


ARTÍCULO DE REVISIÓN

Innovación sostenible en geotecnia: Comportamiento de suelos arcillosos estabilizados con aditivos orgánicos y subproductos agroindustriales

Sustainable innovation in geotechnics: Behavior of clay soils stabilized with organic additives and agroindustrial byproducts

Isla, J. ¹ 

RESUMEN

La estabilización de suelos arcillosos es un reto permanente en obras civiles debido a su plasticidad, baja capacidad portante y variaciones volumétricas por humedad. Ante el impacto ambiental y económico de estabilizantes tradicionales (cemento y cal), se ha incrementado el interés por aditivos orgánicos biopolímeros, residuos lignocelulósicos, enzimas y melaza como alternativas más sostenibles. Estos compuestos, generalmente derivados de fuentes vegetales o subproductos industriales, interactúan con las partículas del suelo mediante enlaces físicos y químicos que mejoran la compactación, la resistencia y reducen la permeabilidad. En esta revisión se sintetizan los hallazgos recientes sobre rendimiento, mecanismos de acción y aplicabilidad práctica de estos aditivos en suelos arcillosos, con énfasis en sus ventajas potenciales frente a los estabilizantes convencionales. La presente revisión sistematiza los hallazgos más relevantes de los últimos cinco años, concluyendo que aditivos como la goma xantana y goma guar ofrecen los mejores rendimientos en resistencia a la compresión ($UCS > 290$ kPa), mientras que los residuos agroindustriales representan la opción más viable económicamente para caminos rurales, validando así su potencial como sustitutos ecológicos efectivos.

Palabras clave: Mejoramiento de subrasantes; pavimentos ecológicos; índice CBR; plasticidad de arcillas; biotecnología vial.

ABSTRACT

The stabilization of clayey soils is a persistent challenge in civil engineering due to their plasticity, low bearing capacity, and moisture-induced volumetric changes. Given the environmental and economic impacts of traditional stabilizers (cement and lime), interest has increased in organic additives biopolymers, lignocellulosic residues, enzymes, and molasses as more sustainable alternatives. These compounds interact with soil particles through physical and chemical bonds that improve compaction, enhance strength, and reduce permeability. This review synthesizes recent findings from the last five years, concluding that additives such as xanthan gum and guar gum offer the best performance in unconfined compressive strength ($UCS > 290$ kPa), while agro-industrial residues represent the most economically viable option for rural roads, thus validating their potential as effective eco-friendly substitutes.

Keywords: Subgrade improvement; eco-friendly pavements; CBR index; clay plasticity; road biotechnology.

* Autor para correspondencia

¹ Universidad Católica Sedes Sapientiae, Perú. Email: 2021101636@ucss.pe

INTRODUCCIÓN

La ingeniería geotécnica contemporánea se enfrenta al constante desafío de mejorar la calidad de los suelos naturales, especialmente aquellos que presentan condiciones poco favorables para la construcción. Entre estos, los suelos arcillosos ocupan un lugar destacado por su alta plasticidad, baja capacidad portante, baja permeabilidad y elevada susceptibilidad a la expansión y contracción con los cambios de humedad (Oliveira & Costa, 2024). Esta problemática se vuelve especialmente crítica en regiones tropicales y subtropicales donde la variabilidad climática acentúa el comportamiento impredecible de estos suelos (Atahu, M. K., 2022).

En la estabilización de suelos, los métodos convencionales suelen apoyarse en estabilizantes inorgánicos tales como cal, cemento Portland o materiales bituminosos. Sin embargo, el elevado impacto económico y ambiental asociado a estos materiales ha impulsado la búsqueda de opciones más sostenibles (Nazir et al., 2022). En el contexto peruano, donde el transporte de insumos tradicionales resulta oneroso en zonas rurales o montañosas, se vuelve especialmente relevante explorar estabilizantes alternativos.

En la última década, la atención científica se ha orientado hacia el uso de aditivos orgánicos para mejorar el comportamiento geotécnico de los suelos. Entre estos estabilizantes naturales se incluyen biopolímeros, enzimas, lignosulfonatos, residuos agroindustriales y subproductos vegetales, que han mostrado resultados alentadores en suelos arcillosos (Fatehi et al., 2021). Estos compuestos actúan mediante mecanismos fisicoquímicos por ejemplo, formando enlaces moleculares entre partículas, compactando granos finos o generando redes gelificadas, lo que incrementa la resistencia y la estabilidad del suelo tratado. Además, su naturaleza biodegradable y renovable representa una clara ventaja ambiental, ayudando incluso a la mitigación de la erosión en taludes (Al-Mahasneh et al., 2024; Kumar et al., 2024).

