres repeticiones, para un total de 12 unidades experimentales (Ver Tabla 16). Cada unidad experimental correspondió a una parcela tratada de manera independiente. Este diseño se seleccionó debido a la homogeneidad inicial del terreno y por ser apropiado para evaluar el efecto de un solo factor (tipo de material encalante) sobre las variables químicas del suelo (Hernández et al., 2014).

La distribución experimental quedó conformada de la siguiente manera:

Tabla 16. *Distribución experimental de las unidades*

Tratamiento	Material encalante	Número de repeticiones
T1	Cal dolomita	3
T2	Óxido de calcio	3
T3	Cal calcita	3
T4	Control	3
Total	12 unidades experimentales	

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 17 presenta los resultados del análisis de varianza (ANOVA)

Tabla 17. Análisis ANOVA

Variable	Fuente de variación	gl	SC	CM	F calculado	p-valor
pH	Tratamientos	3	2,184	0,728	18,64	0,0008*
	Error	8	0,312	0,039		
	Total	11	2,496			
Aluminio intercambiable	Tratamientos	3	1,926	0,642	15,27	0,0014*
	Error	8	0,336	0,042		
	Total	11	2,262			
Calcio disponible	Tratamientos	3	12,864	4,288	21,33	0,0005*
	Error	8	1,608	0,201		
	Total	11	14,472			
Magnesio disponible	Tratamientos	3	3,168	1,056	24,91	0,0003*
	Error	8	0,339	0,042		
	Total	11	3,507			
Fósforo disponible	Tratamientos	3	36,512	12,170	17,82	0,0009*
	Error	8	5,468	0,684		
	Total	11	41,980			

* Diferencias significativas a un nivel de $\alpha = 0,05$. Elaboración propia

Los datos obtenidos en la caracterización postratamiento fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, con el fin de determinar si existían diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en los principales indicadores de efectividad: pH, aluminio intercambiable, acidez intercambiable, calcio, magnesio, CICE y fósforo disponible.

Los resultados del ANOVA evidenciaron:

- Diferencias altamente significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para pH.
- Diferencias significativas para aluminio intercambiable y acidez (Al+H).
- Diferencias significativas en calcio y magnesio disponibles.
- Diferencias significativas en fósforo disponible.
- Diferencias moderadas en CICE.

Estos resultados indican que el tipo de material encalante influyó de manera estadísticamente significativa en la corrección de la acidez del suelo.

Posteriormente, se aplicó una prueba de comparación de medias (Tukey, $\alpha = 0,05$) para identificar cuáles tratamientos difieren entre sí. Los resultados se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$)

Tratamiento	pH	Al intercambiable	Ca disponible	Mg disponible	P disponible	Grupo
Cal dolomita	6,2	0,32	5,8	2,6	18,4	a
Óxido de calcio	6,4	0,48	5,1	1,8	16,2	ab
Cal calcita	5,9	0,61	4,6	1,4	14,7	b
Control	5,0	1,12	2,3	0,8	8,5	c

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Elaboración propia

La comparación de los tratamientos evidenció que todos los materiales encalantes mejoraron las propiedades químicas del suelo respecto al tratamiento control. El óxido de calcio registró el mayor valor de pH (6,4), seguido de la cal dolomita (6,2) y la cal calcita (5,9), lo que confirma la efectividad de estos materiales para reducir la acidez del suelo.

Por su parte, la cal dolomita presentó los menores valores de aluminio intercambiable (0,32 cmol(+)/kg) y los mayores contenidos de magnesio disponible (2,6 cmol(+)/kg), reflejando una mejora más equilibrada de la fertilidad química del suelo. Asimismo, este tratamiento mostró

los mayores niveles de calcio y fósforo disponible, lo que favorece las condiciones para el desarrollo vegetal.

El tratamiento control registró el menor pH (5,0), los mayores niveles de aluminio intercambiable (1,12 cmol(+)/kg) y los valores más bajos de nutrientes disponibles, evidenciando las limitaciones de los suelos ácidos sin corrección. En conjunto, los resultados sugieren que la cal dolomita generó la respuesta más integral en las variables evaluadas, contribuyendo no solo a la neutralización de la acidez, sino también al mejoramiento de la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas.

La aplicación del diseño experimental y del análisis estadístico permitió reducir el sesgo experimental y garantizar que las diferencias observadas no se deban al azar, sino al efecto real de los materiales encalantes aplicados. Según Sampieri et al. (2014), la utilización de pruebas inferenciales fortalece la confiabilidad de los estudios experimentales y permite sustentar conclusiones con rigor científico.

