

Remediación de Andisoles Contaminados con Suero de Leche mediante la Aplicación de Fertilizantes Orgánicos

Remediation of Andisols Contaminated by Whey Through the Application of Organic Fertilizer

Jenny L. Huertas Delgado¹   Juan S. Garzón Quiñonez¹  Angela M. Sánchez Madroñero¹ 
Lisbeth C. Rodríguez Patichoy¹ 

¹Grupo de investigación Ambiental (GIA), Universidad Mariana, Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Mariana, Pasto, Nariño, Colombia.

Resumen

Introducción: La contaminación del suelo por residuos agroindustriales, como el suero de leche, representa una amenaza significativa para la sostenibilidad de los ecosistemas y la productividad agrícola.

Objetivo: Este estudio evaluó la efectividad del fertilizante orgánico como estrategia de biorremediación para Andisoles contaminados con suero de leche en Villa Moreno, Buesaco (Nariño).

Metodología: Se analizó el impacto sobre propiedades fisicoquímicas clave como pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente y porosidad. Se implementó un diseño de bloques al azar con tratamientos de suelo control, suelo contaminado y suelo contaminado con dos dosis diferentes de fertilizante orgánico (500 g y 1000 g por 3 kg de suelo).

Resultados: Los resultados indicaron que la adición de suero de leche acidificó ligeramente el suelo y aumentó significativamente su salinidad. La aplicación de fertilizante orgánico neutralizó eficazmente el pH, mejoró el contenido de materia orgánica y la CIC, y redujo la densidad aparente, incrementando la porosidad. Aunque ambas dosis de fertilizante fueron efectivas, la dosis más alta mostró una neutralización más rápida, pero también un mayor riesgo de salinización.

Conclusiones: Se concluye que el fertilizante orgánico es una alternativa viable y sostenible para la remediación de suelos contaminados con suero de leche, aunque se requiere un manejo cuidadoso de la dosis para equilibrar la recuperación de la fertilidad y el control de la salinidad.

Palabras clave: Biorremediación, contaminación del suelo, suero de leche líquido, fertilizante orgánico, propiedades fisicoquímicas, Andisoles.

Abstract

Introduction: Soil contamination by agro-industrial waste, such as whey, poses a significant threat to ecosystem sustainability and agricultural productivity.

Objective: This study evaluated the effectiveness of organic fertilizer as a bioremediation strategy for Andisols contaminated with whey in Villa Moreno, Buesaco (Nariño).

Methodology: The impact on key physicochemical properties such as pH, electrical conductivity (EC), organic matter (OM), cation exchange capacity (CEC), bulk density, and porosity was analyzed. A randomized block design was implemented with treatments of control soil, contaminated soil, and soil contaminated with two different doses of organic fertilizer (500 g and 1000 g per 3 kg of soil).

Results: The results indicated that the addition of whey slightly acidified the soil and significantly increased its salinity. The application of organic fertilizer effectively neutralized the pH, improved the organic matter content and CEC, and reduced the bulk density, increasing porosity. Although both fertilizer doses were effective, the higher dose showed faster neutralization but also a higher risk of salinization.

Conclusions: It is concluded that organic fertilizer is a viable and sustainable alternative for the remediation of soils contaminated by whey, although careful management of the dose is required to balance fertility recovery and salinity control.

Keywords: Bioremediation, soil contamination, liquid whey, organic fertilizer, physicochemical properties, Andisols

¿Cómo citar?

Garzón J.S Sánchez AM, Rodríguez LC, Huertas JL. Remediación de Andisoles Contaminados con Suero de Leche mediante la Aplicación de Fertilizantes Orgánicos. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(1) e-20715329

<https://doi.org/10.25100/iyv.v28i1.15329>

Recibido: 07/10/25

Revisado: 22/01/26

Aceptado: 02/02/26

Online: 24/02/26

Correspondencia

hgrubianos@ut.edu.co



¿Por qué se llevó a cabo?

La eliminación de suero sin tratar puede alterar el equilibrio químico del suelo (acidificación y salinización) e imponer una alta carga orgánica. Este problema es particularmente relevante en los municipios de Nariño (Colombia), donde los procesos de tratamiento adecuados para este tipo de aguas residuales suelen ser limitados. Además, los Andisoles, comunes en las regiones volcánicas de la zona, presentan propiedades físicas y químicas distintivas (alto contenido de materia orgánica, alta capacidad de intercambio catiónico, fuerte capacidad de sorción e influencia de minerales amorfos) que pueden regular la movilidad de solutos, la retención de contaminantes y la respuesta del suelo a las enmiendas, lo que los convierte en un sistema clave para la investigación en remediación. Por lo tanto, evaluamos si la enmienda orgánica ABONISSA podría restaurar rápidamente la funcionalidad química del suelo y promover la atenuación temprana del material extraíble en n-hexano (HEM) en condiciones controladas de microcosmos.

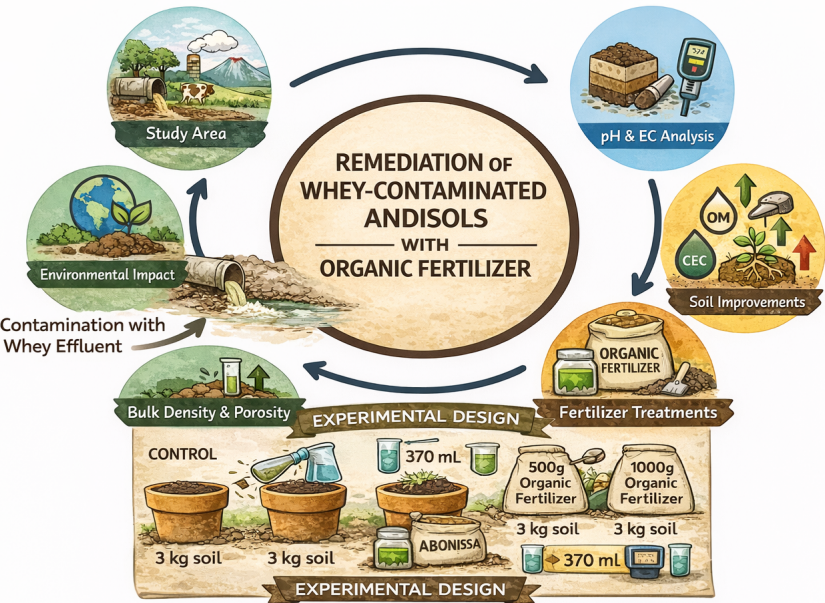
Resultados más relevantes

Durante 7 a 15 días, los tratamientos con ABONISSA mostraron: (i) neutralización de la acidez (aumento del pH), (ii) aumentos significativos en la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), (iii) disminución de la HEM en relación con el suelo contaminado con suero, y (iv) mejoras físicas (menor densidad aparente y mayor porosidad). Sin embargo, la CE aumentó notablemente, especialmente con la dosis alta (REM1), lo que indica un riesgo de salinización secundaria.

¿Qué aportan?

Los resultados respaldan a ABONISSA como una opción prometedora de manejo en etapa temprana para los Andisoles afectados por suero, al tiempo que enfatizan que la evaluación captura una respuesta inicial en lugar de una remediación definitiva del suelo. El estudio también demuestra un riesgo de salinidad dependiente de la dosis, destaca la necesidad de mitigación/monitoreo de la CE y recomienda una validación a largo plazo (superior a 60 días) y en campo para confirmar la sostenibilidad y los posibles impactos en la productividad agrícola. Además, estos hallazgos abren la posibilidad de considerar enfoques de tratamiento más integrados para este tipo de aguas residuales, en los que los Andisoles, debido a sus propiedades físicas y químicas distintivas, podrían funcionar como medios receptores controlados y filtros reguladores, contribuyendo a la retención/atenuación de contaminantes y la reducción de la carga orgánica en esquemas combinados de tratamiento de suelos y enmiendas (por ejemplo, sistemas ex situ o procesos integrados), siempre que se implementen una gestión, un monitoreo y salvaguardas adecuados para prevenir impactos secundarios como la salinización.

Graphical Abstract



Introducción

La contaminación del suelo ha surgido como una crisis medioambiental global formidable y en aumento, proyectando una larga sombra sobre la sostenibilidad de los ecosistemas de nuestro planeta y la productividad de sus tierras agrícolas (1). En paisajes rurales caracterizados por operaciones agroindustriales intensivas, como la región de Nariño en Colombia, la gestión inadecuada de subproductos lácteos, especialmente el suero, ha sido identificada como un factor principal de esta degradación ambiental. El suero, a pesar de su rica composición orgánica, desencadena una cascada de alteraciones fisicoquímicas adversas cuando se descarga en el suelo sin el control adecuado. Estos efectos perjudiciales incluyen una acidificación significativa del suelo, un aumento de la salinización y una capacidad reducida para retener nutrientes y agua esenciales. Estos cambios comprometen directamente la fertilidad del suelo y alteran el delicado equilibrio de las comunidades microbianas esenciales (2,3). Las repercusiones de esta degradación van más allá de la amenaza inmediata a los rendimientos agrícolas, un pilar fundamental de las economías locales, ya que también pueden precipitar la lixiviación de nitratos y fosfatos hacia las aguas subterráneas. Esta escorrentía de nutrientes agrava la eutrofización de los cuerpos de agua adyacentes, poniendo en peligro la calidad de los recursos hídricos vitales tanto para el consumo humano como para el riego agrícola (4).

La remediación de los suelos degradados por residuos agroindustriales es imprescindible para salvaguardar la salud ambiental y asegurar el suministro global de alimentos. Dentro de este marco, la biorremediación, especialmente mediante la aplicación estratégica de fertilizantes orgánicos, es cada vez más reconocida como una solución altamente prometedora y ambientalmente sostenible. Estos fertilizantes, derivados de la descomposición controlada de materiales vegetales y animales, no solo proporcionan un perfil rico de nutrientes esenciales, sino que también estimulan la actividad de microorganismos beneficiosos. Este mejoramiento microbiano es clave para facilitar la descomposición de los contaminantes orgánicos y mejorar la estructura física y química general del suelo (5). Un cuerpo considerable de investigaciones previas ha validado la capacidad de las enmiendas orgánicas para aumentar la Capacidad de Intercambio de Cations (CEC), estabilizar los niveles de pH y mejorar significativamente la retención de agua en suelos comprometidos (6).

A pesar de este avance, persiste una brecha crítica de conocimiento respecto a la eficacia específica y las tasas óptimas de aplicación de fertilizantes orgánicos para la remediación de Andisols—un tipo de suelo prevalente en regiones tropicales como Villa Moreno, Buesaco (Nariño)—que están específicamente contaminadas con suero. Los andisoles, aunque poseen buen drenaje, están inherentemente limitados en su capacidad para retener agua y nutrientes, lo que los hace especialmente vulnerables a los impactos de la contaminación (7). Esta vulnerabilidad requiere una evaluación rigurosa y sistemática para cuantificar los efectos de diferentes dosis de fertilizante orgánico sobre las principales propiedades fisicoquímicas del suelo. Un análisis exhaustivo del pH, la conductividad eléctrica (CE), la materia orgánica (OM), la CEC, la densidad a granel y la porosidad es esencial para desarrollar y optimizar estrategias eficaces de recuperación del suelo.