Numerosos ensayos han evaluado la adición de estos aditivos en distintos suelos y climas. Los resultados varían según la fuente orgánica, su dosis, el tipo de suelo y el tiempo de curado (Zhang et al., 2024). Sin embargo, en general se concluye que es posible obtener mejoras significativas en las propiedades mecánicas y volumétricas del suelo. Investigaciones recientes han confirmado que, con las dosificaciones y el curado adecuados, estos aditivos biológicos refuerzan notablemente los suelos locales (Islam, M. A., et al., 2022).

Esta revisión se propone recopilar y analizar los avances más importantes en la aplicación de compuestos orgánicos a suelos arcillosos. A partir del estudio de la literatura especializada reciente, se busca demostrar que este enfoque es viable tanto técnica como económicamente, perfilando una línea de investigación capaz de ofrecer soluciones reales en zonas donde los recursos convencionales no siempre son factibles ni sostenibles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Criterios de exclusión

El proceso de elección y análisis de la literatura científica, establecimos ciertos criterios para descartar trabajos que no cumplen con los parámetros de la metodología y temática. Estos parámetros nos permiten garantizar la calidad y aplicabilidad de las investigaciones que fueron seleccionadas.

Se excluyeron los siguientes tipos de investigaciones:

1. Tesis de grado, trabajos académicos no publicados, presentaciones o posters: A pesar de que algunas contenían información relevante, se descartaron por no haber sido sometidas a revisión por pares ni publicadas en revistas científicas reconocidas, siguiendo la normativa editorial vigente.
2. Resúmenes de congresos o artículos en prensa: Se evitaron investigaciones sin datos completos o sin acceso al texto completo, ya que no permitían evaluar adecuadamente los métodos empleados ni la validez de sus resultados.
3. Artículos anteriores al año 2020: Con el fin de mantener la actualidad del enfoque y cumplir con los estándares de sostenibilidad recientes, solo se consideraron estudios publicados entre 2020 y 2025, dando preferencia a investigaciones de los últimos tres años.
4. Estudios sin información metodológica: Artículos que no reportaban claramente las condiciones de curado o la dosificación fueron excluidos para evitar sesgos.

La Tabla 1 presenta un resumen de los artículos científicos más relevantes considerados en esta revisión. Cada una de estas investigaciones evaluó la influencia de un aditivo orgánico como biopolímeros, estabilizantes enzimáticos o residuos agrícolas en el comportamiento geotécnico de distintos tipos de suelos arcillosos. La tabla destaca la diversidad de enfoques metodológicos, los

países de origen de los estudios, los tipos de suelo tratados y los métodos de laboratorio utilizados para medir mejoras en parámetros como la resistencia a la compresión no confinada (UCS), el índice de soporte California (CBR), la plasticidad, la cohesión, la permeabilidad y el hinchamiento. Estas referencias constituyen la base del análisis comparativo que se presenta en las siguientes secciones del manuscrito.

Tabla 1

Resumen de artículos

| País | Autor(es) | Aditivo orgánico | Tipo de suelo | Propiedades evaluadas | Métodos de ensayo utilizados |
|----------------|----------------------------|--|------------------------|--|--------------------------------------|
| India | (Patel et al., 2023) | Goma guar | Arcilla expansiva | UCS, CBR, IP | ASTM D2166, ASTM D1883 |
| China | (Chen et al., 2024) | Goma xantana | Limo arcilloso | UCS, cohesión, contenido de humedad | Triaxial, Proctor modificado |
| Brasil | (Oliveira & Costa, 2024) | Lignosulfonato | Arcilla roja | UCS, hinchamiento, permeabilidad | ASTM D4767, permeabilidad |
| Pakistán | (Nadeem, M., et al., 2023) | Encimas vegetales fermentadas | Arcilla arenosa | CBR, PI, UCS | CBR estándar, Índice de Plasticidad |
| Egipto | (Hassan & Mahmoud, 2023) | Melaza | Mezcla limo-arcilla | UCS, compactación, pH | Proctor modificado, UCS |
| Etiopía | (Atahu, 2022) | Extracto de cáscara de Coffea arábica | Arcilla | UCS, CBR, contracción | ASTM D3080, CBR modificado |
| Bangladesh | (Islam et al., 2022) | Biochar de cáscara de Musa paradisiaca | Arena arcillosa | UCS, contenido de humedad, IP | ASTM D698, UCS, Límites de Atterberg |
| Australia | (Bagheri et al., 2023) | Biopolímero de lignina | Suelo limoso-arcilloso | Durabilidad, resistencia a la erosión, UCS | Ensayos de durabilidad, UCS |
| Corea del Sur | (Babatunde & Byun, 2023) | Biopolímero de zeína | Suelo arcilloso | UCS, durabilidad, resistencia al agua | ASTM D2166, ensayos de inmersión |
| Arabia Saudita | (Amulya et al., 2022) | Lignosulfonato de calcio + Arena | Suelo Cohesivo | UCS, consolidación | UCS, conductividad hidráulica |