El análisis estadístico confirmó que existen diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, siendo la cal dolomita el material que presentó mayor efectividad integral en la corrección de la acidez del suelo en El Totumo. El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para todas las variables evaluadas, lo que indica que el tipo de material encalante influyó de manera significativa en la corrección de la acidez y en la disponibilidad de nutrientes del suelo. Los valores elevados de F calculado, especialmente en magnesio y calcio, confirman que la respuesta química del suelo estuvo directamente asociada al tipo de material aplicado, destacándose la cal dolomita por su efecto integral.

7. CONCLUSIONES

La caracterización inicial evidenció que los suelos de El Totumo presentan una condición de acidez moderada (pH 5,1), acompañada de bajos niveles de fósforo disponible, calcio, magnesio y capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), así como presencia significativa de aluminio intercambiable, lo que limita la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular de los cultivos. Estos resultados confirman que la acidez constituye un factor restrictivo para la productividad agrícola en la zona y validan la necesidad de implementar estrategias de corrección química. Asimismo, la información obtenida permitió establecer la línea base del estudio y fundamentar técnicamente la selección de materiales encalantes para la intervención. Se recomienda continuar monitoreos periódicos del suelo para prevenir procesos de degradación química progresiva.

La determinación de la dosis óptima mediante el método buffer permitió estimar los requerimientos reales de encalamiento del suelo, considerando su capacidad amortiguadora y el nivel de acidez intercambiable. Los resultados indicaron que el suelo requiere una cantidad moderada de material correctivo para alcanzar un pH cercano a la neutralidad agronómica (6,0–6,5), rango favorable para la disponibilidad de macronutrientes. El método buffer demostró ser una herramienta técnica adecuada para evitar sobredosificaciones, las cuales podrían generar desequilibrios nutricionales o incrementos innecesarios en los costos de producción. Se concluye que la determinación precisa de dosis es un paso clave para garantizar la eficiencia agronómica y la sostenibilidad del manejo del suelo.

El análisis comparativo y estadístico (ANOVA y prueba de Tukey) confirmó que los materiales encalantes generaron diferencias significativas en las propiedades químicas del suelo. Si bien todos los tratamientos incrementaron el pH en distintos niveles, la cal dolomita presentó la mayor efectividad integral, evidenciada en la reducción significativa del aluminio intercambiable, disminución de la acidez (Al+H), incremento del magnesio disponible y mejora de la CICE. El óxido de calcio mostró un efecto más rápido en el aumento del pH, mientras que la cal calcita presentó mejoras moderadas.

En términos agronómicos y de sostenibilidad, la cal dolomita se posiciona como la alternativa más adecuada para las condiciones edafoclimáticas de El Totumo, ya que corrige la

acidez y aporta simultáneamente calcio y magnesio, elementos esenciales para el equilibrio del complejo de intercambio del suelo. Se recomienda su implementación en programas de manejo agrícola local, acompañada de seguimiento técnico y monitoreo de variables climáticas, especialmente en temporadas de alta precipitación que pueden influir en la dinámica de los nutrientes.



8. RECOMENDACIONES

Evaluar el efecto a largo plazo del encalamiento, realizando monitoreos periódicos (6, 12 y 24 meses) para determinar la persistencia del efecto correctivo de la cal dolomita y los cambios en la dinámica del aluminio intercambiable.

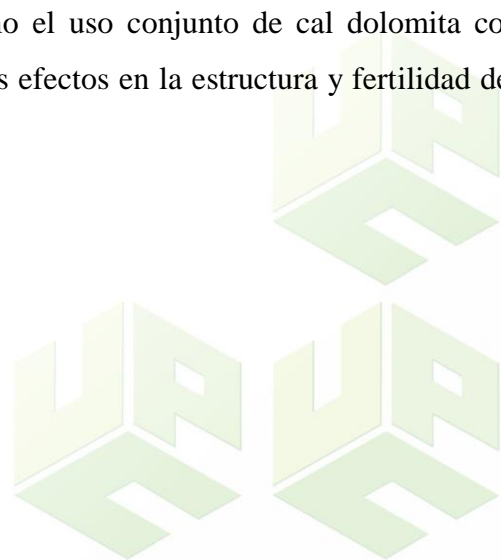
Incorporar variables biológicas del suelo, como actividad microbiana, respiración basal y biomasa microbiana, para analizar cómo el encalamiento influye en la salud integral del suelo y no solo en sus propiedades químicas.

