



Análisis comparativo de la estabilización de suelos derivados de ceniza volcánica con cal, ceniza de fondo y estabilizante comercial

Comparative analysis of volcanic ash-derived soil stabilization using lime, brick slag ash, and a commercial stabilizer

Laura Alejandra Muñoz ¹, Isabella Rodríguez Castro ²,
Andrea Carolina Paredes Cerón ³, Lucio Gerardo Cruz Velasco ⁴

Fecha de Recepción: 01 de octubre de 2025

Fecha de Aceptación: 5 de marzo de 2026

Cómo citar: L. A. Muñoz, I. Rodríguez Castro, A. C. Paredes Cerón, y L. G. Cruz Velasco, «Análisis comparativo de la estabilización de suelos derivados de ceniza volcánica con cal, ceniza de fondo y estabilizante comercial», *Tecnura*, vol. 30, n.º 89, jul. 2026. 72–88. <https://doi.org/10.14483/22487638.24175>

Resumen

Objetivo: evaluar el comportamiento de suelos derivados de cenizas volcánicas del departamento del Cauca (Colombia) mediante su estabilización con tres materiales: cal, ceniza de escoria de ladrillo (CEL) y un estabilizante comercial a base de sodio y calcio, y analizar su efecto en la plasticidad y la resistencia a la compresión inconfiada.

Métodología: se emplearon tres muestras de suelo con alta plasticidad y susceptibilidad a la humedad. Las muestras fueron tratadas con distintos porcentajes de estabilizantes: cal (3 %, 5 % y 7 %), ceniza de escoria de ladrillo (15 %, 20 % y 25 %) y estabilizante comercial (15 %, 18 % y 21 %). Posteriormente, se realizaron ensayos de límites de Atterberg y compresión inconfiada tras periodos de curado de 1, 7, 14 y 28 días, evaluando tanto el estado seco como el estado de saturación.

Resultados: los tres estabilizantes lograron reducir la plasticidad de los suelos entre un 5 % y un 80 %, con incrementos en la resistencia a la compresión inconfiada de hasta ocho veces en estado seco. Sin embargo, los tratamientos con cal y con el estabilizante comercial presentaron variaciones abruptas en sus valores de resistencia entre dosificaciones.

Conclusiones: en estado seco, tanto la ceniza de escoria de ladrillo como el estabilizante comercial pueden considerarse alternativas viables para incrementar la resistencia y reducir la plasticidad en suelos derivados de cenizas volcánicas. No obstante, su

¹ Ingeniera civil y magíster en Ingeniería de pavimentos de la Universidad del Cauca. Miembro del GEPAV (Grupo de Investigación en Geotecnia Vial y Pavimentos Unicauca).  Email: lalemugarzon@unicauca.edu.co

² Ingeniera civil y magíster en Ingeniería de pavimentos de la Universidad del Cauca. Docente de la Universidad del Cauca y de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca. Miembro del GEPAV (Grupo de Investigación en Geotecnia Vial y Pavimentos Unicauca) y del Grupo de Investigación en Tecnologías y Ambiente (GITA).  Email: isabella.rodriguez.c@uniautonomia.edu.co

³ Ingeniera civil y magíster en Ingeniería Civil (Geotecnia) de la Universidad del Cauca. Docente y miembro del GEPAV (Grupo de Investigación en Geotecnia Vial y Pavimentos Unicauca).  Email: acparedes@unicauca.edu.co

⁴ Ingeniero civil y doctor en Geotecnia. Docente y miembro del GEPAV (Grupo de Investigación en Geotecnia Vial y Pavimentos Unicauca).  Email: lucruz@unicauca.edu.co

desempeño bajo saturación fue limitado, lo que representa una restricción importante en contextos viales expuestos a alta humedad. La cal, en especial al 7 %, fue el único estabilizante que mantuvo resistencia en condición saturada. Sin embargo, mostró comportamientos inestables asociados a la formación de minerales expansivos en suelos con alto contenido de sulfatos. Se recomienda continuar con investigaciones orientadas a optimizar el uso de la ceniza de escoria de ladrillo como alternativa sostenible y de bajo costo, y aplicar un control riguroso en la dosificación de estabilizantes cálcicos para minimizar riesgos de expansión y deterioro a largo plazo.

Palabras clave: estabilización química, estabilizador no convencional, cenizas de fondo de quema, estabilización de suelos, suelos tropicales.

Abstract

Objective: To evaluate the behavior of soils derived from volcanic ash in the department of Cauca (Colombia) through stabilization with three materials: lime, brick slag ash, and a commercial sodium- and calcium-based stabilizer, and to analyze their effect on plasticity and unconfined compressive strength.

Methodology: Three soil samples with high plasticity and moisture susceptibility were treated with different stabilizer percentages: lime (3%, 5%, and 7%), brick slag ash (15%, 20%, and 25%), and commercial stabilizer (15%, 18%, and 21%). Atterberg limits and unconfined compressive strength tests were performed after curing periods of 1, 7, 14, and 28 days, under both dry and saturated conditions.

Results: All three stabilizers reduced soil plasticity between 5% and 80%, with increases in unconfined compressive strength of up to eight times under dry conditions. However, treatments with lime and the commercial stabilizer exhibited abrupt variations in their strength values across dosages.

Conclusions: Under dry conditions, both brick slag ash and the commercial stabilizer can be considered viable alternatives to increase strength and reduce plasticity in volcanic ash soils. However, their performance under saturation was limited, which poses an important restriction in road contexts exposed to high moisture. Lime, particularly at 7%, was the only stabilizer that maintained strength under saturated conditions, although it showed unstable behavior due to the formation of expansive minerals in sulfate-rich soils. Further research is recommended to optimize the use of brick slag ash as a sustainable and low-cost alternative, and to apply strict dosage control of calcium-based stabilizers to minimize risks of expansion and long-term deterioration.

Keywords: Soil chemical stabilization, soil non-conventional stabilizer, coal bottom ash, soil stabilization, Tropical soil.

1. Introducción

Colombia es un país con un déficit significativo en infraestructura vial: solo el 20 % de las vías están pavimentadas y, en la red terciaria, (69.17 % del total) este porcentaje se reduce a 6 % se [1]. En el departamento del Cauca, con una población mayoritariamente rural (62.72 %) y topografía montañosa, la conectividad es aún más limitada [2]. Esta región está influenciada por los volcanes Puracé y Sotará [2], [4], que han dado origen a suelos derivados de ceniza volcánica, caracterizados por alta plasticidad, baja resistencia y comportamiento colapsable lo que dificulta su aplicación en obras viales [5] – [8].

Ante esta problemática, la estabilización de suelos se consolida como una solución efectiva para mejorar el comportamiento de suelos problemáticos en obras viales, especialmente mediante el uso de residuos industriales que ofrecen ventajas económicas y ambientales [9] – [13].