Nota. Elaboración propia, adaptado de los estudios metodológicos de Patel et al. (2023), Chen et al. (2024), Oliveira & Costa (2024), Nadeem, M., et al. (2023), Hassan & Mahmoud (2023), Atahu, M. K. (2022), Islam, M. A., et al. (2022), Bagheri et al. (2023), Babatunde & Byun (2023) y Amulya et al., (2022)

Para complementar el análisis metodológico, se ha sistematizado la información disponible sobre las propiedades físico-químicas de los principales aditivos orgánicos identificados en los estudios revisados. Estas propiedades son determinantes en su capacidad para modificar el comportamiento geotécnico de los suelos arcillosos. En la Tabla 2 se detallan características como la solubilidad, la estructura química predominante, el origen y el mecanismo primario de estabilización. La interacción entre estos aditivos y las partículas del suelo se ve influenciada por factores como el pH, el contenido de polisacáridos o lignina, y la capacidad de formación de enlaces moleculares, lo cual contribuye al aumento de la resistencia, cohesión y reducción de la plasticidad.

Tabla 2

Propiedades relevantes de los aditivos orgánicos utilizados en estabilización de suelos arcillosos

| Aditivo orgánico | Composición principal | Solubilidad en agua | pH aprox. | Origen | Mecanismo de acción |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|--|
| Goma guar | Polisacáridos (galactomananos) | Alta | 6–7 | Vegetal (semilla) | Formación de redes gelatinosas |
| Goma xantana | Polisacáridos bacterianos | Alta | 5.5–8.0 | Fermentación microbiana | Cohesión coloidal, reducción de vacíos |
| Lignosulfonato | Derivados de lignina sulfonada | Alta | 3–5 | Residuo de pulpa de madera | Reacción química con partículas |
| Enzimas naturales | Proteínas y catalizadores | Variable | 6–8 | Microbiano /biotecnológico | Activación de enlaces con minerales |
| Melaza | Azúcares complejos, minerales | Alta | 4.5–6.5 | Subproducto de caña | Aglutinación superficial, mejora de densidad |
| Biochar de plátano | Carbono poroso, sílice, potasio | No soluble | Neutro | Residuo vegetal | Adsorción y mejora estructural |
| Extracto de café | Polifenoles, cafeína, lignina | Media | 4–6 | Cáscara vegetal | Compactación y mejora superficial |
| Biopolímero de lignina | Polímero fenólico complejo | Baja/Insoluble | 4–6 | Residuo vegetal | Agente cementante y aglutinante |
| Biopolímero de zeína | Proteína (prolamina de maíz) | Baja (soluble en alcohol) | 6–7 | Vegetal (maíz) | Encapsulación de partículas |

| | | | | | |
|--------------------------|----------------------------|------|-----|--------------------------|---------------------------------------|
| Lignosulfonato de calcio | Lignina sulfonada y calcio | Alta | 3-5 | Residuo de pulpa (papel) | Cementación y reducción de doble capa |
|--------------------------|----------------------------|------|-----|--------------------------|---------------------------------------|

Nota: Elaboración propia. Las propiedades físico-químicas, pH y mecanismos de acción detallados corresponden a la caracterización de los materiales reportada en los estudios experimentales de: Patel et al. (2023) para goma guar; Chen et al. (2024) para goma xantana; Oliveira & Costa (2024) y Amulya et al. (2022) para lignosulfonatos; Nadeem, M., et al. (2023) para enzimas; Hassan & Mahmoud (2023) para melaza; Atahu, M. K. (2022) para extractos de café; Islam, M. A., et al. (2022) para biochar; Bagheri et al. (2023) para biopolímero de lignina; y Babatunde & Byun (2023) para zeína.

RESULTADOS

Los estudios revisados permiten identificar patrones consistentes en la mejora de las propiedades geotécnicas. En la Tabla 3 se presenta una comparación de los efectos promedio observados.