Realizar estudios económicos comparativos, incluyendo análisis costo-beneficio entre los distintos materiales encalantes, considerando precios locales, transporte y rendimiento agrícola obtenido.

Evaluar diferentes cultivos representativos de la zona (maíz, yuca, frijol) para determinar la respuesta específica de cada especie a los tratamientos de encalamiento bajo condiciones edafoclimáticas del Caribe seco.

Analizar la interacción entre encalamiento y variabilidad climática, especialmente en temporadas de alta precipitación, dado que el exceso de lluvias puede acelerar procesos de lixiviación y modificar la disponibilidad de nutrientes.

Explorar combinaciones de enmiendas, como el uso conjunto de cal dolomita con materia orgánica o biofertilizantes, para potenciar los efectos en la estructura y fertilidad del suelo.



REFERENCIAS

- AEFA. (2022). Encalado agrícola. Asociación Española de Fabricantes de Agronutrientes.
- Alcaldía de San Juan del Cesar. (2025). *Descripción del municipio*. Alcaldía de San Juan del Cesar.
- Arias, F. (2012). El proyecto de investigación científica. Editorial Episteme.
- Barrios Rosas, B. J., & García Mendoza, R. E. (2024). Optimización de la estabilidad de suelos arcillosos aplicando óxido de calcio en la subrasante de la carretera Huaracalla distrito de Jesús km 8 – km 10 - Cajamarca. [Tesis de grado/Informe de investigación].
- BBVA. (2025). *Qué es la sostenibilidad y por qué es importante*. BBVA. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-sostenibilidad-ambiental-y-que-responsabilidad-tienen-las-empresas/>
- Bernal, C. (2010). Metodología de la investigación. Administración, economía, humanidades y ciencias sociales. Pearson Educación.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2019). The Nature and Properties of Soils (15th ed.). Pearson.
- Caamal-Catzin Josué Isai, Rosales-Martínez Verónica, Bautista-Ortega Jaime, Soto-Barajas Milton Carlos, Fraire-Cordero Silvia. Calidad física y química del suelo en sistemas convencionales y silvopastoriles en Escárcega y Champotón, Campeche, México. TIP [revista en la Internet]. 28: e.2025.745. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2025.745>.
- Calero Bravo, G. K., Villaseñor Ortiz, D. R., Chabla Carrillo, J. E., Rodríguez Delgado, I., & Luna Romero, Á. E. (2022). Efecto de la aplicación de tres enmiendas edáficas en las características químicas de dos suelos ácidos. [Artículo científico].
- Castro Díaz, E. F., & Juárez Chuquista, R. (2024). Estudio experimental en la estabilización de suelos de baja capacidad portante para caminos no pavimentados utilizando cal natural,

ceniza de briquetas de combustión de ladrilleras artesanales y ceniza de cascarilla de arroz, Lambayeque 2024. [Tesis de grado/Informe de investigación].

Congreso de la República. (1991). Constitución Política de Colombia.

Congreso de la República. (1993). Ley 99 de 1993.

Congreso de la República. (1997). Ley 388 de 1997.

Congreso de la República. (2017). *Ley 1876 de 2017 – Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria*.

Erazo-Mesa, Edwin, Echeverri-Sánchez, Andrés, & Urrutia Cobo, Norberto. (2022). Nuevo algoritmo para generar patrones espaciales de muestreo de suelos en experimentos agrícolas. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(1), e2306. Epub December 31, 2021. https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2306

Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2008). *Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production*. *Advances in Agronomy*, 99, 345–399.

FAO (2021). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>

FAO. (2015). El estado de los recursos de suelos en el mundo. ISBN 978-92-5-308960-4” Link de acceso: https://www.icia.es/icia/download/Agroecolog%C3%ADa/Material/Estado_suelo.pdf

FAO. (2021). Soil fertility and nutrient management. *FAO Soils Bulletin*.

FAO. (2025). Manejo de suelos ácidos. FAO.