En los últimos años (2021–2025), la estabilización de suelos derivados de ceniza volcánica (SDCV) ha sido ampliamente estudiada debido a su alta variabilidad mineralógica y sensibilidad a cambios de humedad. Investigaciones recientes demuestran que la incorporación de agentes cálcicos y cementantes incrementa significativamente la resistencia a la compresión simple y reduce la plasticidad, particularmente en este tipo de suelos [14]. Asimismo, se ha evidenciado que las condiciones de curado y la exposición a ciclos de humedecimiento influyen de manera determinante en la evolución de la resistencia mecánica [15]. Estudios mineralógicos recientes indican que la presencia de minerales amorfos como alófonos e imogolita pueden modificar la reacción entre el suelo y los estabilizantes, lo cual afecta tanto la formación de productos cementantes como el desempeño bajo saturación [16]. De igual manera, se ha reportado que la durabilidad de los suelos estabilizados depende en gran medida del tipo de ligante empleado y del control de las condiciones ambientales durante el curado [17], [18]. Estos hallazgos demuestran la importancia de considerar tanto la composición mineralógica como las condiciones de humedad al evaluar el comportamiento mecánico de SDCV posterior a la estabilización.

En este contexto, la presente investigación evaluó tres SDCV del Cauca estabilizados con cal, ceniza de fondo de horno de ladrillo (CFH) y un aditivo comercial. Se analizaron sus propiedades físico-mecánicas tras 1, 7, 14 y 28 días de curado. Los resultados mostraron que la CFH en proporciones superiores al 20 % mejoran significativamente la resistencia en estado seco y evidencian su potencial como estabilizante sostenible. Actualmente se realizan ensayos químicos para comprender las variaciones en el comportamiento observado.

2. Metodología

La metodología se desarrolló en cuatro fases. En la primera, se realizó la actualización y revisión de antecedentes nacionales e internacionales sobre estabilización de SDCV mediante estabilizantes y materiales con comportamiento puzolánico. Estudios recientes reportan incrementos significativos en la resistencia a la compresión simple y reducción del índice de plasticidad en SDCV tratados con cal y cemento y destacan la influencia de la mineralogía y las condiciones de curado en la evolución de la resistencia [14]–[15]. Asimismo, se han documentado aplicaciones de residuos industriales con potencial cementante como alternativa sostenible en estabilización vial [16], [18]. Con base en estos antecedentes, se definieron tres porcentajes de adición para cada estabilizante: CFH (15 %, 20 % y 25 %), cal (3 %, 5 % y 7 % de cal útil) y estabilizante comercial D-STB-WAY con base de calcio y magnesio (15%, 18% y 21%). La selección respondió al propósito de comparar dos estabilizantes químicos tradicionales (cal y cemento, con acción puzolánica) frente a un material no tradicional (CFH) con comportamiento potencialmente análogo.

La segunda fase consistió en la recolección y caracterización de tres suelos clasificados como MH (limo de alta plasticidad) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), provenientes del K0+500 vía Popayán–Coconuco (Suelo No.1), la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca (Suelo No.2) y el K2+000 vía Timbío–Popayán (Suelo No.3). A las muestras en estado natural se les practicaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg y resistencia a la compresión confinada, para establecer sus propiedades físicas y mecánicas iniciales. Los tres estabilizantes provinieron de fuentes locales; el producto comercial fue suministrado por la empresa distribuidora, mientras que la CFH se recolectó en ladrilleras artesanales ubicadas en la vereda El Zarzal, vía Popayán–El Tambo.

En la tercera fase se desarrolló el plan experimental. Se ejecutó el ensayo Proctor estándar con molde japonés para determinar la humedad óptima y la densidad máxima de compactación de cada mezcla. Las combinaciones suelo–estabilizante se prepararon manualmente hasta lograr homogeneidad visual, ajustando el contenido de agua a la humedad óptima correspondiente y compactando inmediatamente con la energía estándar. Las probetas fueron almacenadas en bolsas herméticas para evitar pérdida de humedad y curadas a temperatura ambiente de laboratorio (22–25 °C) durante 1, 7, 14 y 28 días. Para cada combinación se elaboraron tres especímenes por edad de curado y condición de ensayo. La resistencia se evaluó en estado seco y saturado por capilaridad; esta última se logró colocando las probetas sobre una base porosa en contacto con una lámina de agua durante 24 horas, permitiendo el ascenso controlado antes del ensayo.

En la cuarta fase, se analizó comparativamente el comportamiento mecánico y la variación de los límites de Atterberg para los diferentes porcentajes y edades de curado, tras la validación del potencial de estabilización del (CFH) frente a los estabilizantes tradicionales. Los resultados de resistencia corresponden al promedio de tres especímenes por tratamiento derivados de la evaluación de la variabilidad mediante desviación estándar y coeficiente de variación para garantizar representatividad estadística. Finalmente, se definieron porcentajes óptimos de dosificación con base en el incremento de resistencia, la reducción de plasticidad y el desempeño bajo condición de humedad y se estableció la viabilidad técnica del uso de la CFH como alternativa de estabilización en suelos volcánicos del suroccidente colombiano.

3. Resultados

3.1 Límites de Atterberg

Los ensayos de límites de Atterberg realizados en los tres suelos permitieron evaluar el efecto de tres estabilizantes —cal, CFH y un aditivo comercial— sobre su plasticidad. En general, se observó una reducción del Índice de Plasticidad (IP), sin modificaciones en la clasificación SUCS, la cual se mantuvo como limo de alta compresibilidad (MH) como se observa en la [Figura 1](#).

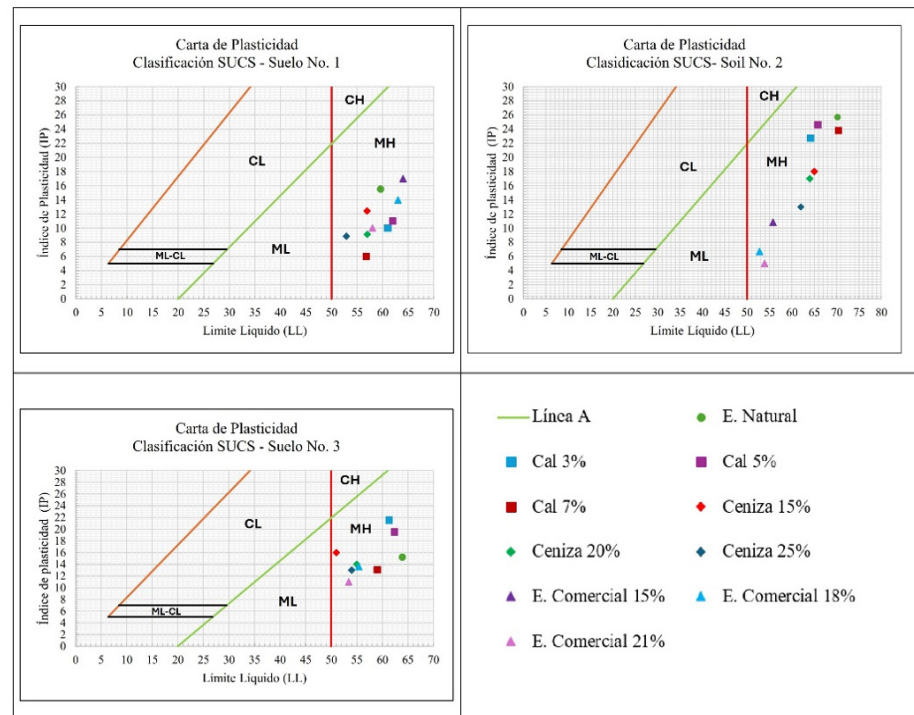


Figura 1. Carta de plasticidad Suelo N°1, Suelo N°2 y Suelo N°3.