Esta investigación aborda directamente este déficit de conocimiento al evaluar sistemáticamente el uso de fertilizantes orgánicos como herramienta de biorremediación para los andisoles contaminados con suero en Villa Moreno. Nuestros hallazgos indican que, aunque la contaminación por suero conduce a la acidificación del suelo y al aumento de la salinidad, la aplicación de fertilizante orgánico contrarresta eficazmente estos efectos. Neutraliza con éxito el pH, enriquece el suelo con materia orgánica, aumenta la CEC y reduce la densidad a granel, aumentando así la porosidad. Aunque ambas dosis de fertilizante probadas fueron beneficiosas, la dosis más alta proporcionó una neutralización más rápida pero también supuso un mayor riesgo de salinización. Por lo tanto, esta investigación se guía por la siguiente pregunta central de investigación:

¿Hasta qué punto la aplicación de fertilizantes orgánicos puede remediar los andisoles contaminados con suero en Villa Moreno, Buesaco y Nariño, optimizando simultáneamente la recuperación de la fertilidad del suelo y manteniendo un control efectivo sobre la salinidad?

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en La Florida, un municipio situado en el departamento de Nariño, en la región andina suroeste de Colombia. Esta zona montañosa se caracteriza por un clima templado y una topografía diversa de montañas, valles y ríos, que en conjunto fomentan un entorno propicio para una variedad de actividades agrícolas. La producción láctea destaca como una piedra angular de la economía local. El suero utilizado como agente contaminante en esta investigación se obtuvo de Lácteos Figueroa, una destacada empresa láctea representativa del sector productivo de la región. El principal centro administrativo de La Florida se encuentra a una altitud de 2.077 metros sobre el nivel del mar (m.a.s.n.m.), con una temperatura media anual de aproximadamente 17°C y que recibe cerca de 2.500 mm de precipitación anual. El municipio abarca tres zonas termales distintas: fría, templada y páramo de gran altitud (Figura 1).

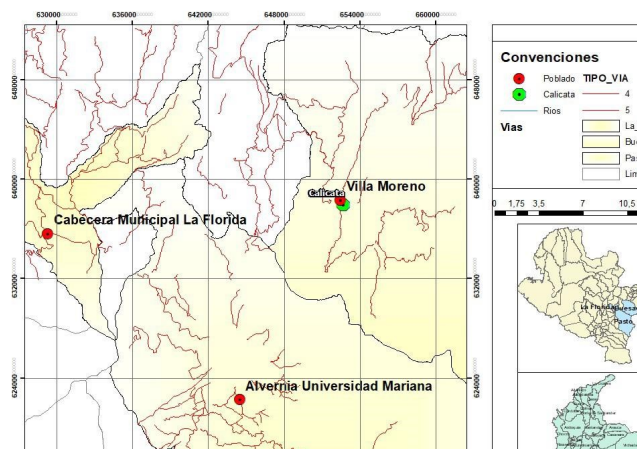


Figura 1. Mapa de los lugares clave en la investigación Fuente: Adaptado de IGAC y Colombia en Mapas

El yacimiento experimental específico se encontraba en Villa Moreno, un subdistrito dentro del municipio de Buesaco, también en Nariño. Buesaco está enclavado en las tierras altas andinas, con su centro municipal a una altitud media de 1.959 m.s.n.m., mientras que el subdistrito de Villa Moreno puede alcanzar elevaciones cercanas a los 2.200 m.s.n.m. (8). El municipio es conocido por su clima favorable, a menudo considerado uno de los “mejores climas del país”, con temperaturas medias de alrededor de 20°C en ciertas zonas, lo que lo hace ideal para la agricultura (8). Aunque la precipitación en esta parte de los Andes es variable, generalmente es suficiente para sostener una diversidad de cultivos. Históricamente, Buesaco ha sido un territorio de gran importancia agrícola, con una economía campesina basada en sistemas de producción tradicionales donde el café y el maíz son los cultivos más destacados (8).

Descripción de metodologías

Se seleccionó una parcela representativa dentro del área de estudio para la excavación de un pozo de tierra (calicata) que facilitara un análisis morfológico detallado. La descripción in situ del perfil del suelo implicó identificar horizontes distintos y documentar meticulosamente sus características visuales y táctiles. Se registró un conjunto completo de parámetros, incluyendo el color del suelo (determinado mediante la tabla de colores de Munsell), la textura evaluada por tacto, la estructura del suelo (categorizada por tipo, tamaño y grado), consistencia (evaluada en estados húmedos, húmedos y secos), la presencia y abundancia de raíces de las plantas, la existencia de moteado, la porosidad visible y cualquier otra característica distintiva como sartenes endurecidas o acumulaciones de carbonato. Esta caracterización exhaustiva proporcionó una comprensión fundamental de las propiedades iniciales del suelo y su posible influencia en la contaminación posterior y la dinámica de remediación.

Para evaluar cuantitativamente los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo, se recogieron muestras sistemáticamente en etapas clave: antes de cualquier tratamiento (suelo de control), tras la contaminación con suero y tras la aplicación de dosis variables de fertilizante orgánico ABONISSA, según lo dictado por el diseño experimental. Estas muestras fueron sometidas a una batería de análisis de laboratorio para determinar una variedad de propiedades fisicoquímicas. Los métodos analíticos específicos empleados para cada parámetro se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Métodos de laboratorio para el análisis de propiedades fisicoquímicas del suelo.

Test	Método	Instrumentos	Reactivos
Materia orgánica	Walkley y Black	Espectrofotómetro; Matraz de Erlenmeyer	Dicromato de potasio (K ₂ Cr ₂ O ₇); Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)
CEC (Capacidad de Intercambio de Cationes)	Titulación (acetato de amonio)	Burette; vaso de precipitados; Matraz de Erlenmeyer	Acetato de amonio (CH ₃ COONH ₄); hidróxido de sodio (NaOH); Formaldehído (CAP ₂ O)
Densidad real	Método de picnómetro	Pycnometer; equilibrio; jeringuilla	Agua destilada (H ₂ O)
Densidad global	Cilindro graduado (método Clod)	Cilindro graduado; Equilibrio	–
pH	Potenciometría (pasta saturada)	medidor de pH; Tarros de cristal	Soluciones de búfer
Conductividad eléctrica	Conductometría (extracto de saturación)	Medidor de conductividad; Vaso	Agua destilada (H ₂ O)
Textura del suelo	Hidrometría (Bouyoucos)	Hidrómetro; copa dispersa; Cilindro graduado	Hexametafosfato de sodio ((NaPO ₃) ₆); carbonato de sodio (Na ₂ CO ₃); Agua destilada (H ₂ O)
Porosidad	Cálculo indirecto	Datos de densidad verdadera y de densidad global	–
Humedad	Gravimetría (secado en horno)	Oven; equilibrio; crisol	–

Para cuantificar la reducción de grasas y aceites a lo largo de los diferentes tratamientos (CONT, REM1, REM2) e intervalos de muestreo, se utiliza el procedimiento estandarizado para determinar el Material Extractable de n-Hexano (HEM), tal como se describe en la norma NMX-AA-134-SCFI-2006 (9), fue estrictamente seguida. Se sometió a un proceso de extracción utilizando n-hexano como disolvente una submuestra de suelo (aproximadamente 10 g), que se premezcló con sulfato de sodio anhidro si era necesario para eliminar el exceso de humedad. Esto se realizaba con un dispositivo de sonicación (un disruptor ultrasónico con un cuerno sumergible) bajo las condiciones especificadas por el estándar (30 mL de n-hexano, sonicación al 100% de potencia con un pulso al 50% durante 3 minutos, con la extracción repetida). El extracto resultante se separaba cuidadosamente de la matriz del suelo mediante centrifugación o filtración. Posteriormente, el disolvente del extracto acumulado se evaporaba en un matraz de fondo redondo prepesado que contenía virutas hirvitas, utilizando un baño de agua o vapor. Se utilizaba un aparato de destilación según fuera necesario para recuperar el disolvente hasta que el residuo estuviera completamente seco. El matraz que contenía los residuos de HEM se secaba luego en un horno a 125°C durante una hora, se enfriaba en un desecador y se pesaba

repetidamente hasta alcanzar un peso constante. La concentración de HEM —que, según la definición 4.5 del estándar, incluye grasas, aceites, hidrocarburos no volátiles y ceras— se calculó gravimétricamente y se expresó en función de la masa seca del suelo.

Diseño experimental

Para perseguir rigurosamente los objetivos del estudio, se implementó meticulosamente un Diseño Experimental de Bloques Aleatorizados cuantitativo. Este diseño robusto fue elegido para evaluar sistemáticamente la eficacia del fertilizante orgánico como agente remediador para suelos contaminados con suero. Además, esta estructura experimental garantiza la validez estadística de los resultados al minimizar eficazmente la influencia de la variabilidad derivada de factores externos y no controlados.

Tratamientos

Los tratamientos experimentales se estructuraron de la siguiente manera:

T1: Suelo de control no contaminado (CTR). Este tratamiento consistía en macetas llenas con 3 kg de tierra sin contaminar, a la que no se aplicaba ni suero ni fertilizante orgánico. Sirvió como la línea de base crítica, representando el estado físico-químico natural del suelo y proporcionando un punto de referencia con el cual se podían medir con precisión los impactos de la contaminación y la remediación.

T2: Suelo contaminado con suero (CONT). En este tratamiento, se aplicaron 750 ml de suero en macetas con 3 kg de tierra, sin añadir fertilizante orgánico posteriormente. Esto permitió la evaluación directa del impacto del suero en las propiedades del suelo, estableciendo una línea base clara de los efectos negativos de la contaminación.

T3: Suelo contaminado con remediación de alta dosis (REM1). Este tratamiento consistió en aplicar 750 ml de suero junto con una dosis de 1000 g de fertilizante orgánico (compost o vermicompost) en macetas con 3 kg de tierra. Su objetivo era investigar el potencial de remediación de una tasa de aplicación más alta de la enmienda orgánica.

T4: Suelo contaminado con remediación a baja dosis (REM2). Este tratamiento consistió en aplicar 750 ml de suero junto con una dosis de 500 g de fertilizante orgánico en macetas con 3 kg de tierra. Fue diseñado para evaluar si una dosis menor y más moderada de la enmienda orgánica podría seguir logrando un resultado de remediación significativo y efectivo.

Para aislar los efectos de los tratamientos, se aplicó un régimen de riego uniforme a todas las unidades experimentales durante toda la duración del estudio. Específicamente, se administraron 140 ml de agua en intervalos correspondientes al calendario de muestreo (7 días antes de la primera muestra, M1 y 15 días antes de la segunda, M2), de acuerdo con el protocolo experimental establecido(2).