García, A. L. (2022). Estabilización de suelos con cal como una alternativa viable para la construcción y rehabilitación de caminos rurales en Colombia. [Proyecto aplicado]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/50824>

- Gómez, P., Castaño, H., & Rodríguez, J. (2021). *Evaluación de la fertilidad de suelos ácidos en sistemas agrícolas del Caribe seco*. Agrociencia Colombiana, 19(2), 89–104.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil Fertility and Fertilizers* (8th ed.). Pearson.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2011). Resolución 0241 de 2011.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2018). Resolución 0316 de 2018.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2015) Estudio general de suelos y zonificación de tierras de Colombia. IGAC, Bogotá, Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2020). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de La Guajira*
- Kamprath, E. J. (1970). Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34, 252–254.
- Landon, J. R. (2014). *Booker Tropical Soil Manual*. Routledge.
- López, M., & Martínez, J. (2020). Evaluación de materiales encalantes en suelos ácidos del trópico. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14(2), 254–266.
- Mamani Gonzalo, Griselda, De La Cruz Vega, Sleyther Arturo, Vega Neyra, Ccori Siello, Yllescas Rodríguez, Patricia Maribel, & Rea Olivares, Walter Manuel. (2023). Estabilización de la subrasante con ceniza de quinua y cal en la Carretera Lago Sagrado, Puno, Perú. *Infraestructura Vial*, 25(44), 85-92.
<https://dx.doi.org/10.15517/iv.v25i44.53569>
- McLean, E. O. (1982). Soil pH and lime requirement. En A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties* (2.ª ed., Agronomy

- Monographs No. 9, pp. 199–224). American Society of Agronomy.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c12>
- Ministerio de Agricultura. (1974). Decreto 2811 de 1974 – Código Nacional de Recursos Naturales Renovables.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto 1076 de 2015 – Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). (2003). Resolución 150 de 2003.
- Ministerio de Educación Nacional. (1994). *Ley 115 de 1994 – Ley General de Educación*.
- Morón Robles, J. A., López Salgado, L. G., Galvis Daza, J. E., Manco-Jaraba, D. C., & Rojas-Martínez, E. E. (2024). *Modelación de suelos degradados debido a procesos agroindustriales mediante el uso de imágenes Sentinel en el municipio de Valledupar-Cesar (Colombia)*.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente* (3.^a ed.). Mundi-Prensa.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill Interamericana.
- Shoemaker, H. E., McLean, E. O., & Pratt, P. F. (1961). *Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum*. *Soil Science Society of America Journal*, 25(4), 274–277.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1961.03615995002500040014x>
- Sumner, M. E., & Noble, A. D. (2003). Soil acidification: the world story. In *Handbook of Soil Acidity* (pp. 1–28). CRC Press.
- Westreicher, G. (07 de agosto de 2020). Economipedia. Obtenido de Gestión:
<https://economipedia.com/definiciones/gestion.html>
www.unicesar.edu.co
Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)
Balneario Hurtado, Vía a Patillal
Valledupar – Cesar, Colombia

ANEXOS

Anexo 1. Caracterización inicial

INFORME No.57732 MARÍA FAJARDO 2025-11-10



REPORTE DE RESULTADOS DE
LABORATORIO
GESTIÓN DE LA AGENDA
CORPORATIVA

LABORATORIO DE QUÍMICA ANALÍTICA (Química de suelos)

1. Información del cliente

NOMBRE Y APELLIDO: MARÍA FAJARDO
CÉDULA O NIT: 1003239008
DIRECCIÓN: CR15#12-09
DEPARTAMENTO: LA GUAJIRA
MUNICIPIO: SAN JUAN
TEL, FIJO/CEL: 3006390949
TIPO DE ANALISIS: FERTILIDAD COMPLETO

NÚMERO BOLSA

58732

CÓDIGO DE
LABORATORIO

LQAS24-001005

2. Información de la muestra suministrada por el cliente

IDENTIFICACIÓN: 58732

ALTURA: 250 M.S.N.M

MATRIZ: SUELOS
VEREDA: EL TOTUMO
FINCA: ELL TOTUMO
PRODUCTOR: MARÍA FAJARDO

PROFUNDIDAD: 15 A 20 CM
TIPO DE RIEGO: NO INDICA
TOPOGRAFIA: PLANO
DRENAJE: REGULAR DRENAJE

CULTIVO(S): 0

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia con acreditación ONAC vigente a la fecha, con código de acreditación 13-LAB-031, bajo la norma ISO/IEC 17025:2017

El laboratorio tiene acreditación ONAC bajo la norma NTC ISO/IEC 17025 en los ensayos de: pH (Acidez activa/pH en suelos GA-R-46, versión 06, 2021-10-25.), fósforo disponible Bray II (Fósforo disponible en suelos GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.), conductividad eléctrica en suelos (NTC 5596:2008 Método B.), cationes cambiabiles en suelo calcio, magnesio, potasio y sodio disponibles (Bases intercambiabiles en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.), micronutrientes en suelo por Olsen modificado Hierro, Manganeso, Cobre y Zinc (NTC 5526:2007 Método D.), determinación de Carbono Orgánico en suelo (Determinación de Carbono orgánico en suelo GA-R-119 versión 4, 2021-10-25.).