La tabla muestra que los biopolímeros como la goma xantana y la goma guar logran los mayores incrementos de UCS, alcanzando valores promedio de 310 y 290 kPa respectivamente. Este efecto se atribuye a su capacidad de formar enlaces poliméricos que compactan las partículas finas del suelo. Por su parte, la combinación de lignosulfonato con arena (Amulya et al., 2022) también muestra un desempeño notable, superior al uso de lignosulfonato por sí solo.

Tabla 3

Comparación de propiedades geotécnicas promedio con distintos aditivos orgánicos

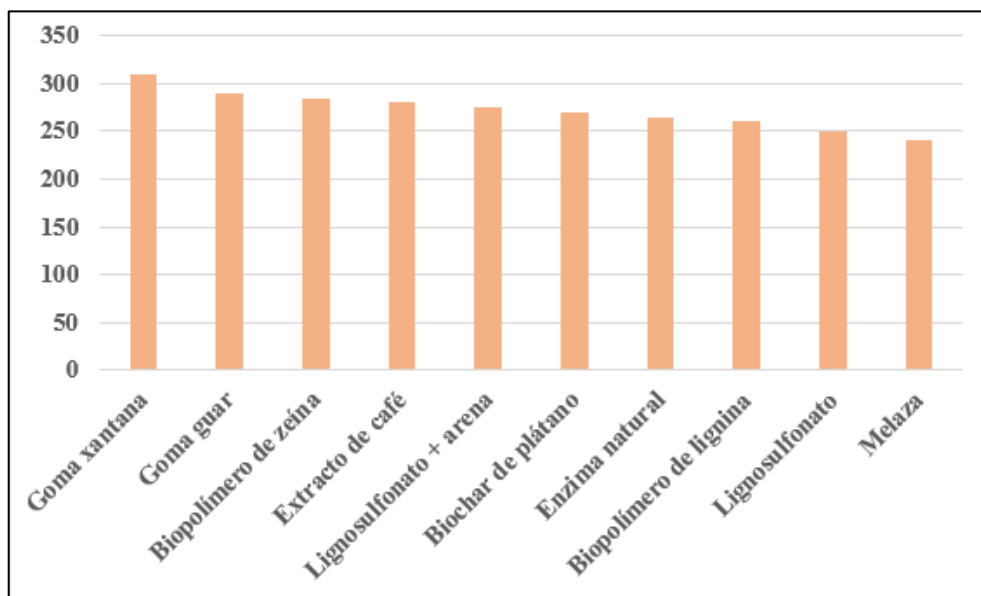
| Aditivo orgánico (Fuente) | UCS (kPa) | CBR (%) | Índice de plasticidad |
|---|-----------|---------|-----------------------|
| Goma xantana (Chen et al., 2024) | 310 | 35 | 20 |
| Goma guar (Patel et al., 2023) | 290 | 32 | 22 |
| Biopolímero de zeína (Babatunde & Byun, 2023) | 285 | 31 | 21 |
| Extracto de café (Atahu, M. K., 2022) | 280 | 33 | 23 |
| Lignosulfonato + Arena (Amulya et al., 2022) | 275 | 30 | 22 |
| Biochar de plátano (Islam, M. A., et al., 2022) | 270 | 29 | 22 |
| Enzima natural (Nadeem, M., et al., 2023) | 265 | 30 | 21 |
| Biopolímero de lignina (Bagheri et al., 2023) | 260 | 29 | 23 |
| Lignosulfonato (Oliveira & Costa, 2024) | 250 | 28 | 24 |
| Melaza (Hassan & Mahmoud, 2023) | 240 | 25 | 26 |

Nota: Elaboración propia. Los valores promedio de resistencia a la compresión no confinada (UCS), índice CBR e índice de plasticidad presentados corresponden a los resultados óptimos reportados en los estudios experimentales de: Zhang et al. (2024) para goma xantana; Patel et al. (2023) para goma guar; Babatunde & Byun (2023) para zeína; Atahu, M. K. (2022) para extracto de café; Amulya et al. (2022) para lignosulfonato con arena; Islam, M. A., et al. (2022) para biochar; Nadeem, M., et al. (2023) para enzimas; Bagheri et al. (2023) para biopolímero de lignina; Oliveira & Costa (2024) para lignosulfonato solo; y Hassan & Mahmoud (2023) para melaza.

La Figura 1 confirma gráficamente estas tendencias, evidenciando que los aditivos de origen vegetal con mayor contenido de polisacáridos y compuestos fenólicos tienden a ofrecer mejores resultados en términos de resistencia estructural del suelo.