Variables de respuesta

La eficacia de los tratamientos se evaluó mediante una serie de variables de respuesta directamente vinculadas a los parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio y en campo:

- pH del suelo
- Textura del suelo
- Densidad volumétrica
- Densidad de partículas
- Contenido de humedad
- Porosidad
- Conductividad eléctrica
- Capacidad de Intercambio de Cationes (CEC)
- Contenido de materia orgánica
- Contenido en grasa y aceite

Análisis estadístico

Los datos empíricos generados a partir de este experimento serán sometidos a un riguroso análisis estadístico utilizando un Análisis de Varianza bidireccional (ANOVA). Este potente método estadístico es ideal para evaluar los principales efectos de múltiples factores (tipo de tratamiento y tiempo) y sus posibles interacciones. La ANOVA facilitará una comparación detallada de los valores medios de las distintas propiedades fisicoquímicas del suelo, no solo entre los distintos grupos de tratamiento (CTR, CONT, REM1, REM2) sino también entre los dos puntos de muestreo distintos en el tiempo (M1 a los 7 días y M2 a los 15 días).

Caracterización morfológica del suelo

Se realizó una caracterización morfológica in situ del suelo para establecer una línea base de sus propiedades antes de la aplicación de los tratamientos experimentales. Para ello, se excavó un pozo de tierra hasta una profundidad de 52 cm y se describieron cuatro horizontes (H1–H4), registrando parámetros visuales y táctiles como el color del suelo, textura, raíces, humedad y consistencia. Esta información es crucial porque controla procesos como la infiltración, la retención de agua, la aireación y la movilidad de los solutos, que a su vez regulan la dinámica del suero y la respuesta del suelo a la enmienda orgánica. En general, esta línea base permite una interpretación más precisa de los cambios posteriores y una evaluación más sólida de la eficacia del diseño propuesto para la remediación.

Tabla 2. Datos de la caracterización morfológica del suelo.

Horizon	1	2	3	4
Profundidad (cm)	0 – 14	14 – 26	26 – 38	38 – 52
Textura	Tierra arenosa	Tierra arenosa	Arena Franco	Arena Franco
Munsell Color	10YR 3/2	7,5 años 3/2	10 años y 3/3	10YR 4/4
Estructura	Bloques subangulares	Bloques subangulares	Bloques subangulares	Bloques subangulares
Moteado	Sí	Sí	No	No
Consistencia (húmeda)	Friable	Muy Friable	Muy Friable	Muy Friable
Plasticidad	No plástico	Ligeramente plástico	Ligeramente plástico	No plástico
Adhesividad	Ligeramente adherente	Ligeramente adherente	Ligeramente adherente	Ligeramente adherente
Raíces	Vale	Vale	Vale	No encontrado
Abundancia	Muy abundante	Escasos	Escasos	No encontrado

La caracterización del suelo reveló un perfil con cuatro horizontes (0–52 cm) (Tabla 2). Los horizontes superficiales H1 (0–14 cm) y H2 (14–26 cm) mostraron una textura de tierra arenosa, colores oscuros, estructura subangular y bloqueada, moteado y capas endurecidas (3,4 y 2,8 cm), con predominancia de raíces finas. En contraste, los horizontes más profundos H3 (26–38 cm) y H4 (38–52 cm) cambiaron a una textura de arena limosa, con colores relativamente claros, sin moteados y capas endurecidas más finas (2,1 y 1,7 cm); la abundancia de raíces también disminuyó con la profundidad y estuvo ausente en H4.

El moteado en H1–H2 sugiere fluctuaciones periódicas de humedad y condiciones alternas de saturación/oxidación (10), mientras que la coloración oscura de la superficie es consistente con una mayor acumulación de materia orgánica y actividad biológica (11). La transición de la tierra arenosa a la arena limosa puede estar relacionada con una discontinuidad litológica o procesos pedogenéticos diferenciales (12) y generalmente implica mejor drenaje pero también mayor susceptibilidad a la lixiviación y menor retención de agua y nutrientes en profundidad (13). La ligera pegajosidad observada es coherente con el papel de la arcilla y la materia orgánica como agentes aglutinantes que favorecen la agregación (14). Finalmente, la ausencia de raíces en H4 puede explicarse por una mayor profundidad y/o condiciones físicas menos favorables (menor capacidad de retención de agua o barreras locales) que restringen la penetración y el desarrollo radicular (13).

Evaluación de los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado tras la aplicación del fertilizante orgánico ABONISSA

Esta sección ofrece una evaluación detallada de los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo que previamente estaba contaminado con suero. Esta evaluación se realizó tras la aplicación de un tratamiento de biorremediación centrado en el uso de ABONISSA, una enmienda orgánica en polvo formulada específicamente para la aplicación directa en suelo. Su composición se basa en una mezcla de materiales de origen animal y vegetal, incluyendo

estiércol de aves, polvo de caña de azúcar y serrín, y fue seleccionado por sus reconocidas propiedades como restaurador de características edáficas. La producción de este fertilizante implicaba un proceso cuidadosamente controlado de compostaje y maduración. El análisis químico garantizado de Abonissa reveló una contribución sustancial de macronutrientes, que contienen un 1,5% de nitrógeno total (N), un 4% de fósforo disponible (P_2O_5) y un 3,5% de potasio soluble (K_2O). Además, su alto contenido de carbono orgánico oxidable (19%) y su naturaleza claramente alcalina, con un pH inicial de 8,2, fueron características notables (15).

El agente contaminante, el suero, es un subproducto importante de la industria de fabricación de quesos. Su eliminación inadecuada supone una preocupación ambiental importante debido a su alta demanda bioquímica de oxígeno y carga orgánica. Análisis fisicoquímicos previos han clasificado este tipo de subproducto como suero dulce, caracterizado por un pH medio de 5,7. Este pH es más alto que el de los sueros ácidos e influye directamente en su interacción con la matriz del suelo. Se identificó la lactosa como su componente principal, con una concentración reportada de aproximadamente el 5,1%. La composición del suero también incluía una fracción de proteína de aproximadamente 0,71% y un contenido de grasa del 0,5%. Aunque estos componentes tienen valor nutricional, son los principales factores que contribuyen a su alto potencial de contaminación cuando se gestionan mal (16).

Análisis de pH

El pH del suelo, una medida de su acidez o alcalinidad, es una variable maestra en la ciencia del suelo, ejerciendo una profunda influencia en la biodisponibilidad de nutrientes para las plantas, la actividad y diversidad de los ecosistemas microbianos, y la eficiencia general de los procesos de remediación (17). En esta investigación, el suelo control (CTR), que no recibió suero ni fertilizante orgánico, mostró un pH estable y casi neutro, con un promedio de 6,80 en la marca de 7 días (M1) y 6,81 en los 15 días (M2).

Estos valores de pH se encuentran claramente dentro del rango ligeramente ácido a neutro definido por el sistema de clasificación de la FAO (Tabla 3). Esto es muy coherente con las características conocidas de los andisoles, que son suelos derivados de ceniza volcánica. Estos suelos suelen mostrar un pH en este rango debido a su mineralogía única y a su alta concentración típica de materia orgánica. Durante la descomposición, esta materia orgánica puede liberar varios ácidos orgánicos, lo que contribuye a la acidez natural del suelo (12,18).

Tabla 3. Clasificación del pH del suelo según la FAO. Fuente: Adaptado de FAO (2006).

Rango de pH	Clasificación
< 4.5	Extremadamente ácido
4.5 - 5.0	Muy ácido
5.1 - 5.5	Fuertemente ácido
5.6 - 6.0	Moderadamente ácido
6.1 - 6.5	Ligeramente ácido
6.6 - 7.3	Neutro
7.4 - 7.8	Ligeramente alcalino
7.9 - 8.4	Moderadamente alcalino
8.5 - 9.0	Fuertemente alcalina
> 9.0	Muy fuertemente alcalina

La introducción del suero (tratamiento CON) provocó una acidificación notable, aunque leve, del suelo. El pH bajó a 6,695 en M1 y fue de 6,781 en M2. Este efecto acidificante se atribuye directamente a la presencia de ácidos orgánicos, como el ácido láctico, en el suero (19,20). El análisis estadístico (Figura 2) confirmó que el pH del tratamiento con CONT M1 fue significativamente más bajo que el de los otros tratamientos en la muestra M1 y también significativamente inferior a su propio valor en la muestra M2.

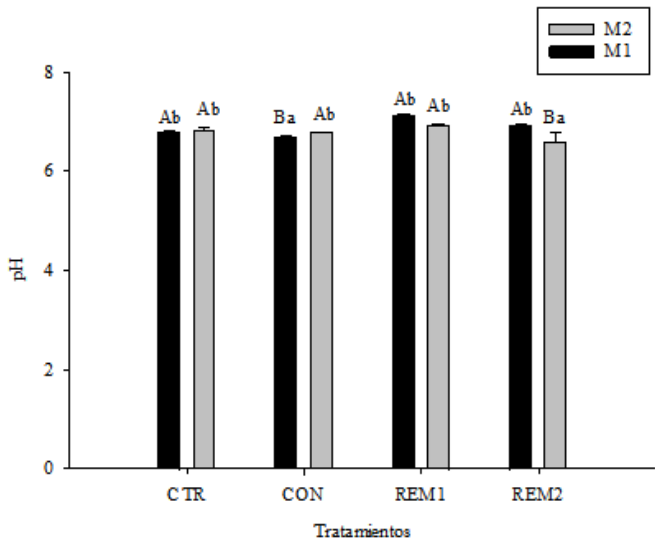


Figura 2. pH en suelos sometidos a diferentes tratamientos.

La aplicación del fertilizante orgánico ABONISSA en los tratamientos REM1 (1000 g) y REM2 (500 g) demostró un potente efecto alcalinizante, o neutralizante. El tratamiento con REM1 alcanzó un pH de 7,120 en M1 y 6,920 en M2, mientras que el tratamiento con REM2 registró un pH

de 6,920 en M1 y 6,589 en M2 (Figura 2). Este aumento del pH se atribuye a dos mecanismos principales: la alcalinidad inherente del propio fertilizante (con un pH inicial de 8,2) y la liberación de cationes básicos durante su descomposición (21,22). Los resultados de ANOVA fueron especialmente reveladores, indicando que el pH de REM1 M1 era significativamente más alto ($p=0,040$) que el de CONT M1. Esto sugiere que la dosis más alta de fertilizante llevó a una neutralización más eficaz y rápida de la acidez inducida por el suero. Curiosamente, aunque no hubo diferencias significativas de pH entre M1 y M2 para el tratamiento REM1, sí hubo una disminución significativa del pH con el tiempo para el tratamiento REM2.

Esta tendencia descendente del pH observada en REM2 M2, y la ligera reducción de REM1 M2, podrían explicarse por la producción de ácidos orgánicos durante las etapas más avanzadas de descomposición del fertilizante, o quizás por la neutralización gradual de la alcalinidad inicial del fertilizante por la capacidad de amortiguamiento del suelo (23,24). Estudios previos, como el de Mendoza-Hernández et al. (2020), han demostrado de manera similar que las enmiendas orgánicas alcalinas son eficaces para estabilizar el pH de los suelos contaminados. En el contexto de este estudio, el tratamiento con REM1 demostró una eficacia superior a corto plazo, contrarrestando con éxito la acidificación del suero y restableciendo un pH cercano a neutro, lo cual es muy favorable para la actividad biológica global del suelo.