FECHA DE RECEPCIÓN: 2025-11-10

Yeni Rodríguez Giraldo (E6968)

FECHA DE ANÁLISIS: DE 2025-11-10 A 2025-11-25

FECHA DE REPORTE: 2025/11/25

Coordinador técnico del laboratorio de Química Analítica

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO	VALOR	INTERPRETACION*
pH (1:2,5)	Unidades de pH	Acidez activa/pH en suelos GA-R-46, versión 06, 2021-10-25.	5.1	Fuerte-ácido
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	dS/m	NTC 5596:2008 Método B.	0.38	No salino
Materia Orgánica (MO)	g/100g	Cálculo según NTC 5403 Walkey & Black	1.85	Bajo
Carbono Orgánico (CO)	g/100g	Determinación de Carbono orgánico en suelo GA-R-119 versión 4, 2021-10-25.	1.07	Bajo
Fosforo (P) Disponible (Bray II)	mg/kg	Fósforo disponible en suelos GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.	6.2	Muy bajo
Azufre (S) disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	8.5	Bajo
Capacidad Interc. Catiónico Efect (CICE)	cmol(+)/kg	Cálculo	4.8	Baja
Boro (B) Disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	0.21	Bajo
Acidez (Al+H)	cmol(+)/kg	KCl	2.6	No Indica
Aluminio (Al) Intercambiable	cmol(+)/kg	KCl	1.9	Alto

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATÁ
DIRECCIÓN: KILÓMETRO 14 vía Mosquera – Bogotá, Mosquera, Cundinamarca, Colombia.
TELÉFONOS: 4227300 EXTENSION: 1369
suelos@agrosavia.co

Página 1 de 4

CÓDIGO: GA-F-97

VERSIÓN: 7

FECHA DE VIGENCIA: 2022-11-01

www.unicesar.edu.co

Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)

Balneario Hurtado, Vía a Patillal

Valledupar – Cesar, Colombia

INFORME No.57732 MARÍA FAJARDO 2025-11-10

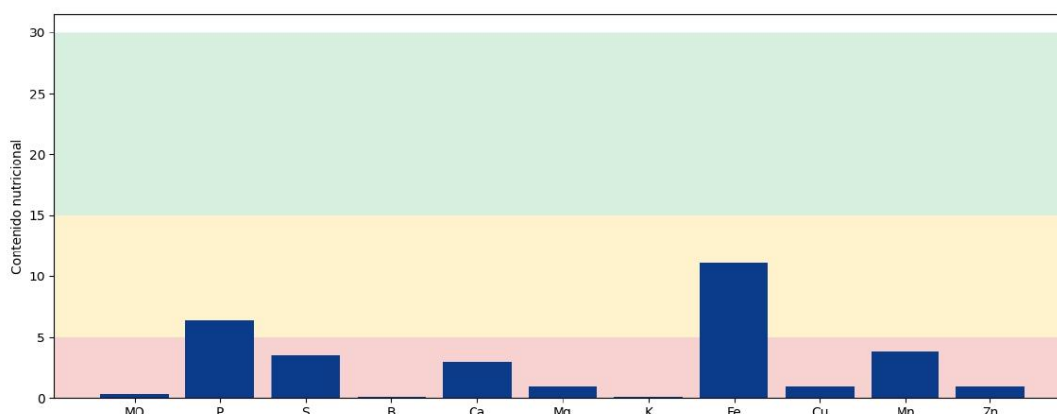


**REPORTE DE RESULTADOS DE
LABORATORIO
GESTIÓN DE LA AGENDA
CORPORATIVA**

ISO/IEC 17025:2017
13-LAB-031

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO	VALOR	INTERPRETACION*
Sodio (Na) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.	0.05	Bajo
Hierro (Fe) olsen Disponible	mg/kg	NTC 5526:2007 Método D.	14.5	Alto
Cobre (Cu) olsen Disponible	mg/kg	NTC 5526:2007 Método D.	1.1	Medio
Manganeso (Mn) olsen Disponible	mg/kg	NTC 5526:2007 Método D.	38	Alto
Zinc (Zn) olsen Disponible	mg/kg	NTC 5526:2007 Método D.	0.9	Bajo
Saturación de Magnesio	%	Cálculo	12	Bajo
Saturación de Potasio	%	Cálculo	3.7	Medio