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la [Figura 1](#), en el Suelo No.1 la cal al 7 % redujo el IP de 15.5 % a 6 %, siendo la más efectiva. Sin embargo, se observaron aumentos en el LL con cal al 3 % y 5 % y el estabilizante comercial al 15 % y 18 %, posiblemente por formación de estructuras con mayor retención de agua. En el Suelo No. 2, la ceniza al 25 % redujo el IP a 13 %, y el estabilizante comercial al 21 % logró la mayor disminución (IP de 5%). La cal no presentó mejoras relevantes. En el Suelo No. 3, los efectos fueron menores. La ceniza al 25 % redujo el IP a 13 % y el estabilizante comercial al 21 % a 11 %. Solo la cal al 7 % fue efectiva; en otros porcentajes, el IP aumentó, probablemente por formación de compuestos como la etringita y taumasita.

Se realizó un análisis comparativo del comportamiento físico de tres suelos derivados de cenizas volcánicas, estabilizados con cal, ceniza de fondo de ladrillo (CFH) y un aditivo comercial. A continuación, se presenta gráficamente el desempeño por tratamiento. La cal utilizada tiene una pureza del 70 %; sin embargo, las dosificaciones reportadas corresponden a porcentajes teóricos respecto al peso seco del suelo.

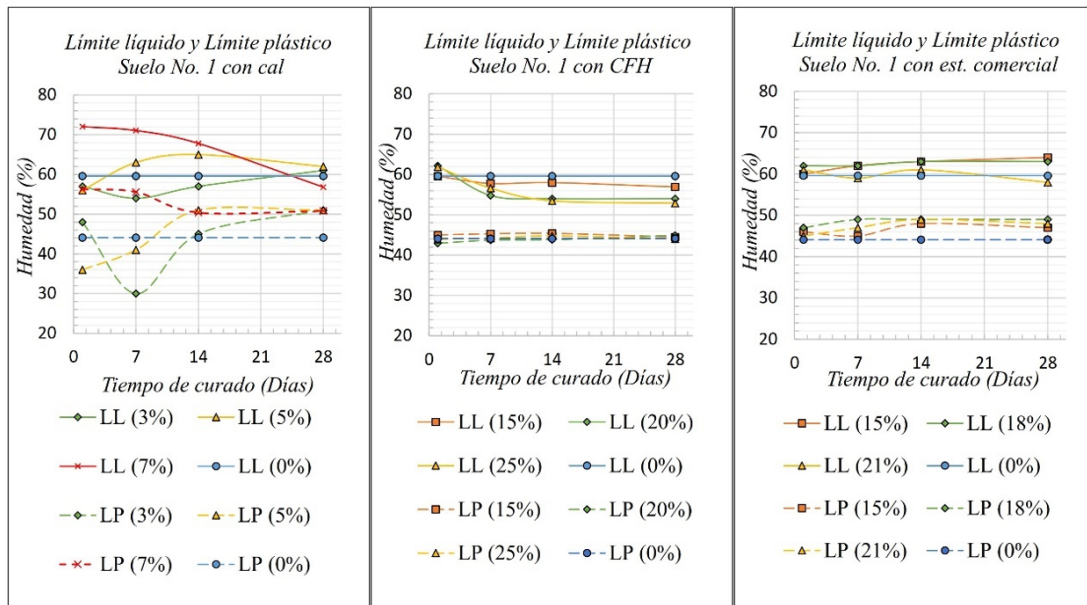


Figura 2. Comparativo LL y LP posterior a la etapa de curado, para los Suelos No.1.

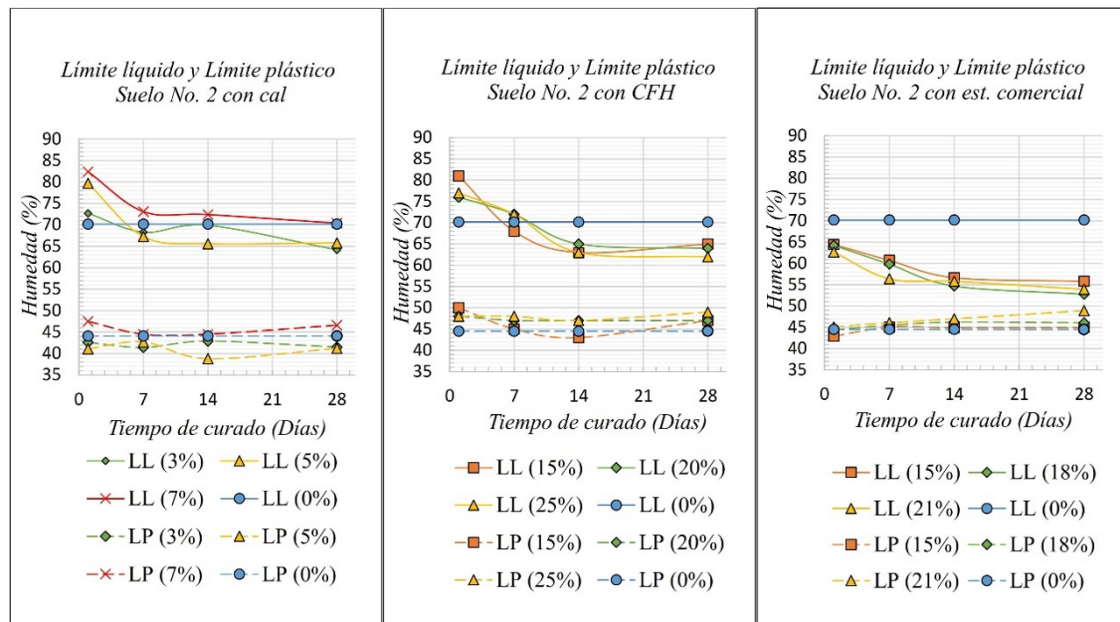


Figura 3. Comparativo LL y LP posterior a la etapa de curado, para los Suelos No.2