Análisis de conductividad

La conductividad eléctrica (CE) actúa como una medida directa de la salinidad del suelo, un parámetro crítico que puede impactar significativamente tanto en el crecimiento de las plantas como en la actividad de los microorganismos del suelo (17). El suelo control (CTR) mostró consistentemente valores bajos de EC, con promedios de 0,559 mS/cm en M1 y 0,542 mS/cm en M2 (Figura 3). Estos valores son característicos de los andisoles no salinos y fueron significativamente inferiores a los registrados en todos los demás tratamientos (12,18).

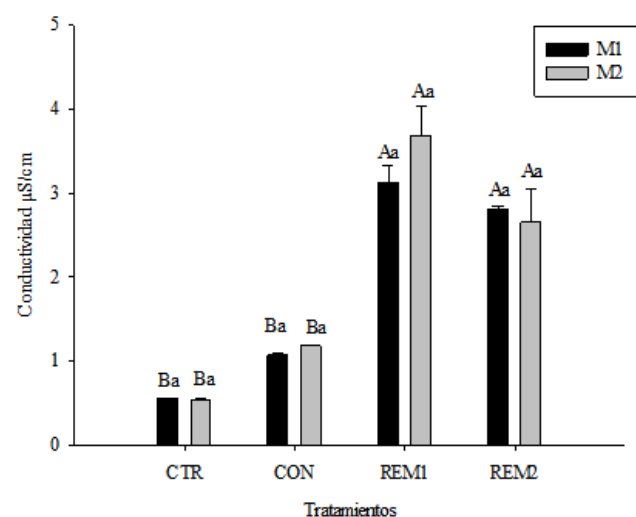


Figura 3. Conductividad eléctrica (µS/cm) en suelos sometidos a diferentes tratamientos

La adición de suero (tratamiento CON) provocó un aumento notable en la CE, con valores que alcanzaron 1,075 mS/cm en M1 y 1,182 mS/cm en M2. Este aumento es consecuencia directa de las sales solubles y otros compuestos ionizables inherentes al suero (19,25). A pesar de este aumento, la CE del tratamiento CONT se mantuvo significativamente inferior a la de los tratamientos modificados con fertilizantes, y no hubo diferencias estadísticamente significativas entre sus dos tiempos de muestreo.

Los aumentos más dramáticos en la CE se observaron en los tratamientos enmendados con fertilizante ABONISSA (REM1 y REM2), como se muestra en la Figura 3. El tratamiento con REM1 promedió 3,120 mS/cm en M1 y aumentó aún más hasta 3,675 mS/cm en M2. De manera similar, el tratamiento con REM2 promedió 2,810 mS/cm en M1 y fue de 2,645 mS/cm en M2. Este aumento sustancial de salinidad se debe a la liberación combinada de iones tanto del fertilizante orgánico (especialmente de su componente de estiércol avícola) como del suero (21,22). Todos los tratamientos REM mostraron valores de CE significativamente más altos que los tratamientos CTR y COT. Los resultados de ANOVA confirmaron la magnitud de este efecto, mostrando que la CE de REM1M2 (3,675 mS/cm) era significativamente mayor que la de CTRM2 (0,542 mS/cm) ($p < 0,001$) y CONTM1 (1,075 mS/cm) ($p < 0,001$).

El efecto aditivo del suero y la enmienda orgánica sobre la conductividad eléctrica del suelo (CE) es inconfundible. Aunque este aumento puede reflejar una mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas, también conlleva un riesgo significativo. Valores de CE que se acercan o superan el umbral de 4 mS/cm—como se observa en una réplica de REM1M2—pueden inducir estrés osmótico, reduciendo el potencial hídrico del suelo y dificultando la absorción de agua radicular incluso cuando la humedad del suelo es suficiente. Esto puede resultar en una germinación reducida, un crecimiento vegetal más lento, un desarrollo radicular restringido y pérdidas de rendimiento, especialmente en especies sensibles a la sal o en las primeras fases del cultivo (6,17). Además, la elevación sostenida de la CE puede promover desequilibrios nutricionales mediante antagonismos iónicos (por ejemplo, interferencia con la absorción de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+}), aumentar el riesgo de fitotoxicidad inducida por la sal y limitar la actividad de microorganismos clave implicados en la mineralización y la degradación de compuestos orgánicos (26,27).

En este contexto, el aumento de CE observado en REM1 constituye una señal de alerta de posible salinización secundaria asociada a la gestión combinada del residuo lácteo y la enmienda orgánica (28). Aunque este efecto se evaluó en un corto periodo (7–15 días), sus implicaciones para la productividad agrícola futura justifican el monitoreo de la dinámica salina a lo largo del tiempo, especialmente en condiciones de campo donde pueden variar los procesos de lixiviación, drenaje e intercambio iónico. Por lo tanto, aunque ABONISSA mostró efectos positivos en los indicadores de fertilidad (pH, OM y CEC), su uso debe ir acompañado de una gestión cuidadosa de la dosis, estrategias de mitigación de salinidad (por ejemplo, aplicaciones divididas, lixiviación controlada o uso de materiales de menor salinidad) y evaluación de las respuestas locales de cultivos para garantizar la sostenibilidad agronómica.

Análisis de humedad

El contenido de humedad del suelo es una propiedad dinámica que desempeña un papel crucial en la regulación de los procesos biológicos, la disponibilidad de nutrientes y las características físicas del suelo (29). En este estudio, el tratamiento CTR tuvo un contenido medio de humedad del 4,415% en M1, que aumentó hasta el 5,600% en M2 (Figura 4). Los andisoles son generalmente conocidos por su alta capacidad de retención de agua (30,31), por lo que los niveles de humedad iniciales relativamente bajos en el CTR pueden deberse a las condiciones antecedentes específicas antes de que comenzara el experimento. El aumento significativo de humedad de M1 a M2 en el tratamiento CTR probablemente sea resultado directo del riego controlado aplicado. La adición de suero (tratamiento CANT) elevó el contenido de humedad al 5,755% en M1 y al 5,660% en M2, una consecuencia lógica del alto contenido de agua del propio suero (25). El tratamiento CONT mostró una humedad significativamente mayor que el CTR en M1, sin diferencias significativas entre sus dos tiempos de muestreo.

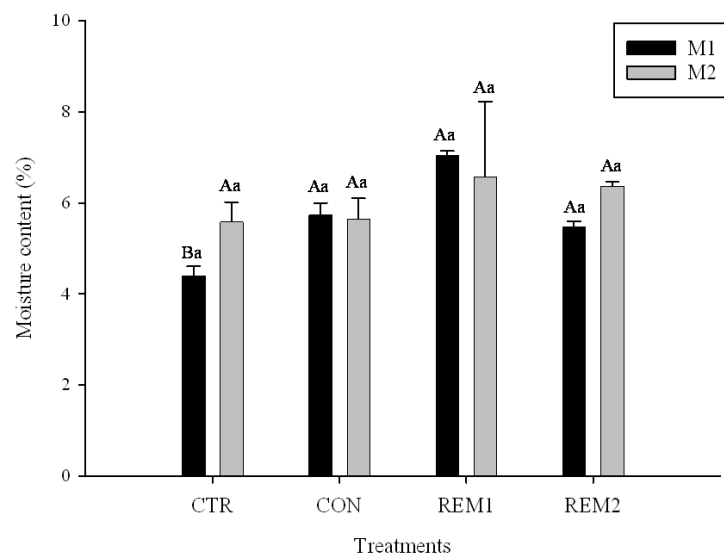


Figura 4. Humedad (%) en el suelo sometido a diferentes tratamientos

Los tratamientos REM1 y REM2, que recibieron tanto suero como fertilizante orgánico, mostraron los mayores contenidos de humedad en general (Figura 4). El tratamiento con REM1 tuvo una media del 7,045% de humedad en M1 y del 6,580% en M2, mientras que el tratamiento con REM2 promedió un 5,490% en M1 y un 6,380% en M2. Esto se debe al efecto combinado del agua introducida con el suero y a la mayor capacidad de retención de agua proporcionada por el fertilizante orgánico (32). Todos los tratamientos REM mantuvieron consistentemente niveles de humedad significativamente superiores al CTR y similares o superiores al tratamiento CANT. La ANOVA destacó aún más esto, mostrando que REM1M1 (7,045%) tenía un contenido de humedad significativamente mayor que CTRM1 (4,415%) ($p = 0,020$).

El impacto inmediato del agua añadida a través del suero y el fertilizante queda claramente demostrado. Aunque se sabe que la materia orgánica del fertilizante mejora la retención de

agua a largo plazo al mejorar la estructura del suelo (33), en el corto periodo de tiempo de este estudio, el factor predominante fue el agua añadida directamente. La notable variabilidad observada en las réplicas del tratamiento REM1M2 (que oscila entre el 4,94% y el 8,22%) sugiere cierto grado de heterogeneidad en la mezcla de enmienda suelo-suelo. A lo largo plazo, se espera que la materia orgánica se integre más completamente con el suelo, lo que conduzca a un aumento más estable y uniforme de la capacidad de retención de agua y a una mejora general en la estructura del suelo.

Análisis de densidad global

La densidad volumétrica (BD) es un indicador físico clave de la compactación del suelo y, inversamente, de su porosidad (29). El tratamiento de control (CTR) mostró valores medios de TB de 0,8700 g/cm³ en M1 y 0,8956 g/cm³ en M2 (Figura 5). Estos valores son típicos de los andisoles, conocidos por sus bajas densidades a granel, que generalmente oscilan entre 0,5 y 1,0 g/cm³, característica atribuida a su alta porosidad y estructura bien desarrollada (30,31).

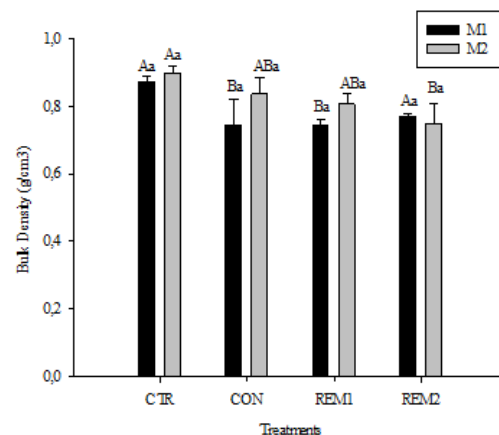


Figura 5. Densidad aparente (g/cm³) en suelos sometidos a diferentes tratamientos

No se observaron diferencias significativas en la TB entre los dos tiempos de muestreo del tratamiento CTR, que mostró consistentemente los valores más altos (y más compactos) entre todos los tratamientos. La aplicación de suero (tratamiento CANT) provocó una disminución significativa del BD hasta 0,7439 g/cm³ en M1, que luego rebotó parcialmente hasta 0,8345 g/cm³ en M2. Esta reducción inicial de densidad se debe a la incorporación de materia orgánica de baja densidad procedente del suero y a la estimulación de la actividad microbiana, que mejora la agregación del suelo y crea espacio poroso. El tratamiento CONT M1 tuvo un TB significativamente menor que el CTR.