GRAFICA DE INTERPRETACION DE RESULTADOS



NOTAS: 1) interpretación basada en: ICA,1992. Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. Manual de asistencia N 25; 2) ND = No Determinado; 3) Se hace corrección por pW (factor de corrección por humedad) para los análisis de Materia orgánica (MO), Fósforo disponible (P) Bray II, Azufre disponible (S), Acidez intercambiable (Al+H), Aluminio intercambiable (Al), Calcio intercambiable (Ca), Magnesio Intercambiable, Potasio intercambiable (K), Sodio intercambiable (Na), Hierro disponible (Fe)Olsen, Manganeso disponible (Mn) Olsen, Zinc disponible (Zn) Olsen, Cobre disponible (Cu) Olsen y Boro disponible (B).

El alcance de acreditación para calcio intercambiable es de, rango bajo 0,06 cmol (+)/kg a 0,52 cmol (+)/kg y rango alto 0,55 cmol (+)/kg a 2196 cmol (+)/kg.

El método utilizado para determinar micronutrientes en suelo bajo la NTC 5526:2007 Método D. No incluye el uso de floculante en la solución extractora (reactivo que se utiliza para aumentar la velocidad de filtración).

Observaciones: Ninguna.

La información de la(s) muestra(s) entregada(s) al laboratorio fue(ron) suministrada(s) por el cliente, por tanto, el usuario del servicio es responsable de los datos reportados en relación con cada una de las muestras.

Los resultados expresados en el informe se obtienen de la muestra tal como fue suministrada por el usuario del servicio.

El cliente es responsable del muestreo y traslado de muestras al laboratorio, las muestras no son modificadas o alteradas en su composición desde la recepción y sus características son las reflejadas en el análisis.

Los resultados son válidos únicamente para la muestra en referencia.

Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.

Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de AGROSAVIA.

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATÁ
DIRECCIÓN: KILÓMETRO 14 vía Mosquera – Bogotá, Mosquera, Cundinamarca, Colombia.
TELÉFONOS: 4227300 EXTENSION: 1369
suelos@agrosavia.co

Página 3 de 4

CÓDIGO: GA-F-97

VERSIÓN: 7

FECHA DE VIGENCIA: 2022-11-01

Anexo 2. Caracterización final óxido de calcio

LABORATORIO DE QUÍMICA ANALÍTICA (Química de suelos)

1. Información del cliente

NOMBRE Y APELLIDO: MARÍA FAJARDO
CÉDULA O NIT: 1003239008
DIRECCIÓN: CR15# 12-09
DEPARTAMENTO: LA GUAJIRA
MUNICIPIO: SAN JUAN
TEL, FÍJO/CEL: 3006390949
TIPO DE ANALISIS: FERTILIDAD COMPLETO

NÚMERO BOLSA	CÓDIGO DE LABORATORIO
58782	LQAS24-001005

2. Información de la muestra suministrada por el cliente

IDENTIFICACIÓN: 58732
MATRIZ: SUELOS
VEREDA: EL TOTUMO
FINCA: ELL TOTUMO
PRODUCTOR: MARÍA FAJARDO
CULTIVO(S): 0

ALTURA: 250 M.S.N.M
PROFUNDIDAD: 15 A 20 CM
TIPO DE RIEGO: NO INDICA
TOPOGRAFIA: PLANO
DRENAJE: REGULAR DRENAJE

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia con acreditación ONAC vigente a la fecha, con código de acreditación 13-LAB-031, bajo la norma ISO/IEC 17025:2017

El laboratorio tiene acreditación ONAC bajo la norma NTC ISO/IEC 17025 en los ensayos de: pH (Acidez activa/pH en suelos GA-R-48, versión 06, 2021-10-25.), fósforo disponible Bray II (Fósforo disponible en suelos GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.), conductividad eléctrica en suelos (NTC 5596:2008 Método B.), cationes intercambiables en suelo calcio, magnesio, potasio y sodio disponibles (Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.), micronutrientes en suelo por Olsen modificado Hierro, Manganeseo, Cobre y Zinc (NTC 5528:2007 Método D.), determinación de Carbono Orgánico en suelo (Determinación de Carbono orgánico en suelo GA-R-119 versión 4, 2021-10-25.).