Figura1

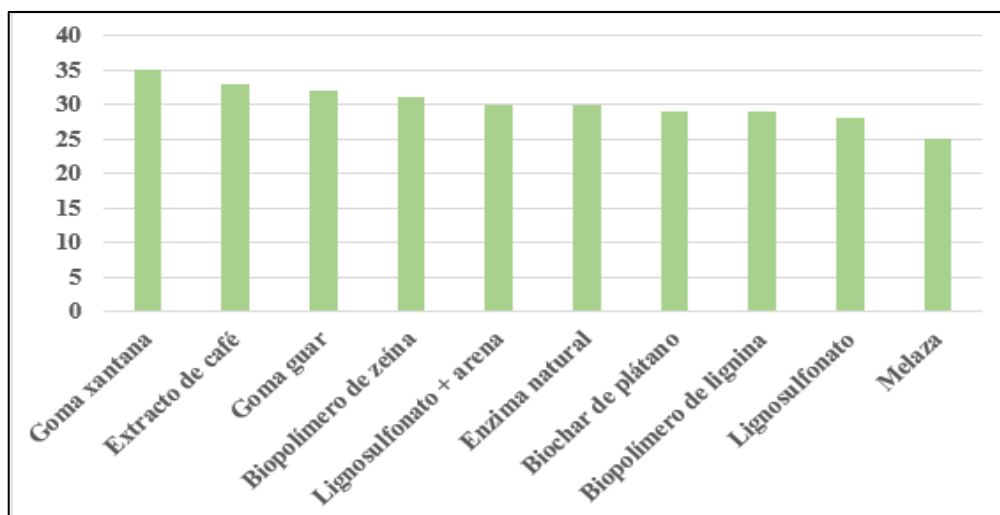
Comparación de la resistencia a la compresión no confinada (UCS)



Respecto al índice CBR, se observa en la Tabla 3 y Figura 2 que los valores más altos también corresponden a goma xantana (35%) y goma guar (32%), seguidos por extracto de café (33%) y enzimas naturales (30%). Estas cifras reflejan una mejora significativa en la capacidad portante del suelo, superando en todos los casos el umbral mínimo del 20% establecido en muchas normativas para capas subrasantes estabilizadas.

Figura 1

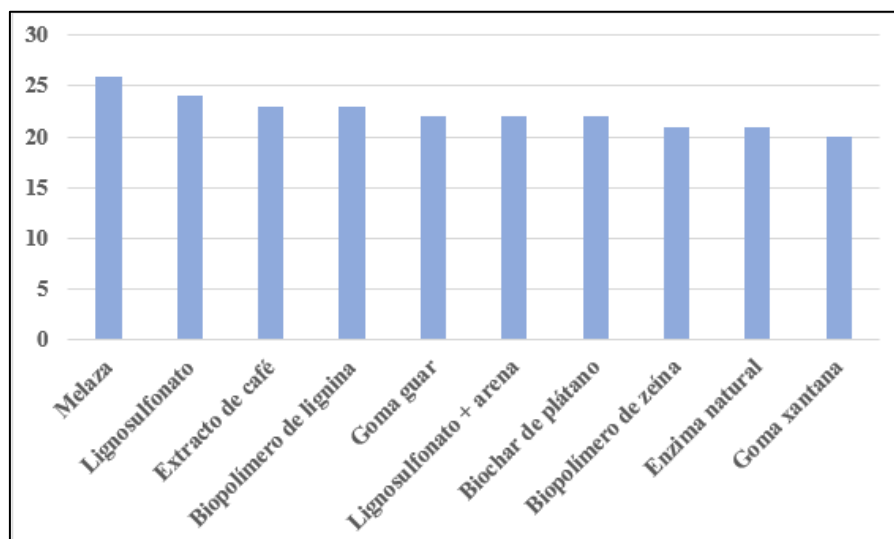
Índice de soporte California (CBR) con diferentes aditivos



En relación con la plasticidad, la Figura 3 muestra cómo la adición de estos compuestos permite reducir el índice de plasticidad del suelo. La goma xantana, por ejemplo, reduce este índice a 20, lo que mejora notablemente la trabajabilidad y estabilidad volumétrica del material.

Figura 2

Variación del índice de plasticidad según el aditivo



Para ampliar este análisis, se presenta la Tabla 4, donde se comparan los tipos de mecanismos de estabilización involucrados con cada aditivo. Se observa que los mecanismos varían entre enlaces poliméricos, cementación superficial, reacciones bioquímicas o retención hídrica, lo cual influye directamente en la elección de aditivo según el tipo de suelo.