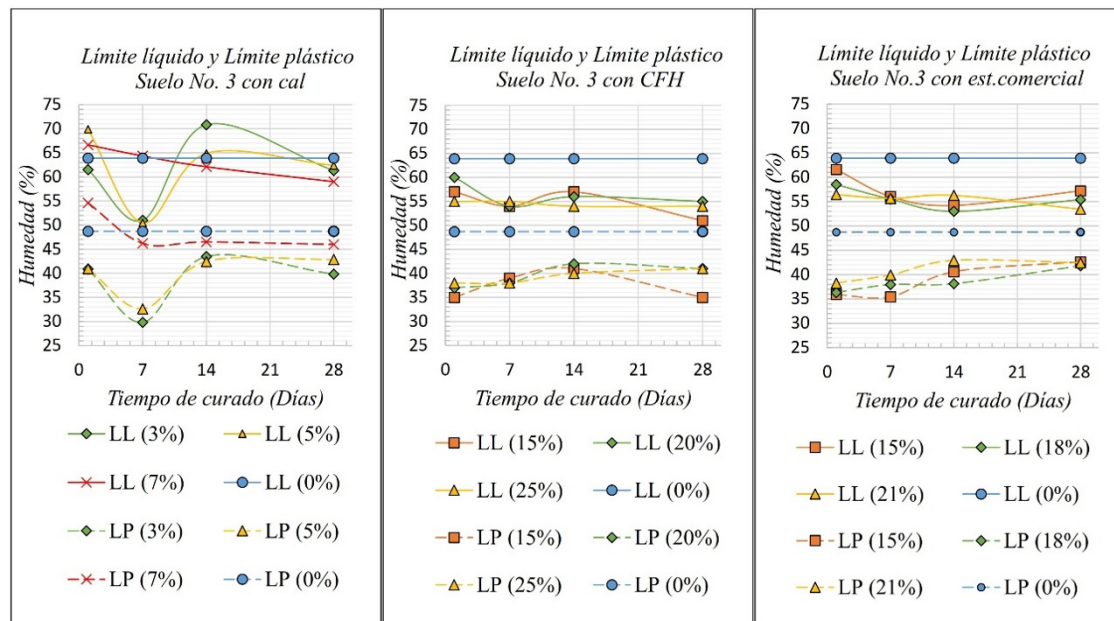


Figura 4. Comparativo LL y LP posterior a la etapa de curado, para los Suelos No. 3.

Fuente: elaboración propia.

Las [Figura 2](#), [Figura 3](#) y [Figura 4](#) muestran la variación del IP en los tres suelos estabilizados. En el Suelo No. 1, la cal al 7 % fue la más eficaz (reducción de IP de 15.5 % a 6 %), seguida de la CFH al 20 % y del estabilizante comercial al 21 % (35 % de reducción). En el Suelo No. 2, con alto contenido de arcilla, la CFH al 25 % logró una reducción del 49% y el estabilizante comercial al 21 % logró una reducción de 81% siendo los más efectivos; mientras que la cal presentó una reducción moderada. En el Suelo No. 3, la estabilización fue limitada: solo la cal al 7 %, la CFH al 25 % y el estabilizante comercial al 21 % lograron reducciones del IP entre 14 % y 28 %. Este suelo mostró menor respuesta, posiblemente por presencia de sulfatos, lo que sugiere necesidad de ajustes en dosificación o métodos.

3.2 Compresión inconfiada

Se realizó el ensayo de compresión inconfiada para evaluar la resistencia de los suelos en estado natural y posterior al curado en estado seco e inmersión, con el fin de analizar el efecto de los estabilizantes sobre la cohesión y capacidad de soporte frente a distintas condiciones de humedad, para mayor referencia ver figuras de la 5 a la 12

3.2.1 Estado seco (sin exposición al agua)

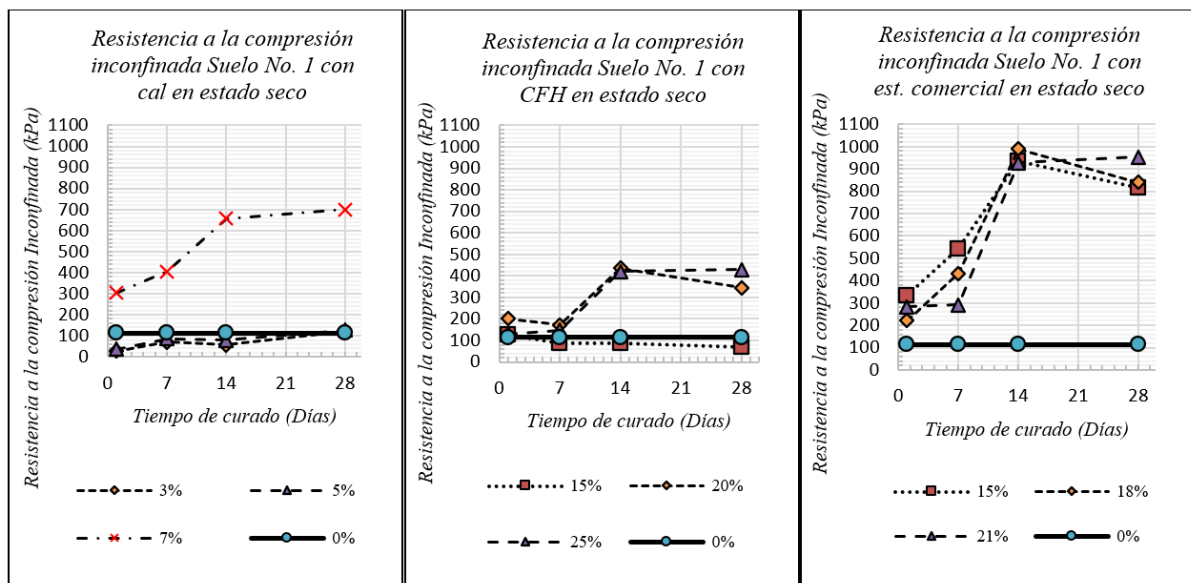
En condición seca (probetas compactadas en condición óptima sin exposición al agua), los tres estabilizantes (cal, ceniza de fondo de ladrillo y estabilizante comercial) incrementaron la resistencia mecánica de los suelos, con variaciones en su efectividad. La [Tabla 1](#) presenta los resultados comparativos, incluyendo la resistencia del suelo no tratado como referencia.

Tabla 1. Resultados de compresión inconfiada (UCS) en [kPa] para el estado seco

UCS [kPa]	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Resistencia inicial	113.5	228.8	227.6
Cal - 3%	119	445	112.7
Cal - 5%	126	745	242.6
Cal - 7%	699	456	651.6
Ceniza - 15%	39.6	190.8	102.9
Ceniza - 20%	170	570.8	612.0
Ceniza - 25%	221	539.7	627.0
Comercial - 15%	816.7	1064.0	250.2
Comercial - 18%	840.5	1019.1	271.3
Comercial - 21%	953.7	1263.6	185.5

Fuente: elaboración propia.