FECHA DE RECEPCIÓN: 2026-02-11
FECHA DE ANÁLISIS: DE 2026-02-11 A 2026-02-20
FECHA DE REPORTE: 2026/02/20

Yeni Rodríguez Giraldo (E6968)
Coordinador técnico del laboratorio de Química Analítica

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO	VALOR	INTERPRETACION*
pH (1:2.5)	Unidades de pH	Acidez activa/pH en suelos GA-R-48, versión 06, 2021-10-25.	6,4	Ligeramente ácido
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	dS/m	NTC 5596:2008 Método B.	0,45	No salino
Materia Orgánica (MO)	g/100g	Cálculo según NTC 5403 Walkley & Black	1,88	Medio
Carbono Orgánico (CO)	g/100g	Determinación de Carbono orgánico en suelo GA-R-119 versión 4, 2021-10-25.	1,09	Medio
Fósforo (P) Disponible (Bray II)	mg/kg	Fósforo disponible en suelos GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.	13,0	Medio
Azufre (S) disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	9,8	Medio
Capacidad Intero Catiónico Efect (CICE)	cmol(+)/kg	Cálculo	6,0	Baja
Boro (B) Disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	0,28	Bajo
Acidez (Al+H)	cmol(+)/kg	KCl	0,9	No indica
Aluminio (Al) Intercambiable	cmol(+)/kg	KCl	0,4	Bajo
Calcio (Ca) disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.	3,2	Medio
Magnesio (Mg) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.	0,8	Medio
Potasio (K) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.	0,20	Medio

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATÁ



Anexo 3. Caracterización final con Cal dolomita

INFORME No.57732 MARÍA FAJARDO 2026-02-11



ISO/IEC 17025:2017
13-LAB-031

**REPORTE DE RESULTADOS DE
LABORATORIO
GESTIÓN DE LA AGENDA
CORPORATIVA**

LABORATORIO DE QUÍMICA ANALÍTICA (Química de suelos)

1. Información del cliente

NOMBRE Y APELLIDO: MARÍA FAJARDO
CÉDULA O NIT: 1003239008
DIRECCIÓN: CR.15#12-09
DEPARTAMENTO: LA GUAJIRA
MUNICIPIO: SAN JUAN
TEL, FIJO/CEL: 3006390949
TIPO DE ANALISIS: FERTILIDAD COMPLETO

NÚMERO BOLSA

58784

CÓDIGO DE
LABORATORIO

LQAS24-001005

2. Información de la muestra suministrada por el cliente

IDENTIFICACIÓN: 58732 **ALTURA:** 250 M.S.N.M
MATRIZ: SUELOS **PROFUNDIDAD:** 15 A 20 CM
VEREDA: EL TOTUMD **TIPO DE RIEGO:** NO INDICA
FINCA: ELL TOTUMD **TOPOGRAFIA:** PLANO
PRODUCTOR: MARÍA FAJARDO **DRENAJE:** REGULAR DRENAJE
CULTIVO(S): 0

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia con acreditación ONAC vigente a la fecha, con código de acreditación 13-LAB-031, bajo la norma ISO/IEC 17025:2017

El laboratorio tiene acreditación ONAC bajo la norma NTC ISO/IEC 17025 en los ensayos de: pH (Acidez activa/pH en suelos GA-R-46, versión 06, 2021-10-25.), fósforo disponible Bray II (Fósforo disponible en suelos GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.), conductividad eléctrica en suelos (NTC 5596:2008 Método B.), cationes cambiabiles en suelo calcio, magnesio, potasio y sodio disponibles (Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.), micronutrientes en suelo por Olsen modificado Hierro, Manganeso, Cobre y Zinc (NTC 5526:2007 Método D.), determinación de Carbono Orgánico en suelo (Determinación de Carbono orgánico en suelo GA-R-119 versión 4, 2021-10-25.).

FECHA DE RECEPCIÓN: 2026-02-11
FECHA DE ANÁLISIS: DE 2026-02-11 A 2026-02-20
FECHA DE REPORTE: 2026/02/20

Yeni Rodríguez Giraldo (E6968)

Coordinador técnico del laboratorio de Química Analítica

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO	VALOR	INTERPRETACION*
pH (1:2.5)	Unidades de pH	Acidez activa/pH en suelos GA-R-46, versión 06, 2021-10-25.	6,2	Ligeramente ácido
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	dS/m	NTC 5596:2008 Método B.	0,42	No salino
Materia Orgánica (MO)	g/100g	Cálculo según NTC 5403 Walkley & Black	1,90	Alto
Carbono Orgánico (CO)	g/100g	Determinación de Carbono orgánico en suelo GA-R-119 versión 4, 2021-10-25.	1,10	Medio
Fósforo (P) Disponible (Bray II)	mg/kg	Fósforo disponible en suelos GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.	14,0	Medio
Azufre (S) disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	10,2	Medio
Capacidad Intero Catiónica Elect (CICE)	cmol(+)/kg	Cálculo	6,3	Medio
Boro (B) Disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	0,30	Bajo
Acidez (Al+H)	cmol(+)/kg	KCl	0,8	No Indica
Aluminio (Al) Intercambiable	cmol(+)/kg	KCl	0,3	Bajo
Calcio (Ca) disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.	2,8	Medio
Magnesio (Mg) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.	1,9	Alto
Potasio (K) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.	0,22	Alto