Tabla 4

Mecanismos de acción predominantes según el tipo de aditivo orgánico

| Aditivo orgánico | Mecanismo de acción principal | Resultado geotécnico destacado |
|--------------------|---|---|
| Goma guar | Formación de redes poliméricas | Incremento de UCS y cohesión |
| Goma xantana | Estabilización coloidal y gelificación | Mejora de compactación y reducción del IP |
| Lignosulfonato | Reacciones cementantes con partículas finas | Aumento moderado de UCS |
| Enzimas naturales | Catalización de reacciones con minerales | Mejora del CBR y la densidad seca |
| Melaza | Enlace superficial y relleno de vacíos | Mejora en cohesión y reducción de humedad |
| Biochar de plátano | Adsorción y retención hídrica | Estabilidad volumétrica |
| Extracto de café | Efecto aglutinante y cohesión superficial | Aumento de UCS y CBR |

| | | |
|------------------------|---|---------------------------------------|
| Biopolímero de lignina | Cementación por polímeros fenólicos | Aumento de cohesión y durabilidad |
| Biopolímero de zeína | Formación de matriz proteica hidrofóbica | Mejora de resistencia al agua y UCS |
| Lignosulfonato + Arena | Cementación por calcio y densificación física | Aumento de resistencia al corte y UCS |

Nota. Elaboración propia. Los mecanismos de estabilización descritos han sido identificados y analizados en las discusiones de los siguientes estudios: Zhang et al. (2024) para goma xantana; Patel et al. (2023) para goma guar; Babatunde & Byun (2023) para zeína; Atahu, M. K. (2022) para extractos de café; Amulya et al. (2022) para lignosulfonato de calcio; Islam, M. A., et al. (2022) para biochar; Nadeem, M., et al. (2023) para enzimas; Bagheri et al. (2023) para biopolímero de lignina; Oliveira & Costa (2024) para lignosulfonato; y Hassan & Mahmoud (2023) para melaza.

Además, en la Tabla 5 se detallan los parámetros de dosificación utilizados en los estudios revisados, así como el tipo de suelo y el tiempo de curado más comúnmente aplicado. Estas condiciones son fundamentales para entender la variabilidad en los resultados, ya que una dosificación inadecuada o una etapa de curado insuficiente puede limitar la efectividad del aditivo.

Tabla 5

Parámetros de dosificación y condiciones de curado en suelos arcillosos

| Aditivo orgánico | Tipo de suelo | Rango de dosificación (%) | Condiciones de curado |
|------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| Goma guar | Arcilla expansiva | 0.5–2.0 | 7–28 días |
| Goma xantana | Limo arcilloso | 0.3–1.5 | 7–14 días |
| Lignosulfonato | Arcilla roja | 1.0–3.0 | 3–21 días |
| Enzima natural | Arcilla arenosa | 0.2–0.8 | 14 días |
| Melaza | Limo-arcilla | 1.5–5.0 | 7 días |
| Extracto de café | Arcilla | 2.0–4.0 | 7–14 días |
| Biochar de plátano | Arena arcillosa | 1.0–3.0 | 14–28 días |
| Biopolímero de lignina | Limo arcilloso | 1.0–4.0 | 14–28 días |
| Biopolímero de zeína | Arcilla limosa | 0.5–2.0 | 7–21 días |
| Lignosulfonato + Arena | Suelo cohesivo | 0.5–2.0 | 7–28 días |

Nota. Elaboración propia. Los rangos de dosificación y tiempos de curado corresponden a los protocolos experimentales detallados en: Zhang et al. (2024), Patel et al. (2023), Babatunde & Byun (2023), Atahu, M. K. (2022), Amulya et al. (2022), Islam, M. A., et al. (2022), Nadeem, M., et al. (2023), Bagheri et al. (2023), Oliveira & Costa (2024) y Hassan & Mahmoud (2023).

DISCUSIÓN

Los resultados analizados en esta revisión permiten afirmar que los aditivos orgánicos tienen un efecto positivo en la mejora de propiedades mecánicas y de trabajabilidad de suelos arcillosos. Esta afirmación se alinea con lo reportado por Zhang et al. (2024), quienes señalaron que biopolímeros como la goma xantana permiten aumentar la resistencia a la compresión no confinada (UCS) hasta en un 180 %, gracias a la formación de enlaces poliméricos que cohesionan

las partículas del suelo. Este efecto fue igualmente corroborado por Patel et al. (2023), quienes trabajaron con goma guar en suelos expansivos y observaron mejoras significativas en la capacidad portante y en la estabilidad volumétrica del terreno.