En estado seco, el Suelo No. 1 mostró la mayor resistencia con el estabilizante comercial al 21 % (8.4 veces), seguido de cal al 7 % (6 veces) y ceniza al 25 % (3.7 veces). En el Suelo No. 2, el estabilizante comercial al 21 % fue el más efectivo logrando un incremento de 5.5 veces, seguido de la cal al 5 % (3.3) y ceniza al 20 % (2.5). En el Suelo No. 3, la cal al 7 % logró incrementar la resistencia en 2.9 veces y la ceniza al 25 % (2.7), superando al estabilizante comercial, que mostró baja eficacia (1.2 veces al 18 %). De manera grafica se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos para la condición en estado seco en las [Figura 5](#), [Figura 6](#) y [Figura 7](#).

**Figura 5.** RCI en estado seco para Suelo No.1 con la adición de los 3 estabilizantes.

Fuente: Elaboración propia.

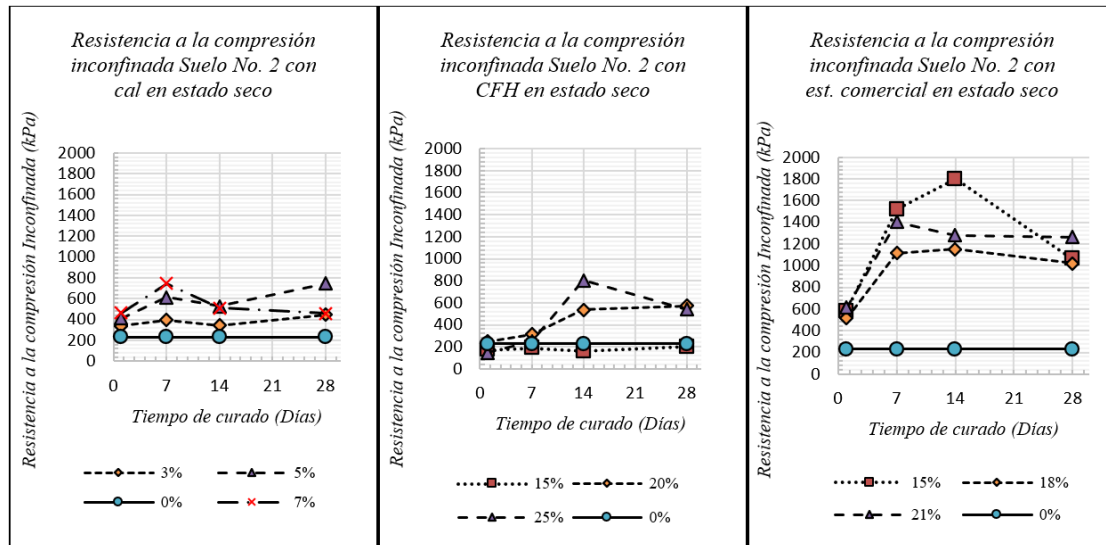


Figura 6. RCI en estado seco posterior a la etapa de curado, para el suelo N°2.

Fuente: elaboración propia.

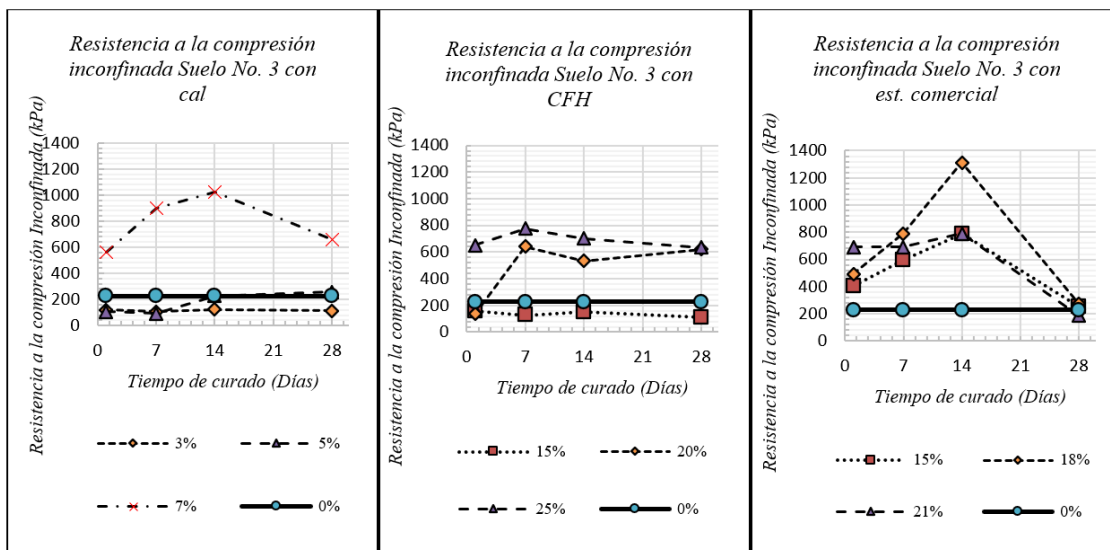


Figura 7. RCI en estado seco para el Suelo No. 3 con la adición de los 3 estabilizantes.

Fuente: elaboración propia.

La mayor resistencia a la compresión, en seco y por capilaridad, se obtuvo con 7 % de cal lo cual indica que esta dosificación activa eficientemente las reacciones puzolánicas. La ceniza al 20 % y 25 % también mejoró la resistencia, por la formación de compuestos cementantes entre sus óxidos y los minerales del suelo [17]. El estabilizante comercial fue eficaz en todas las proporciones, destacando el 21 % por su alta reactividad con calcio, magnesio y fósforo [18].

3.2.2 Estado en capilaridad por 24h

Bajo esta condición, que simula la absorción de humedad desde la base del suelo, los estabilizantes continuaron mostrando efectos positivos, aunque con variaciones importantes según el tipo de suelo (Ver [Tabla 2](#)).

Tabla 2. Resultados de compresión inconfiada (UCS) en [kPa] para el estado en capilaridad

Parameter [kPa]	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Resistencia inicial	17.7	36.0	77.42
Cal – 3%	32.2	105	93.0
Cal – 5%	75.5	189	224.
Cal – 7%	653	451	387.0
Ceniza – 15%	9.9	230.7	62.0
Ceniza – 20%	80.0	233.2	92.0
Ceniza - 25%	71.0	162.5	78.0
Comercial – 15%	219.7	116.1	30.04
Comercial – 18%	145.3	106.4	32.20
Comercial – 21%	182.5	177.7	19.35

Fuente: elaboración propia.