Los tratamientos REM1 y REM2, que incluían el fertilizante orgánico, mantuvieron con éxito bajas densidades a granel (Figura 5). El tratamiento con REM1 promedió 0,7410 g/cm³ en M1 y 0,8045 g/cm³ en M2, mientras que el tratamiento con REM2 promedió 0,7670 g/cm³ en M1 y 0,7456 g/cm³ en M2. La densidad intrínsecamente baja del propio fertilizante contribuyó significativamente a este efecto. En el muestreo M1, ambos tratamientos REM presentaron valores de BD más bajos que el CTR. Para M2, el tratamiento con REM2 tenía

un TB significativamente menor que el CTR. Los resultados de la ANOVA proporcionaron un sólido respaldo estadístico para estas observaciones, mostrando que el valor de CTRM2 (0,8956 g/cm³) era significativamente superior al de REM1M1 (0,7410 g/cm³, $p=0,030$), CONTM1 (0,7439 g/cm³, $p=0,040$) y REM2M2 (0,7456 g/cm³). Esto confirma que tanto el suero como el fertilizante orgánico fueron eficaces para reducir la densidad de granel del suelo. Una reducción del BD es muy beneficiosa para la salud del suelo, ya que implica mayor porosidad, mejor aireación y condiciones para el crecimiento radicular (34). Estos hallazgos son coherentes con la investigación de Cabrera Lobelo & Unibio Salcedo (2019) (35) que también reportaron disminuciones significativas en el BD (a 0,62-0,70 g/cm³) en suelos contaminados con diésel tras la remediación con materiales orgánicos. Aunque los contaminantes difieren, el principio subyacente —que la adición de materia orgánica tiende a disminuir la densidad de volumen del suelo— queda claramente demostrado. La rápida biodegradación del suero y la mejora resultante en la agregación del suelo, junto con la contribución física del fertilizante orgánico de baja densidad, parecen ser los mecanismos clave que impulsan este cambio positivo.

Análisis de densidad de partículas

A diferencia de la densidad global, la densidad de partículas (PD) se refiere a la densidad de las partículas sólidas del suelo (excluyendo el espacio poroso) y está gobernada principalmente por la composición mineralógica y, en menor medida, por el contenido de materia orgánica (29).

En el suelo control (CTR), la densidad de partículas (PD) fue de 2,27 g/cm³ en M1 y 2,15 g/cm³ en M2 (Figura 6), valores consistentes con el rango esperado para los andisoles, donde la presencia de minerales de baja densidad (por ejemplo, alófanos) y altos contenidos de materia orgánica pueden reducir la PD en comparación con los suelos minerales típicos (30,31).

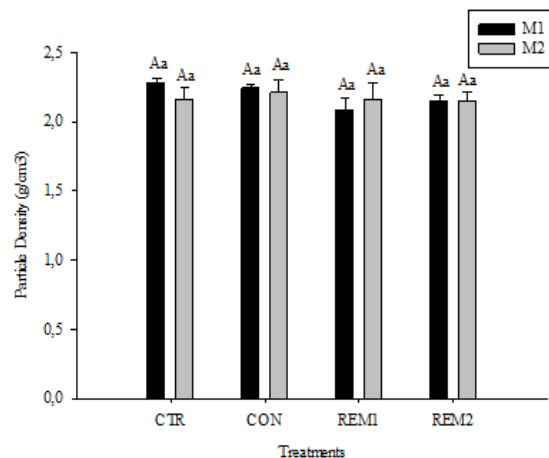


Figura 6. Densidad de partículas (g/cm³) en suelos sometidos a diferentes tratamientos

En general, no se detectaron diferencias significativas en la MP entre tratamientos ni entre tiempos de muestreo ($p > 0,05$), como refleja la caligrafía estadística uniforme en la Figura 6. El tratamiento contaminado con suero (CONT) mostró valores de EP de 2,24 g/cm³ (M1) y 2,20 g/cm³ (M2), que fueron estadísticamente indistinguibles del control. De manera similar, los tratamientos modificados por ABONISSA mostraron valores medios ligeramente inferiores

(REM1: 2,08 g/cm³ en M1 y 2,15 g/cm³ en M2; REM2: 2,15 g/cm³ en M1 y 2,14 g/cm³ en M2), pero sin diferencias significativas. Aunque, en teoría, la incorporación de materiales orgánicos de menor densidad podría disminuir la PD, estos resultados sugieren que a corto plazo (7–15 días) la composición de la fase sólida del suelo no cambió de forma detectable, o que cualquier efecto fue demasiado sutil en relación con la variabilidad inherente de la medición. En resumen, la estabilidad de la PD indica que los cambios observados en otras variables físicas (por ejemplo, densidad y porosidad) se deben principalmente a modificaciones en la estructura del suelo y la disposición de los poros, más que a cambios en la densidad de las partículas minerales.

Análisis de porosidad

La porosidad del suelo, definida como el volumen de espacios vacíos entre partículas sólidas, es una propiedad física fundamental que determina la capacidad del suelo para retener y moverse agua y aire. También define el hábitat disponible para las raíces de las plantas y los microorganismos esenciales del suelo (29). En este estudio, el suelo control (CTR) mostró inicialmente una porosidad media del 61,4443% a los 7 días (M1), que luego disminuyó al 57,9055% en 15 días (M2) (Figura 7). Esta alta porosidad inicial es característica de los andisoles, que son bien conocidos por su porosidad total que a menudo supera el 60%, una característica atribuida a su estructura bien desarrollada y a la baja densidad volumétrica de sus partículas constituyentes (30,31).

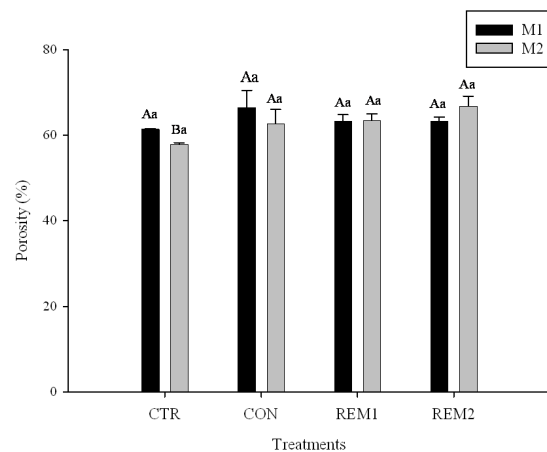


Figura 7. Porosidad (%) en suelos sometidos a diferentes tratamientos

La disminución estadísticamente significativa de la porosidad observada en el tratamiento CTR de M1 a M2 probablemente se deba a una ligera consolidación natural o asentamiento del suelo dentro de las macetas experimentales a lo largo del tiempo, acelerado por el régimen de riego. En marcado contraste, la adición de suero (tratamiento CON) provocó un aumento notable de la porosidad. En el día 7 (M1), la porosidad media subió al 66,5523% y se mantuvo elevada en el 62,7101% en el día 15 (M2) (Figura 7).

Este aumento de porosidad está directa e inversamente correlacionado con la disminución de la densidad global observada en el mismo tratamiento. Se puede explicar por dos factores principales: la incorporación física de materia orgánica del suero y, más significativamente, la

estimulación de la actividad microbiana, que favorece la formación de agregados estables en el suelo, creando así nuevos y mayores espacios porosos. La representación gráfica en la Figura 7, donde ambas barras CONT están etiquetadas como "Aa", indica que la porosidad en este tratamiento fue significativamente mayor que en el CTR en M2.

Los tratamientos que incluían fertilizante orgánico ABONISSA (REM1 y REM2) mantuvieron o aumentaron aún más los altos niveles de porosidad observados en el suelo contaminado (Figura 7). En el tratamiento con REM1, la porosidad media fue del 63,3324% en M1 y se mantuvo estable en 63,4760% en M2. Para el tratamiento REM2, la porosidad media fue del 63,3899% en M1 y aumentó hasta 66,8229% en M2. La incorporación de materia orgánica del fertilizante, especialmente del estiércol de aves y los residuos vegetales, es un método bien documentado para mejorar la estructura del suelo y aumentar la porosidad (21,34). Las etiquetas "Aa" en todas las barras REM1 y REM2 indican que estos tratamientos mantuvieron una porosidad significativamente alta, comparable o superior al tratamiento CONT y significativamente superior al CTR en M2.

La ANOVA bidireccional confirmó estas observaciones, revelando diferencias significativas entre los tratamientos. Por ejemplo, el tratamiento REM2M2 (porosidad media 66,8229%) tuvo una porosidad significativamente mayor que el tratamiento CTRM2 (porosidad media 57,9055%) (una diferencia de 8,917%, $p = 0,020$). De manera similar, el tratamiento CONTM1 (porosidad media 66,5523%) también presentó una porosidad significativamente mayor que CTRM2 (una diferencia del 8,647%, $p = 0,020$). Estos resultados proporcionan pruebas sólidas de que tanto la contaminación por suero como la posterior aplicación de fertilizante orgánico condujeron a un aumento beneficioso de la porosidad del suelo. La porosidad aumentada es muy deseable en la remediación del suelo, ya que facilita procesos cruciales como la aireación, el drenaje, la infiltración de agua y el transporte de nutrientes, y proporciona un entorno más favorable para el desarrollo radicular y la biodegradación de contaminantes (29). Por tanto, la mejora de la porosidad es uno de los beneficios más significativos de utilizar enmiendas orgánicas en los programas de remediación de suelos.

Análisis de la capacidad de intercambio catiónico (CEC)

La capacidad de intercambio catiónico (CEC) es una medida crítica de la capacidad de un suelo para retener iones cargados positivamente (cationes), que incluyen nutrientes esenciales de la planta como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y amonio (NH_4^+). Esta retención ocurre en las superficies cargadas negativamente de partículas de arcilla y materia orgánica, convirtiendo a la CEC en una piedra angular de la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes (29). En este estudio, el suelo control (CTR) demostró una CEC media de 33,3672 meq/100g a 7 días (M1), que aumentó a 38,3224 meq/100g en 15 días (M2) (Figura 8).

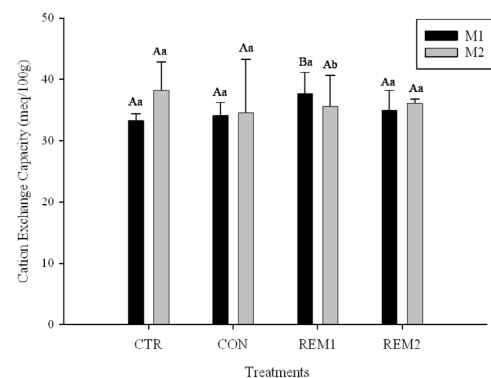


Figura 8. CIC (meq/100g) en suelos sometidos a diferentes tratamientos

Se sabe que los andisoles tienen una CEC variable que está fuertemente influenciada por el pH, así como por el contenido y tipo de materia orgánica y minerales arcillosos presentes. Valores CEC entre 20 y 50 meq/100g son comunes para este tipo de suelo. Una característica clave es que su CEC tiende a aumentar con el aumento del pH, debido a la carga dependiente del pH de minerales como el alofano y de la propia materia orgánica (30,31). La representación gráfica en la Figura 8, donde ambas barras CTR están etiquetadas como "Aa", indica que no hubo diferencias estadísticamente significativas en el CEC del suelo control entre los dos tiempos de muestreo.