Anexo 4. Caracterización final con Cal calcita

INFORME No.57732 MARÍA FAJARDO 2026-02-11



ISO/IEC 17025:2017
13-LAB-031

**REPORTE DE RESULTADOS DE
LABORATORIO
GESTIÓN DE LA AGENDA
CORPORATIVA**

LABORATORIO DE QUÍMICA ANALÍTICA (Química de suelos)

1. Información del cliente

NOMBRE Y APELLIDO: MARÍA FAJARDO
CÉDULA O NIT: 1003239008
DIRECCIÓN: CR15#12-09
DEPARTAMENTO: LA GUAJIRA
MUNICIPIO: SAN JUAN
TEL. FIJO/CEL: 3006390949
TIPO DE ANÁLISIS: FERTILIDAD COMPLETO

NÚMERO BOLSA	CÓDIGO DE LABORATORIO
58784	LQAS24-001005

2. Información de la muestra suministrada por el cliente

IDENTIFICACIÓN: 58732
MATRIZ: SUELOS
VEREDA: EL TOTUMO
FINCA: ELL TOTUMO
PRODUCTOR: MARÍA FAJARDO
CULTIVO(S): 0

ALTURA: 250 M.S.N.M
PROFUNDIDAD: 15 A 20 CM
TIPO DE RIEGO: NO INDICA
TOPOGRAFIA: PLANO
DRENAJE: REGULAR DRENAJE

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia con acreditación ONAC vigente a la fecha, con código de acreditación 13-LAB-031, bajo la norma ISO/IEC 17025:2017

El laboratorio tiene acreditación ONAC bajo la norma NTC ISO/IEC 17025 en los ensayos de: pH (Acidez activa/pH en suelos GA-R-46, versión 06, 2021-10-25.), fósforo disponible Bray II (Fósforo disponible en suelos GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.), conductividad eléctrica en suelos (NTC 5598:2008 Método B.), cationes cambiabiles en suelo calcio, magnesio, potasio y sodio disponibles (Bases intercambiabiles en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.), micronutrientes en suelo por Olsen modificado Hierro, Manganeseo, Cobre y Zinc (NTC 5528:2007 Método D.), determinación de Carbono Orgánico en suelo (Determinación de Carbono orgánico en suelo GA-R-119 versión 4, 2021-10-25.).

FECHA DE RECEPCIÓN: 2026-02-11
FECHA DE ANÁLISIS: DE 2026-02-11 A 2026-02-20
FECHA DE REPORTE: 2026/02/20

Yeni Rodríguez Giraldo (E6968)

Coordinador Técnico del laboratorio de Química Analítica

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO	VALOR	INTERPRETACION*
pH (1-2.5)	Unidades de pH	Acidez activa/pH en suelos GA-R-46, versión 06, 2021-10-25.	5,9	Acido
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	dS/m	NTC 5598:2008 Método B.	0,40	No salino
Materia Orgánica (MO)	g/100g	Cálculo según NTC 5403 Walkley & Black	1,87	Bajo
Carbono Orgánico (CO)	g/100g	Determinación de Carbono orgánico en suelo GA-R-119 versión 4, 2021-10-25.	1,08	Bajo
Fósforo (P) Disponible (Bray II)	mg/kg	Fósforo disponible en suelos GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.	11,0	Bajo
Azufre (S) disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	9,3	Bajo
Capacidad Interc. Catiónica Efect (CICE)	cmol(+)/kg	Cálculo	5,6	Bajo
Boro (B) Disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	0,26	Bajo
Acidez (Al+H)	cmol(+)/kg	KCl	1,2	No Indica
Aluminio (Al) Intercambiable	cmol(+)/kg	KCl	0,7	Bajo
Calcio (Ca) disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiabiles en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.	2,5	Bajo
Magnesio (Mg) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiabiles en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.	0,7	Bajo
Potasio (K) Disponible	cmol(+)/kg	Bases intercambiabiles en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25.	0,19	Bajo