De manera grafica, se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos para la condición en estado saturado por capilaridad en las [Figura 8](#), [Figura 9](#) y [Figura 10](#).

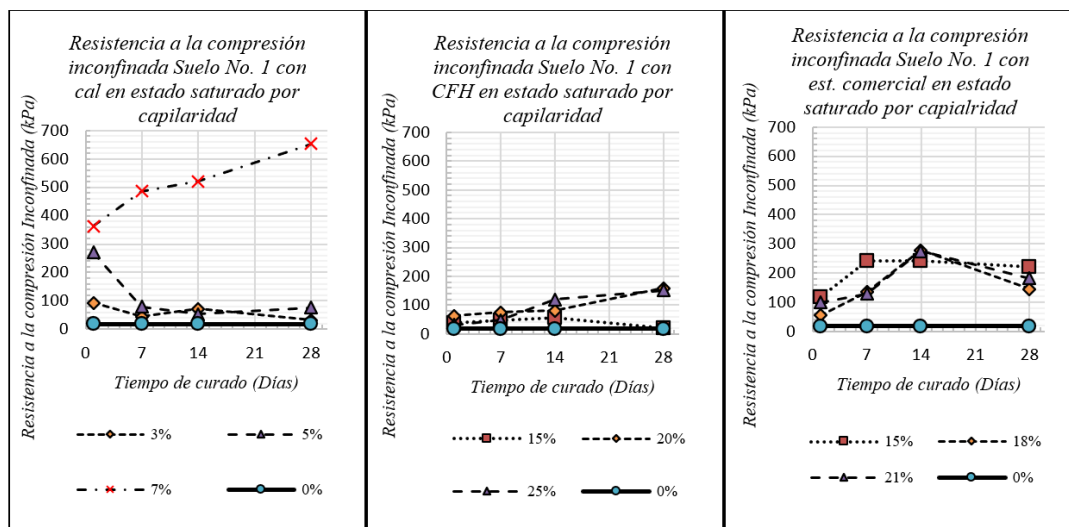


Figura 8. RCI en saturación por capilaridad para el Suelo No.1 con la adición de los 3 estabilizantes.

Fuente: elaboración propia

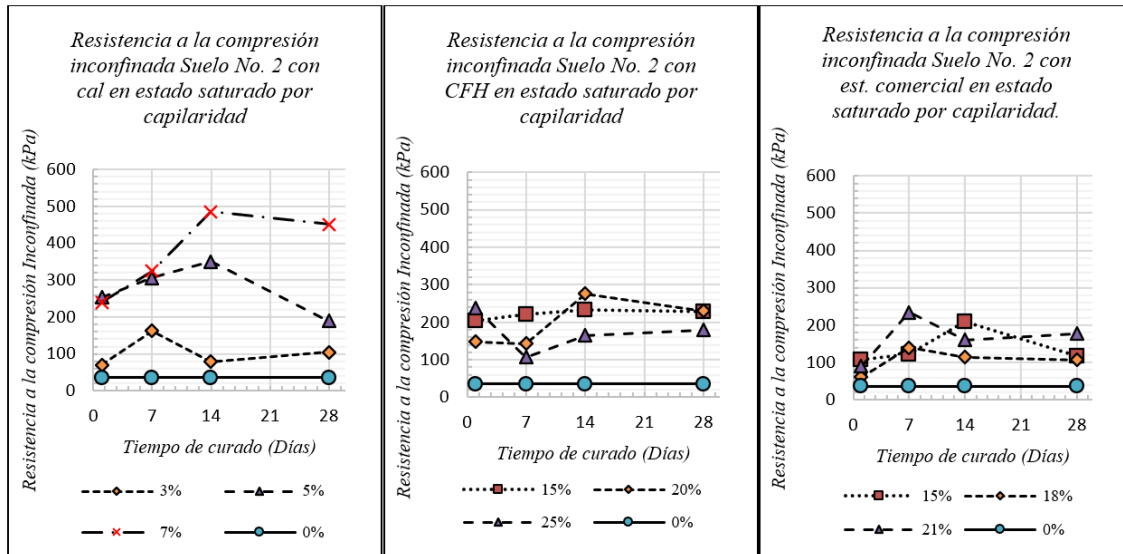


Figura 9. RCI en saturación por capilaridad posterior a la etapa de curado, para el suelo N°2.

Fuente: elaboración propia.

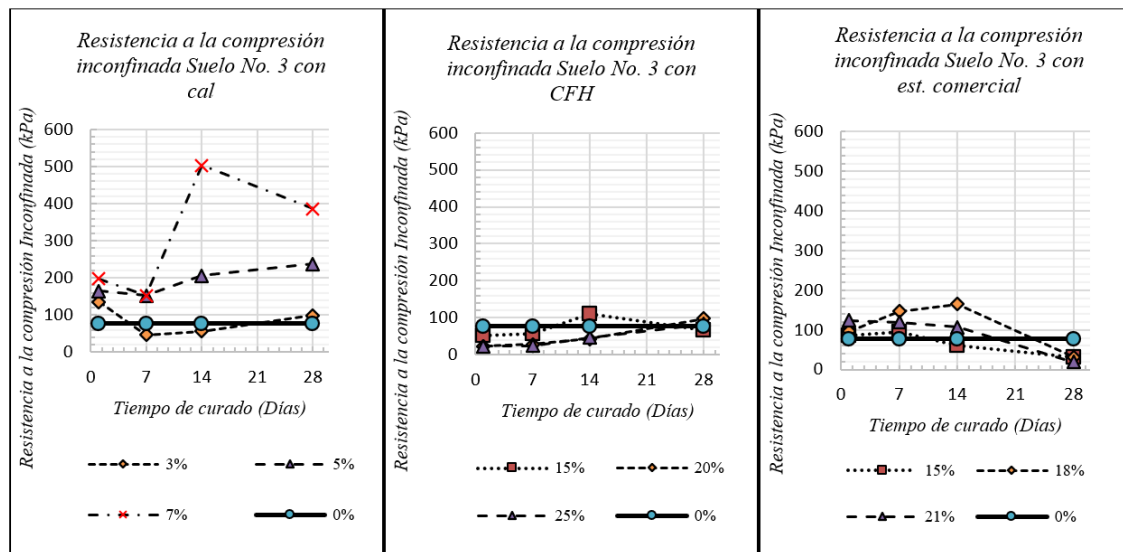


Figura 10. RCI en saturación por capilaridad para el Suelo No.3 con la adición de los 3 estabilizantes.

Fuente: elaboración propia.

3.2.3 Estado de inmersión por 1h

Esta condición representa el escenario más crítico, al exponer los suelos completamente al agua. En este contexto, solo algunos estabilizantes mantuvieron o mejoraron significativamente la resistencia del suelo como se presenta en la [Tabla 3](#).