La adición de suero (tratamiento CANT) dio lugar a valores de CEC similares o ligeramente superiores al control en M1, con una media de 34,1485 meq/100g. Para M2, la CEC media era de 34,6027 meq/100g (Figura 8). Aunque el suero contiene proteínas y otros compuestos orgánicos que teóricamente podrían proporcionar algunos sitios de intercambio, su impacto directo sobre la CEC del suelo mineral suele estar limitado a corto plazo, salvo que provoque cambios significativos en el pH o conduzca a la formación de nueva materia orgánica estable. Las etiquetas "Aa" en las barras CONT sugieren que, en general, no hubo diferencias significativas respecto al control ni entre sus propios tiempos de muestreo, aunque se observó un alto grado de variabilidad en las muestras CONTM2.

Los aumentos más sustanciales y consistentes en la CEC se observaron en los tratamientos modificados con fertilizante orgánico ABONISSA (REM1 y REM2), como se muestra en la Figura 8. En el tratamiento REM1, la CEC media fue de 37,7698 meq/100g. Para el tratamiento REM2, la CEC media fue de 35,0186 meq/100g en M1 y aumentó a 36,1298 meq/100g en M2. Este aumento significativo en la CEC se debe principalmente al alto contenido de materia orgánica estable y humificada presente en el fertilizante compostado (especialmente del estiércol de aves). Esta materia orgánica posee una alta densidad de grupos funcionales con carga negativa (grupos carboxilo y fenol) que son muy eficaces para retener cationes (21,22). curiosamente, el gráfico muestra que para REM1, la barra M1 ("Aa") es ligeramente superior a la barra M2 ("Ba"), lo que sugiere una posible disminución menor con el tiempo, aunque ambos valores permanecen elevados. Para REM2, ambas barras están etiquetadas como "Aa", lo que indica un CEC consistentemente alto.

La ANOVA exhaustiva y la prueba de Tukey revelaron interacciones complejas. Aunque una comparación indicó que CTRM2 tenía una CEC significativamente mayor que REM1M1, otras comparaciones mostraron que la CEC media de REM2M2 (36,1298 meq/100g) era significativamente mayor que la de REM1M1 ($p=0,003$), y que CONTM1 (34,1485 meq/100g) era significativamente menor que REM1M1 ($p < 0,001$). En conjunto, estas comparaciones sugieren que los tratamientos con fertilizante orgánico (REM) fueron más efectivos para aumentar la CEC que el suero solo (CON) o el control (CTR), siendo la dosis alta (REM1) un efecto inicial particularmente fuerte. Un aumento de la CEC es un indicador claro y positivo de una mayor fertilidad del suelo y de una mayor capacidad para retener nutrientes esenciales, evitando así su pérdida por lixiviación (34).

Análisis de materia orgánica (OM)

La materia orgánica (MO) del suelo es una piedra angular de la salud del suelo, actuando como un componente crucial que influye profundamente en la fertilidad del suelo, la estructura física y la intensidad de la actividad biológica. En este estudio, el suelo control (CTR) presentó un contenido medio de OM del 6,7826% a los 7 días (M1) y del 7,1285% a los 15 días (M2) (Figura 9). Estos niveles son totalmente coherentes con las características de los andisoles, que se sabe que acumulan cantidades sustanciales de OM. Esta acumulación se debe a la formación de complejos altamente estables entre la materia orgánica y los minerales únicos presentes en estos suelos, como el alofano y la imogolita, lo que ralentiza significativamente la tasa de descomposición (30,31).

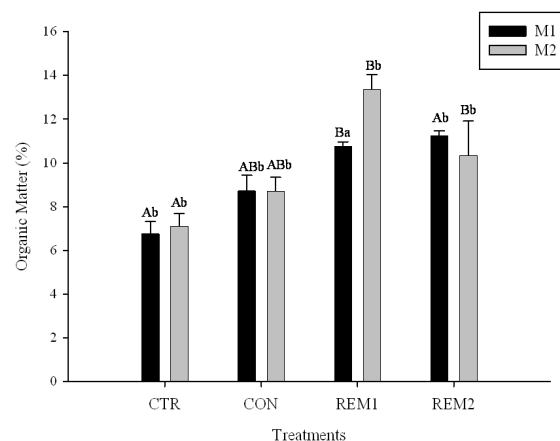


Figura 9. Materia orgánica (%) en el suelo sometida a diferentes tratamientos

Como se muestra en la Figura 9, tanto los puntos de datos CTR M1 como CTR M2 están etiquetados como "Ab." Esta anotación indica que no hubo diferencias estadísticamente significativas en el contenido de OM del suelo control entre los dos tiempos de muestreo, y que estos valores representan el nivel inicial más bajo de OM entre todos los tratamientos experimentales. La adición de suero (tratamiento CON) provocó un aumento notable en el contenido de OM, con un promedio del 8,7399% en M1 y del 8,7182% en M2 (Figura 9). Este aumento es una consecuencia directa y predecible de la contribución de los componentes orgánicos intrínsecos del propio suero.

La figura muestra además que ambas barras de datos para el tratamiento CONT están etiquetadas como "ABb." Esto indica que el contenido de OM en este tratamiento fue significativamente mayor que en el CTR (que pertenece al grupo "A"), pero no fue tan elevado como en algunos de los tratamientos remediados (que pertenecen al grupo "B"). La "b" minúscula para ambos puntos de tiempo indica que no hubo cambios significativos en el contenido de OM del suelo CONT entre los dos tiempos de muestreo.

Los aumentos más sustanciales e impactantes en el contenido de OM se observaron en los tratamientos modificados con fertilizante orgánico ABONISSA (REM1 y REM2), como se muestra en la Figura 9. El tratamiento con REM1 promedió un impresionante 10,7724% de OM en M1, y este valor aumentó significativamente hasta el 13,3733% en M2. Este aumento temporal de OM dentro del tratamiento REM1 es estadísticamente significativo, como denotan las diferentes letras minúsculas ("a" para M1 y "b" para M2). El tratamiento con REM2 mostró un contenido de OM del 11,2687% en M1, con una ligera, aunque estadísticamente significativa, disminución hasta el 10,3606% en M2.

Este marcado aumento general de OM en los tratamientos REM se atribuye directamente a la sustancial aportación de materia orgánica estabilizada y rica en carbono procedente del fertilizante compostado (36,37). La ANOVA bidireccional y la posterior prueba de Tukey confirmaron que las diferencias en el contenido de OM entre los tratamientos eran muy significativas ($p < 0,001$). Para ilustrar, el tratamiento con REM1M2 (con una OM media de 13,3733%) tuvo un contenido de MO significativamente mayor que el tratamiento CTRM1 (MO medio de 6,7826%), con una diferencia del 6,591% ($p < 0,001$). La adición de esta materia orgánica es fundamental para mejorar una amplia gama de propiedades del suelo y para estimular la actividad microbiana esencial para la degradación de contaminantes.

Análisis de texturas

La textura del suelo, que se define por las proporciones relativas de arena, limo y partículas de arcilla, es una propiedad física fundamental y relativamente estable del suelo. Ejerce una profunda influencia en una amplia variedad de funciones del suelo, incluyendo la retención de agua, la aireación, la laborabilidad (tilth), la capacidad de suministrar nutrientes y la susceptibilidad a la erosión(13). Como resultado, no se espera un cambio real en la clase textural en periodos cortos (7–15 días) tras la adición de enmiendas orgánicas; por lo tanto, las diferencias observadas entre tiempos de muestreo y tratamientos deben interpretarse como variaciones en la "textura aparente" o como limitaciones del método del hidrómetro (Bouyoucos), especialmente en andisoles y suelos con alto contenido de materia orgánica (MO) (38,40). En este estudio, la materia orgánica no se eliminó antes del análisis con H_2O_2 , lo que pudo haber promovido la dispersión incompleta de partículas finas y la formación de microagregados, afectando así la estimación de fracciones de arena, limo y arcilla. Así, los resultados reflejan principalmente cambios en la agregación y la sensibilidad metodológica más que modificaciones reales en la textura mineral del suelo (41).

Como se muestra en la Tabla 3, tanto el suelo control como el suelo contaminado con suero pertenecen a la clase textural de la argila arenosa tanto en M1 como en M2, lo que es coherente con la estabilidad esperada de la fracción mineral. Los tratamientos modificados por ABONISSA se clasificaron como franco arenoso en M1, seguidos de un cambio a tierra arenosa (REM1 en M2) y tierra arenosa (REM2 en M2). Estas variaciones no indican un cambio real en la textura mineral, sino más bien diferencias en el estado de agregación y/o la eficiencia de dispersión durante el análisis (41,42).

Tabla 3. Porcentajes de fracciones minerales

Ejemplo	% Arena	% Arcilla	% de limo	Total	Clase textural
Control (M1)	54	36	10	100	Argila arenosa
Contaminado (M1)	57	30	13	100	Argila arenosa
Remediado 1 (M1)	60	11	29	100	Tierra arenosa
Remediado 2 (M1)	55	11	34	100	Tierra arenosa
Control (M2)	51	34	15	100	Argila arenosa
Contaminado (M2)	55	35	10	100	Argila arenosa
Remediado 1 (M2)	47	13	40	100	Tierra
Remediado 2 (M2)	51	11	38	100	Tierra arenosa

El método Bouyoucos asume dispersión completa de partículas; sin embargo, bajo condiciones de alto contenido orgánico (MO) —y especialmente tras añadir una enmienda orgánica— el MO puede actuar como agente cementante, promoviendo la formación de agregados y microagregados estables. Bajo estas condiciones, parte de la fracción de arcilla puede no dispersarse completamente y puede asentarse como unidades mayores, lo que lleva a una sobreestimación relativa de fracciones más gruesas y una aparente subestimación de la arcilla (41,43). Este efecto es relevante para interpretar las diferencias en la clase textural medida entre M1 y M2 en suelos enmendados.

Además, los andisoles suelen contener minerales amorfos (por ejemplo, alofano/imogolita) y complejos organo-minerales que favorecen una fuerte microagregación y dificultan la dispersión de la arcilla. Por lo tanto, incluso cuando se utilizan dispersantes químicos, los resultados del hidrómetro pueden reflejar parcialmente el estado de agregación más que la verdadera distribución del tamaño de las partículas minerales (44). En este sentido, los resultados de la Tabla 3 deben discutirse como evidencia indirecta de cambios físicos rápidos inducidos por la enmienda (agregación/estabilidad estructural), no como cambios en la textura mineral.

Análisis de la reducción de grasas y aceites en el suelo contaminado tras la aplicación de fertilizantes orgánicos como método de remediación

La cuantificación del Material Extractable de N-Hexano (HEM) sirve como un indicador esencial para determinar la concentración de grasas, aceites y otros compuestos lipídicos en el suelo. Esta medición es fundamental tanto para evaluar la magnitud de la contaminación como para evaluar la eficacia de las estrategias de remediación implementadas. En este estudio, el suelo de control (CTR), que representa la condición base sin contaminantes añadidos ni enmiendas, mostró un contenido medio de HEM de 949,25 mg/kg en la primera muestra a los 7 días (M1), como se muestra en la Figura 11. Es importante reconocer que los suelos, incluso en ausencia de contaminación industrial directa, contienen de forma natural una fracción lipídica derivada de la descomposición de residuos vegetales y animales, así como de la actividad metabólica de la comunidad microbiana autóctona del suelo (45). En este contexto, se espera la presencia de un nivel base detectable de HEM en el suelo de control y no indica necesariamente contaminación residual. Además, la norma NMX-AA-134-SCFI-2006 define el HEM de forma amplia como el material extraído con n-hexano, incluyendo no solo grasas y aceites frescos, sino también ceras, compuestos hidrofóbicos asociados a materia orgánica y otros hidrocarburos no volátiles. En consecuencia, se utilizó el suelo control como referencia para el contenido natural de material extraíble por hexano, y los efectos del tratamiento se interpretaron en relación con esta línea base. Así, los valores medidos de HEM reflejan tanto la fracción lipídica natural del suelo como la fracción extractable asociada a la dinámica suelo-enmienda, evitando una sobreestimación de la contaminación residual basada únicamente en la presencia de HEM (9).