En cuanto al índice CBR, los valores superiores al 30 % obtenidos en estudios como el de Hassan y Mahmoud (2022) quienes usaron melaza en mezclas limo-arcillosas respaldan la efectividad de este tipo de aditivos como estabilizantes viables para capas subrasantes, especialmente en zonas rurales con acceso limitado a cemento o cal. Esta mejora coincide con lo observado por Atahu, M. K. (2022), quienes trataron arcillas tropicales con extractos vegetales obtenidos de cáscara de café y lograron aumentos notables en la cohesión y resistencia.

Por otro lado, la disminución en el índice de plasticidad observada en la mayoría de los casos revisados es coherente con lo mencionado por Oliveira y Costa (2022), quienes comprobaron que el lignosulfonato aplicado en arcilla roja puede reducir la plasticidad del suelo sin alterar su contenido natural de humedad. Este resultado es clave en regiones donde los suelos son altamente sensibles a variaciones climáticas, ya que una menor plasticidad se traduce en una menor susceptibilidad al agrietamiento.

No obstante, algunos estudios señalan limitaciones importantes. Específicamente Nadeem, M., et al. (2023) indicaron que ciertos estabilizantes enzimáticos presentan comportamientos inconsistentes cuando no se respetan tiempos mínimos de curado o cuando la dosificación no está optimizada para el tipo específico de suelo. Esto se confirma con los datos presentados en la Tabla 3, donde se observa una variabilidad en las condiciones de curado que puede afectar directamente los resultados obtenidos. Según Hassan et al. (2022), la eficiencia de la melaza también depende del pH del suelo y de su contenido de materia orgánica, lo que sugiere que la respuesta geotécnica puede estar condicionada por factores contextuales que deben ser considerados en futuros estudios.

El análisis transversal de los estudios revisados sugiere una convergencia hacia la viabilidad técnica de los aditivos orgánicos con propiedades análogas a la lignina y taninos. Más allá de la mejora mecánica reportada, la tendencia observada en la literatura destaca que estos compuestos se perfilan como una solución integral, equilibrando el desempeño geotécnico con la sostenibilidad y la eficiencia económica frente a los métodos tradicionales.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática permite concluir que los aditivos orgánicos (biopolímeros, lignosulfonatos, enzimas y residuos) constituyen una alternativa técnica y ambientalmente viable frente a los estabilizantes tradicionales como el cemento y la cal. Se constató que estos compuestos mejoran significativamente las propiedades geotécnicas de los suelos arcillosos, destacando el desempeño de la goma xantana y guar en el incremento de la resistencia a la compresión (UCS) y del índice CBR, el cual alcanzó valores aptos para capas subrasantes. Esta mejora se atribuye a mecanismos de densificación, floculación y formación de redes poliméricas que reducen la plasticidad y la susceptibilidad a la humedad. No obstante, la efectividad final está condicionada por el control de variables como la dosificación y el tiempo de curado, factores críticos para garantizar soluciones sostenibles y de alto desempeño en la ingeniería.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Mahasneh, Z. A., et al. (2024). *Mitigation of Soil Erosion and Enhancement of Slope Stability through the Utilization of Lignin Biopolymer*. *Polymers*, 16(9), 1300. <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/9/1300>
- Amulya, G., Moghal, A. A. B., Basha, B. M., & Almajed, A. (2022). *Coupled Effect of Granite Sand and Calcium Lignosulphonate on the Strength Behavior of Cohesive Soil*. *Buildings*, 12(10), 1687. <https://doi.org/10.3390/buildings12101687>
- Atahu, M. K. (2022). *The effect of coffee husk ash on geotechnical properties of expansive soil*. *Rostock Meeresbiologische Beiträge*, 31, 45-68. https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003724
- Babatunde, Q. O., & Byun, Y. (2023). *Soil stabilization using zein biopolymer*. *Sustainability*, 15(3), 2075. <https://doi.org/10.3390/su15032075>
- Bagheri, P., Gratchev, I., Son, S., & Rybachuk, M. (2023). *Durability, strength, and erosion resistance assessment of lignin biopolymer treated soil*. *Polymers*, 15(6), 1556. <https://doi.org/10.3390/polym15061556>
- Campos, A., & Cruz, N. (2024). *Análisis de la influencia de la ceniza de cascarilla de café en la resistencia al corte no drenada de suelos limosos*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/385752890_Analisis_de_la_influencia_de_la_ceniza_de_cascarilla_de_cafe_en_la_resistencia_al_corte_no_drenada_de_suelos_limosos
- Cao, C., Zhao, L., & Li, G. (2024). *Using polyvinyl alcohol as polymeric adhesive to enhance the water stability of soil and its performance*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (En prensa). <https://arxiv.org/abs/2404.13926>