Tabla 3. Resultados de compresión inconfiada (UCS) en [kPa] para el estado saturado por inmersión

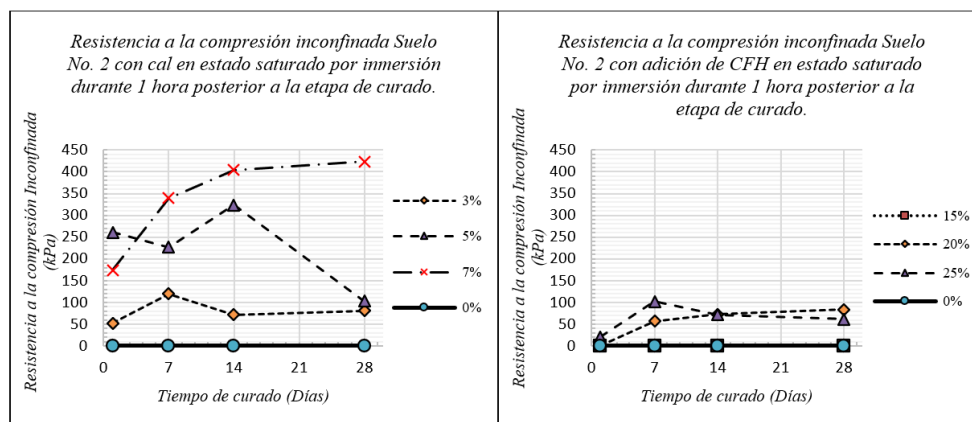
Parámetro [kPa]	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Resistencia inicial	N.R	N.R	N.R
Cal - 3%	N.R	81	52.0
Cal - 5%	N.R	103	170.5
Cal - 7%	587.7	423	621.2
Ceniza - 15%	N.R	N.R	N.R
Ceniza - 20%	N.R	79.0	N.R
Ceniza - 25%	N.R	64.7	N.R
Comercial - 15%	N.R	N.R	N.R
Comercial - 18%	N.R	N.R	N.R
Comercial - 21%	N.R	N.R	N.R

Fuente: elaboración propia.

Nota: los valores indicados como N.R (No Resulte) se debe a que las probetas no soportaron la hora de inmersión.

En condición saturada, el Suelo No. 1 mostró un comportamiento excepcional con cal al 7 %, incrementando la resistencia 587 veces respecto al estado natural, evidenciando una estabilización química altamente efectiva. La ceniza al 20 % y el estabilizante comercial al 15% lograron aumentos de 9 y 12 veces, respectivamente. En el Suelo No. 2, la cal al 7 % también fue la más eficaz (423 veces), seguida por la ceniza al 20 % (79 veces), mientras que el estabilizante comercial no generó mejoras significativas. En el Suelo No. 3, solo la cal —especialmente al 7 %— mostró resultados positivos, con un incremento de 261 veces. La ceniza y el estabilizante comercial no mejoraron el comportamiento mecánico; en algunos casos, incluso redujeron la resistencia respecto al suelo natural.

De manera grafica se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos para la condición en estado de inmersión en la [Figura 11](#) y [Figura 12](#).

**Figura 11.** RCI en inmersión durante 1 hora posterior a la etapa de curado, para el suelo N°2.**Fuente:** elaboración propia.

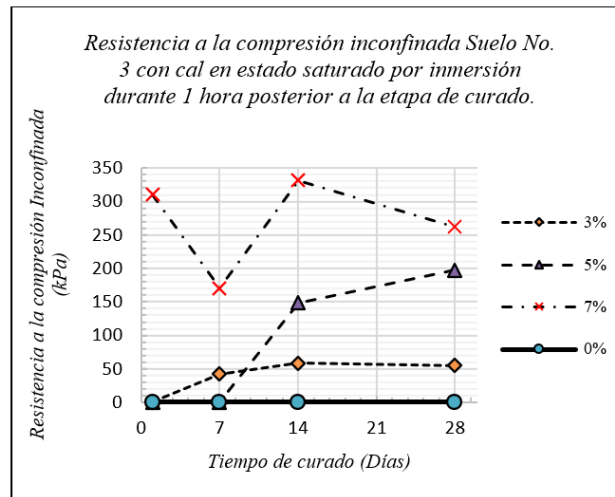


Figura 12. RCI en inmersión para el Suelo No.3 con la adición de los 3 estabilizantes.

Fuente: elaboración propia.

En condición saturada, el Suelo No. 1 presentó su mejor desempeño con cal al 7 %, incrementando la resistencia 37 veces frente al estado natural. Le siguieron la ceniza al 20 % (9 veces) y el estabilizante comercial al 15 % (12 veces). En el Suelo No. 2, la cal al 5 % fue la más efectiva (12.5 veces), mientras que la ceniza al 20 % y el estabilizante comercial al 21 % lograron incrementos de 6.5 y 5 veces, respectivamente. En el Suelo No. 3, solo la cal al 7 % mostró buen desempeño (5 veces); la ceniza al 20 % tuvo efecto limitado (1.2 veces) y el estabilizante comercial disminuyó la resistencia, evidenciando un comportamiento adverso bajo saturación.

En el Suelo No. 2, todos los estabilizantes mejoraron la resistencia en estado seco, destacando el estabilizante comercial al 21 % (5,5 veces), la cal al 5 % (3,3) y la ceniza al 20 % (2,5). En capilaridad, la cal al 5 % logró el mayor incremento (12,5), seguida de la ceniza (6,5) y el comercial (5). En inmersión, la cal al 7 % (423) y la ceniza al 20 % (79) presentaron mejoras significativas. Picos irregulares en los datos sugieren reacciones con sulfatos, que podrían formar etringita y taumasita, compuestos expansivos que alteran la estructura del suelo. Actualmente se realiza caracterización química para confirmar esta hipótesis. [19] – [23].

En el Suelo No. 3, la cal al 7 % fue la más efectiva en estado seco (2,9 veces) y en inmersión (261 veces). La ceniza al 25% mejoró moderadamente la resistencia en seco (2,7 veces), pero tuvo bajo efecto en capilaridad e inmersión. El estabilizante comercial mostró baja o nula efectividad, reduciendo la resistencia en condiciones saturadas. Los resultados confirman el potencial de la ceniza en seco, mientras que la cal y el aditivo comercial requieren precaución en suelos con sulfatos por riesgo de expansión.

Los incrementos observados con la adición de cal son consistentes con lo reportado en la literatura reciente para SDCV mediante estabilización con productos puzolánicos, en los cuales se documentan aumentos de resistencia entre tres y seis veces respecto al suelo natural [14]. Sin embargo, bajo

condiciones de saturación, algunos estudios reportan reducciones significativas de resistencia cuando no se logra una adecuada formación de compuestos cementantes estables [18].