Inicialmente, el suelo control (CTR) tenía un contenido medio de HEM de 907,3 mg/kg (Figura 11). Esta concentración basal es coherente con la fracción lipídica natural que se encuentra en suelos con un contenido notable de materia orgánica, originada a partir de la descomposición de varios residuos biológicos y de la biomasa microbiana propia del suelo.

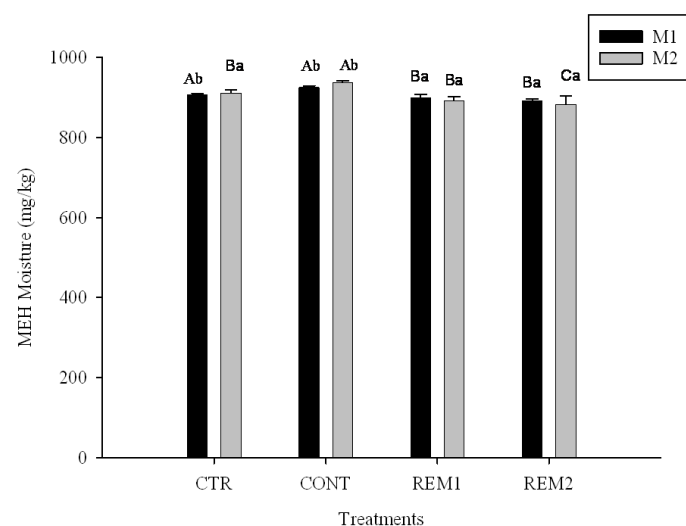


Figura 11. Grasas y aceites (mg/kg) en diferentes tratamientos

Tras la aplicación del contaminante, los tratamientos con suero (CONT) mostraron un aumento perceptible en el contenido de HEM, alcanzando valores medios de 925,3 mg/kg en la primera muestra y 937,4 mg/kg en la segunda. Este aumento se atribuye directamente a la fracción de grasa intrínseca presente en el suero. Aunque esta fracción es un componente menor de la composición general del suero, contribuye de forma medible a la carga total de lípidos en el suelo (9). Los tratamientos modificados con fertilizante orgánico ABONISSA (REM1 y REM2) demostraron los efectos más significativos y positivos. Los suelos remediados mostraron concentraciones de HEM que fueron consistentemente y sustancialmente menores que las del suelo contaminado, con valores medios que bajaron hasta 882,5 mg/kg. De manera notable, estos valores no solo eran inferiores a los del tratamiento contaminado, sino que, en algunos casos, incluso eran inferiores a los niveles de fondo del suelo control.

Un riguroso análisis estadístico confirmó esta tendencia con un alto grado de certeza, revelando diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos contaminados y remediados ($p < 0,05$). Por ejemplo, la comparación entre el tratamiento con CONT2 y el tratamiento REM2_2 arrojó un valor p inferior a 0,001, lo que proporciona una validación robusta de la eficacia del tratamiento para reducir la concentración de lípidos.

Este pronunciado efecto remedial se atribuye a un proceso de bioestimulación. La adición del fertilizante orgánico ABONISSA, rico en nutrientes esenciales y carbono estabilizado, actuó como catalizador, promoviendo el crecimiento y la actividad metabólica de la comunidad microbiana nativa. Estos microorganismos, al encontrarse en un entorno enriquecido nutricionalmente, pudieron utilizar los compuestos lipídicos como sustrato y fuente de energía fácilmente disponibles, acelerando así su degradación. Este es un principio fundamental de la biorremediación para suelos contaminados con compuestos orgánicos, donde estimular la microbiota autóctona suele ser una estrategia más eficaz que introducir cepas microbianas externas (46).

Para situar la magnitud de este impacto en contexto, es pertinente señalar que la carga inicial de contaminantes en este estudio (cerca de 1000 mg/kg) es considerablemente menor que las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) que a menudo se informan en otros estudios de biorremediación, que pueden oscilar entre 10.000 y 50.000 mg/kg. Esta menor carga inicial probablemente facilitó un proceso de remediación más rápido y eficiente por parte de la microbiota del suelo, que no fue inhibida por una toxicidad excesiva y, por tanto, pudo metabolizar eficazmente el contaminante (47).

La dinámica temporal del proceso reveló una respuesta microbiana acelerada, ya que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las muestras realizadas a los 7 y 15 días ($p > 0,05$). Esto sugiere que la comunidad microbiana, estimulada por la adición del fertilizante, comenzó la degradación de los lípidos casi de inmediato. Este rápido inicio de degradación contrasta fuertemente con la remediación de contaminantes más resistentes, que a menudo requieren largos periodos de aclimatación antes de observar una reducción significativa (48). La biodegradación de lípidos complejos es un proceso que requiere tiempo y la acción concertada de diversas poblaciones microbianas, y este estudio demuestra eficazmente que la bioestimulación con un fertilizante orgánico adecuado puede optimizar significativamente este proceso, incluso desde sus primeras etapas (9).

Conclusiones

El objetivo principal de este estudio fue evaluar de manera exhaustiva la viabilidad de aplicar la enmienda orgánica ABONISSA como estrategia de manejo para los andisoles afectados por contaminación por suero en La Florida (Nariño). La caracterización morfológica in situ estableció una línea base, revelando un perfil de suelo estratificado con variabilidad textural y características como moteado y capas endurecidas, que influyen en el comportamiento hidrológico y condicionan tanto la movilidad de los contaminantes como la respuesta del suelo a la enmienda.

La evaluación fisicoquímica confirmó que la aplicación de suero sin tratar produce alteraciones indeseables, especialmente una ligera acidificación y un notable aumento de la conductividad eléctrica, lo que destaca su potencial para inducir procesos de salinización en el ambiente del suelo. Aunque se observaron cambios físicos favorables —como una reducción de la densidad a granel y un aumento de la porosidad— el balance general indica que el suero puede comprometer la calidad del suelo y apoya la necesidad de medidas correctivas.

Durante el corto periodo de evaluación (7–15 días), la aplicación de ABONISSA en los tratamientos REM1 y REM2 produjo una respuesta inmediata y favorable en variables clave del suelo contaminado con suero, especialmente la neutralización de la acidez y aumentos significativos en la capacidad de intercambio de materia orgánica y cationes (CEC). Estos resultados sugieren que la enmienda puede actuar como un agente rápido para restaurar la funcionalidad química del suelo, promoviendo condiciones propicias para la actividad microbiana y la recuperación de la fertilidad. Sin embargo, es importante enfatizar que este marco temporal corresponde principalmente a una etapa inicial o respuesta temprana; Por lo tanto, los hallazgos representan efectos a corto plazo más que una remediación definitiva del suelo.

A pesar de las mejoras observadas, se identificó un desafío crítico asociado al uso combinado del suero y la enmienda orgánica: el marcado aumento de la conductividad eléctrica (CE), especialmente en la dosis más alta (REM1). Esto representa un riesgo agronómico potencial debido al estrés osmótico y a posibles efectos sobre ciertos grupos microbianos; Por lo tanto, cualquier aplicación a gran escala debe incorporar estrategias de gestión de la salinidad y monitorización a lo largo del tiempo.

La comparación de dosis (REM1: 1000 g vs. REM2: 500 g por 3 kg de suelo) mostró que, aunque REM1 tendía a inducir cambios más rápidos y pronunciados, también representaba el mayor riesgo de salinización. En contraste, REM2 logró mejoras significativas en la mayoría de los parámetros evaluados con un aumento menor en la CE, lo que sugiere que una dosis moderada podría proporcionar un mejor equilibrio entre la recuperación fisicoquímica y el riesgo de salinidad. No obstante, debe reconocerse que la dosis de REM1 es alta y puede ser difícil de implementar directamente en condiciones de campo; Por lo tanto, estos ensayos pueden interpretarse como un enfoque ex situ (condiciones comparables a un biopile), orientado a evaluar respuestas inmediatas bajo un tratamiento de alta intensidad, mientras la validación de escalabilidad aún está pendiente.

Además, ABONISSA mostró potencial para reducir la fracción lipídica del suelo a corto plazo, como lo demuestran las disminuciones del material extraíble de n-hexano (HEM) en relación con el suelo contaminado. Este resultado sugiere un proceso inicial de biotransformación asociado a la bioestimulación de la microbiota nativa; sin embargo, la degradación biológica completa de los compuestos grasos suele requerir periodos más largos. Por ello, se recomienda ampliar el periodo de monitorización (semanas a meses) para confirmar la persistencia y estabilidad del efecto observado.

En resumen, ABONISSA representa una alternativa prometedora para mejorar las condiciones fisicoquímicas de los andisoles afectados por el suero en las primeras fases, pero su aplicabilidad práctica requiere estudios a largo plazo —preferiblemente en condiciones de campo— para evaluar la dinámica de la salinidad a lo largo del tiempo, las respuestas de los cultivos y la sostenibilidad general del tratamiento.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Juan Sebastián Garzón Quiñonez Lisbeth Carolina Rodríguez Patichoy Angela María Sánchez Madroñero. **Curación de datos:** Juan Sebastián Garzón Quiñonez Lisbeth Carolina Rodríguez Patichoy Angela María Sánchez Madroñero. **Análisis formal:** Juan Sebastián Garzón Quiñonez Lisbeth Carolina Rodríguez Patichoy Angela María Sánchez Madroñero. **Investigación:** Juan Sebastián Garzón Quiñonez Lisbeth Carolina Rodríguez Patichoy Angela María Sánchez Madroñero, Jenny Lucia Huertas Delgado. **Metodología:** Juan Sebastián Garzón Quiñonez Lisbeth Carolina Rodríguez Patichoy Angela María Sánchez Madroñero, Jenny Lucía Huertas Delgado. **Dirección de Proyecto:** Juan Sebastián Garzón, Quiñonez Lisbeth Carolina Rodríguez Patichoy Angela María Sánchez Madroñero Jenny Lucia Huertas Delgado. **Recursos:** Juan Sebastián Garzón Quiñonez Lisbeth Carolina Rodríguez Patichoy Angela María Sánchez Madroñero Jenny Lucia Huertas Delgado. **Supervisión:** Jenny Lucía Huertas Delgado. **Validación:** Jenny Lucía Huertas Delgado. **Redacción - borrador original - Elaboración:** Juan Sebastián Garzón Quiñonez Lisbeth Carolina Rodríguez Patichoy Angela María Sánchez Madroñero Jenny Lucia Huertas Delgado. **Redacción - revisión y edición -Elaboración:** Juan Sebastián Garzón Quiñonez Lisbeth Carolina Rodríguez Patichoy Angela María Sánchez Madroñero Jenny Lucia Huertas Delgado.