- Chavali, D., & Reshmarani, S. (2020). *Characterization of expansive soils treated with lignosulfonate*. International Journal of Geo-Engineering, 11, Article 25. <https://doi.org/10.1186/s40703-020-00124-1>
- Chen, Y., et al. (2024). *Laboratory Investigation and Mechanical Evaluation on Xanthan Gum-Reinforced Clay: Unconfined Compression Test, Triaxial Shear Test, and Microstructure Characterization*. Buildings, 14(8), 2438. <https://doi.org/10.3390/buildings14082438>
- Das, B. (2021). *Ground improvement using chemical methods: A review*. Heliyon, e07678. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07678>
- Fatehi, H., Koo, T. H., & Maleki, A. (2021). *Biopolymers as green binders for soil improvement in geotechnical applications: A review*. Geosciences, 11(7), 291. <https://doi.org/10.3390/geosciences11070291>
- Fernández, M. T., et al. (2020). *Calcium lignosulfonate's performance as a clay stabiliser*. EPRA International Journal of Research and Development (IJRD), 6(9), 120–128. <https://doi.org/10.36713/epra2016>
- Hassan, A., & Mahmoud, E. (2022). *Improving geotechnical characteristics of clayey soils using molasses*. Journal of Materials in Civil Engineering, 34(10), 04022102. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004514](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004514)
- Islam, M. A., et al. (2022). *Banana peel biochar as an alternative nutrient source for plant productivity and sustainable agriculture*. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 11, 457–468. <https://doi.org/10.30486/ijrowa.2022.1947232.1384>
- Kalita, A., Singh, N. K., Paksok, D., & Tashi, K. (2024). *Effect of enzyme-based soil stabilization: A review*. SSRG International Journal of Civil Engineering, 11(12), 94–101. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V11I12P109>
- Kumar, S., Yadav, B., & Raj, R. (2024). *A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil*. SN Applied Sciences, 6, 393. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06087-7>
- Moradi, G., Shafaghathian, S., & Katebi, H. (2021). *Effect of chemical and biological stabilization on the resilient modulus of clay subgrade soil*. International Journal of Pavement Research and Technology, 14, 415–432. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00029-x>
- Mousavi, S. M., & Rahardjo, H. (2023). *Behavior of biopolymer-treated clay under triaxial loading*. Journal of Materials in Civil Engineering, 35(8), 04023216. <https://doi.org/10.1061/JMATB4.MTENG-4073>
- Nadeem, M., et al. (2023). *Evaluation of engineering properties of clayey sand bio-mediated with Terrazyme enzyme*. Frontiers in Materials, 10, 1195310. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1195310>

- Nazir, A., et al. (2022). *Sustainability performance of biopolymer-treated pavement materials*. Transportation Geotechnics, 35, 100769. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100769>
- Oliveira, M., & Costa, F. (2022). *Effect of lignosulfonate on the reduction of plasticity in Brazilian red clay*. Environmental Earth Sciences, 81, 405. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10405-x>
- Patel, R. K., Singh, A., & Gupta, V. (2023). *Influence of guar gum stabilization on expansive clay properties*. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 9, 12. <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00424-y>
- Shi, C. (2020). *Protein polymers for soil stabilization: Recent advances*. Advances in Civil Engineering, 2020, Article 8831747. <https://doi.org/10.1155/2020/8831747>
- Tulebekova, A., et al. (2024). *Study of the impact of biopolymer and geosynthetics reinforcement on soil strengthening*. EUREKA: Physics and Engineering, (6), 70-80. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003472>
- Varsha, B., Moghal, A. A. B., Rehman, A. U., & Chittoori, B. C. S. (2023). *Shear, consolidation characteristics and carbon footprint analysis of clayey soil blended with calcium lignosulphonate and granite sand for earthen dam application*. Sustainability, 15(7), 6117. <https://doi.org/10.3390/su15076117>
- Xie, L., Ma, X., & Chen, H. (2022). *Effectiveness of molasses (melic acid) in clay stabilization*. Materials, 5, 257. <https://doi.org/10.3390/ma5020257>