Financiación: no declara. Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

Referencias

1. Patiño-Burbano RE, Jiménez-Velásquez SDC, Cabrera-Cabreta SL, Guerrero-Narvaez EM, Montes-Vergara JC, Castro-Rincón E, Rodríguez-Bautista JL, Parra-Arango JL. Caracterización higiénico-sanitaria de la leche bovina del departamento de Nariño. Rev MVZ Córdoba. 2023;28:e2895. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2895>
2. Cabrera M, Salazar C. El cultivo de hortalizas de clima cálido [Internet]. Agrosavia.co; 2004. Available from: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/17559>

3. Muñoz D, López M. Implementación de un mecanismo de aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos para el hogar infantil personitas de Tunja (Boyacá) [Internet]. Edu.co; 2018. Available from: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/26433/jmlopez1.pdf;jsessionid=4F842BDD78C7ADB2FC8DBF7FE389E9B0?sequence=1>
4. Cotrina-Cabello VR, Alejos-Patiño IW, Cotrina-Cabello GG, Córdova-Mendoza P, Córdova-Barrios IC. Efecto de abonos orgánicos en suelo agrícola de Purupampa Panao, Perú. [Internet]. Cent agríc; 2020;47(2). Available from: <http://ref.scielo.org/862pr8>
5. Lainez AM, López Iglesias E. EL SECTOR LÁCTEO EN ESPAÑA [Internet]. Vacapinta.com; 2022. Available from: <https://vacapinta.com/media/files/fichero/monografias-44-sector-lacteo.pdf>
6. Bauder TA, Waskom RM, Davis JG. Irrigation Water Quality Criteria [Internet]. Irrigationtoolbox.com; 2014. Available from: <https://irrigationtoolbox.com/ReferenceDocuments/Extension/Colorado/00506.pdf>
7. Moreno Reséndez A, Briceño Contreras EA, Núñez V, Manuel L, Hernández Herrera JA. Capítulo VI: Abonos orgánicos: una alternativa sustentable en la agricultura [Internet]. Researchgate.net. 2019. Available from: https://www.researchgate.net/publication/341358160_Capitulo_VI_Abonos_organicos_una_alternativa_sustentable_en_la_agricultura
8. Bolaños Martínez A. Buesaco Territorio y memoria [Internet]. Gov.co; 2015. Available from: <https://www.buesaco-narino.gov.co/biblioteca-municipal/buesaco-territorio-y-memoria-por-arturo-bolanos-martinez-494201>
9. NMX-AA-134-SCFI-2006. Suelos–Hidrocarburos fracción pesada por extracción y gravimetría–Método de prueba [Internet]. México, D.F.; 2006. Available from: http://104.209.210.233/gobmx/repositorio/FRACCION_I/NMX134SCFI2006IDROCARBUROSPESADO.pdf
10. Dane JH, Topp GC, editors. Methods of soil analysis. Part 4, Physical methods [Internet]. Madison (WI): Soil Science Society of America; 2002. Available from: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.2136/sssabookser5.4>
11. Porta Casanellas J, López-Acevedo Reguerín M, Roquero de Laburu C. Edafología para la agricultura y el medio ambiente [Internet]. 3a ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa; 2003. Available from: <https://es.scribd.com/document/601573424/Edafologia-Para-La-Agricultura-y-El-Medio-Ambiente-3era-Edicion-2003-J-Porta-C-M-Lopez-Acevedo-R-C-Roquero-L>
12. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps [Internet]. 4th ed. Vienna (AT): International Union of Soil Sciences (IUSS); 2022. Available from: https://files.isric.org/public/documents WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf
13. Soil Science Division Staff. Soil survey manual [Internet]. (Agriculture Handbook No. 18). Washington (DC): United States Department of Agriculture; 2017. (Minor amendments Feb 2018). Available from: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/The-Soil-Survey-Manual.pdf>

14. Oades JM. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil*. 1984;76:319-337. doi: 10.1007/BF02205590. <https://doi.org/10.1007/BF02205590>
15. AGROACTIVO. FICHA-TECNICA-ABONISSA.pdf [Internet]. 2022. Available from: <https://agroactivocol.com/producto/nutricion-vegetal/enmiendas-y-acondicionadores/organicas/abono-organico-abonissa>
16. López-Barreto RE, Becerra-Jiménez ML, Borrás-Sandoval LM. Caracterización físico-química y microbiológica del lactosuero del queso Paipa. *Cien Agri*. 2018;15:99-106. <https://doi.org/10.19053/01228420.v15.n2.2018.8565>
17. Brady NC, Weil RR. The nature and properties of soils [Internet]. 15th ed. Columbus (OH): Pearson; 2016. Available from: https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition.
18. Nanzyo M, Shoji S, Dahlgren R. Chapter 7 Physical Characteristics of Volcanic Ash Soils. *Developments in Soil Science* [Internet]. Elsevier; 1993 [cited 2025 Aug 20]. p. 189-207. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70268-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70268-X)
19. Panesar P, Kennedy J, Gandhi D, Bunko K. Bioutilisation of whey for lactic acid production. *Food Chemistry*. 2007;105:1-14. doi: 10.1016/j.foodchem.2007.03.035. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.035>
20. Akay A, Sert D. The effects of whey application on the soil biological properties and plant growth. *EURASIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE (EJSS)*. 2020;9:349-355. doi: <https://doi.org/10.18393/ejss.785380>
21. Agegnehu G, Srivastava AK, Bird MI. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology*. 2017;119:156-170 <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.008>
22. Whalen JK, Chang C, Clayton GW, Carefoot JP. Cattle Manure Amendments Can Increase the pH of Acid Soils. *Soil Science Soc of Amer J*. 2000;64:962-966. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.643962x>
23. Hue NV, Licudine DL. Amelioration of Subsoil Acidity through Surface Application of Organic Manures. *J of Env Quality*. 1999;28:623-632 <https://doi.org/10.2134/jeq1999.00472425002800020028x>
24. Magdoff F. Building Soils for Better Crops: Organic Matter Management. *Soil Science*. 1993;156:371 <https://doi.org/10.1097/00010694-199311000-00014>
25. Prazeres AR, Carvalho F, Rivas J. Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*. 2012;110:48-68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>
26. Zhang T, Wang T, Liu KS, Wang L, Wang K, Zhou Y. Effects of different amendments for the reclamation of coastal saline soil on soil nutrient dynamics and electrical conductivity responses. *Agricultural Water Management*. 2015;159:115-122 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.002>

27. Yan N, Marschner P, Cao W, Zuo C, Qin W. Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research*. 2015;3:316-323. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.11.003>
28. Pessoa LGM, Freire MBGDS, Green CHM, Miranda MFA, Filho JCDA, Pessoa WRLS. Assessment of soil salinity status under different land-use conditions in the semiarid region of Northeastern Brazil. *Ecological Indicators*. 2022;141:109139. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109139>
29. Hillel D. *Environmental soil physics*. San Diego, CA: Academic Press; 1998.
30. FAO, editor. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* [Internet]. LCC MAKES Press; 2024 [cited 2025 Aug 19]. Available from: https://docs.soilsociety.ru/Мировая%20реферативная%20база%20почвенных%20ресурсов_эл.pdf
31. Dahlgren RA, Saigusa M, Ugolini FC. The Nature, Properties and Management of Volcanic Soils. *Advances in Agronomy* [Internet]. Elsevier; 2004 [cited 2025 Aug 19]. p. 113-182. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82003-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82003-5)
32. Minasny B, McBratney AB. Estimating the Water Retention Shape Parameter from Sand and Clay Content. *Soil Science Soc of Amer J*. 2007;71:1105-1110. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0298N>
33. Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*. 2009;41:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>
34. Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*. 2004;79:7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
35. Lobelo LMC, Salcedo MTU. Evaluación de la remoción de grasas y aceites en suelo contaminado con diésel b10 y biodiésel aplicando la tecnología OSE II implementada por EOM CONSULTING SAS. (tesis). 2019. <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/93e1850a-bffc-46b0-a844-dd8131ae01a9/content>
36. Diacono M, Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agron Sustain Dev*. 2010;30:401-422. <https://doi.org/10.1051/agro/2009040>
37. Larney FJ, Hao X. A review of composting as a management alternative for beef cattle feedlot manure in southern Alberta, Canada. *Bioresource Technology*. 2007;98:3221-3227. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.005>
38. Maticic M, Dugan I, Bogunovic I. Challenges in Sustainable Agriculture-The Role of Organic Amendments. *Agriculture*. 2024;14:643. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040643>
39. Stöcker CM, Bamberg AL, Stumpf L, Monteiro AB, Cardoso JH, de Lima ACR. Short-term soil physical quality improvements promoted by an agroforestry system. *Agroforestry Systems*.

2020;94:2053-2064. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00524-3>

40. Dong L, Zhang W, Xiong Y, Zou J, Huang Q, Xu X, Ren P, Huang G. Impact of short-term organic amendments incorporation on soil structure and hydrology in semiarid agricultural lands. *International Soil and Water Conservation Research*. 2022;10:457-469. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.10.003>

41. Mwendwa S. Revisiting soil texture analysis: Practices towards a more accurate Bouyoucos method. *Heliyon*. 2022;8:e09395. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09395>

42. Beretta AN, Silbermann AV, Paladino L, Torres D, Bassahun D, Musselli R, García-Lamohte A. Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method. *Cienc Inv Agr*. 2014;41:25-26. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000200013>

43. Jensen JL, Schjønnig P, Watts CW, Christensen BT, Munkholm LJ. Soil texture analysis revisited: Removal of organic matter matters more than ever. Paz-Ferreiro J, editor. *PLoS ONE*. 2017;12:e0178039. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178039>

44. Clunes J, Dörner J, Bravo A, Jara R, Zúñiga F. DID WE UNDERESTIMATE SILT AND CLAY CONTENT IN THE TEXTURAL ANALYSIS? *Chil j agric anim sci*. 2022;38:94-103 <https://doi.org/10.29393/CHJAAS38-9DWJF50009>

45. Marín Velásquez TD. Crecimiento de plantas de maíz (Zea mays) en un suelo contaminado con petróleo y remediado con extracto de cáscaras de naranja (Citrus sinensis). *Enfoque UTE*. 2016;7:1-13. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n3.101>

46. Anza Cruz HG, Orantes Calleja PD, González Herrera R, Ruíz Marín A, Espinoza Medinilla E, Martínez Salinas RI, et al. Biorremediación de suelos contaminados con aceite automotriz usados mediante sistema de biopilas. 5(12) <https://doi.org/10.31644/IMASD.12.2016.a04>

47. Vásquez MC, Guerrero Figueroa JT, Quintero ADP. Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados. *Rev Colomb Biotecnol*. 2010;12(1):141-157. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/776/77617786014.pdf>

48. Marín Velásquez TD, Gota Díaz CN, Ortiz Pinto TC. Evaluación del extracto obtenido como lixiviado de fibra de coco (Cocos nucifera) como bioestimulante en la remediación de un suelo contaminado con petróleo. *Enfoque UTE*. 2018;9:180-193. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.303>