El comportamiento diferencial observado en los suelos analizados puede estar asociado a su composición mineralógica específica, como lo señalan investigaciones recientes que relacionan la presencia de minerales amorfos con variaciones en la respuesta mecánica posterior a la compactación y al curado [16]. Asimismo, la influencia de la humedad en la resistencia coincide con lo reportado por otros autores, quienes destacan la importancia del control de humedad y saturación en la interpretación de resultados experimentales [16].

4. Conclusiones

La CFH demostró potencial como estabilizante en estado seco con evidencia de incrementos significativos en la resistencia a la compresión confinada respecto al suelo natural; sin embargo, presentó limitada eficacia bajo condiciones de saturación, donde la resistencia disminuyó considerablemente en comparación con la cal. De acuerdo con la norma ASTM D4609-94, un aditivo químico se considera eficaz cuando logra un incremento mínimo de 345 kPa (50 psi) en la resistencia a la compresión confinada respecto al suelo natural. En el presente estudio, únicamente el tratamiento con cal alcanzó y superó este umbral en los Suelos No.1 y No.2 en los tres estados evaluados, mientras que la CFH y el estabilizante comercial no lograron cumplir este criterio bajo condición de saturación. Estos resultados son coherentes con investigaciones nacionales en suelos volcánicos estabilizados con ligantes cementantes [14], [15] e internacionales en suelos tropicales tratados con agentes cálcicos [18], en los que se reporta que el desempeño bajo humedad depende del grado de reacción puzolánica alcanzado.

En condiciones de inmersión, la ceniza y el estabilizante comercial no presentaron mejoras sostenidas en resistencia, a diferencia de la cal, que logró incrementar la resistencia en los tres estados, aunque con comportamiento variable. Este comportamiento puede atribuirse al alto contenido de sulfatos presentes en los suelos estudiados, que al reaccionar con el hidróxido de calcio favorecen la formación de compuestos expansivos, afectando la estabilidad del tratamiento. Fenómenos similares han sido documentados en estudios comparativos de estabilización con cal en suelos arcillosos [24], donde se advierte que la interacción calcio-sulfatos puede influir en la durabilidad del tratamiento.

Un aspecto por considerar es que los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan una mineralogía compleja y una estructura interna que favorece alta retención de humedad y compresibilidad, características que no son fácilmente modificables y cuya respuesta depende en gran medida del estabilizante empleado. Aunque se observaron reducciones en el índice de plasticidad tras la estabilización, estos cambios no alteraron sustancialmente la distribución granulométrica ni el contenido de partículas finas, lo cual impidió un cambio de clasificación SUCS. Este comportamiento coincide con lo reportado

en investigaciones sobre suelos volcánicos tropicales [18], donde la mejora se produce principalmente a nivel microestructural.

La evaluación de materiales no tradicionales, como la CFH, demuestra que pueden representar una alternativa viable en condiciones de baja humedad, aunque su desempeño bajo saturación es inferior frente a estabilizantes tradicionales como la cal. Estos resultados complementan antecedentes nacionales recientes [14], [15] y aportan información cuantitativa para la toma de decisiones en proyectos viales en el departamento del Cauca. Se recomienda que futuros estudios incorporen análisis químicos y mineralógicos post-estabilización, especialmente en suelos con presencia de sulfatos, con el fin de comprender las reacciones involucradas y su impacto en el cumplimiento de criterios normativos como el establecido por la ASTM D4609-94.

Desde el punto de vista práctico, las dosificaciones utilizadas son viables técnicamente y aplicables en campo, así los demuestran los resultados obtenidos a escala de laboratorio evidenciando el potencial de la estabilización química en suelos derivados de ceniza volcánica; sin embargo, su implementación en campo requiere una validación previa bajo condiciones reales de obra. Es fundamental ejecutar tramos de prueba que permitan evaluar el comportamiento del suelo estabilizado frente a variables propias del entorno, como variaciones de humedad, control de compactación, homogeneidad en la mezcla y condiciones de drenaje. Estos tramos piloto permiten ajustar dosificaciones, verificar el desempeño mecánico y analizar la respuesta ante ciclos de saturación–secado, reduciendo riesgos técnicos y económicos antes de una aplicación a mayor escala. De esta manera, los resultados experimentales pueden trasladarse de forma más confiable a proyectos de infraestructura vial.

5. Referencias

- [1] Departamento Nacional de Planeación, "Política para la gestión de la red terciaria: Presupuesto informado por resultados," Departamento Nacional de Planeación, Bogotá, Colombia, 2023
- [2] Oficina Asesora de Planeación, Gobernación del Cauca, "Plan vial del departamento del Cauca," Gobernación del Cauca, Popayán, Colombia, 2019.
- [3] Servicio Geológico Colombiano, "Generalidades volcán Puracé," SGC, 2024. Consultado: el 30 de may. de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanPurace/Paginas/generalidades-volcan-purace.aspx>
- [4] Servicio Geológico Colombiano, "Generalidades volcán Sotará," SGC, 2024. Consultado: el 30 de may. de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanSotara/Paginas/generalidades-volcan-sotara.aspx>
- [5] C. C. Guerrero Castro y L. G. Cruz Velasco, *Clasificación de suelos finos de Popayán: Basada en la sensibilidad química de los fluidos de poro – suelos derivados de cenizas volcánicas*, 1.^a ed. Popayán, Colombia: Editorial Universidad del Cauca, 2018.

- [6] L. R. Vásquez-Varela y C. Mendoza, "Implications of physical and chemical changes in volcanic ash soils related to road construction," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2118, núm. 1, art. 012012, 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2118/1/012012>
- [7] A. Sridharan y K. Prakash, "Classification procedures for expansive soils," *Geotech. Eng. J. SEAGS AGSSEA*, vol. 31, núm. 2, pp. 185–190, 2000.
- [8] H. Afrin, "A review on different types soil stabilization techniques," *Int. J. Transp. Eng. Technol.*, vol. 3, núm. 2, p. 19, 2017. doi: <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20170302.12>
- [9] S. Amena, "Experimental study on the effect of plastic waste strips and waste brick powder on strength parameters of expansive soils," *Heliyon*, vol. 7, núm. 11, art. e08278, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08278>
- [10] A. Maghomi, M. Bakhtiari, y M. Heidari, "Stabilization and improvement soils characteristics using natural and industrial additives," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 81, núm. 5, art. 218, 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02715-x>
- [11] Arulanantham, "The engineering behind soil stabilization with additives: A state-of-the-art review," *Geotech. Geol. Eng.*, 2023. doi: 10.1007/s10706-023-02554-x..
- [12] C. A. Murillo, "Desafíos para el desarrollo de la red vial terciaria en el posconflicto," *Rev. Ing.*, núm. 45, pp. 32–39, 2017. doi: <https://doi.org/10.16924/revinge.45.5>
- [13] Universidad del Cauca, "Convenio 633 de 2020 – Plan de ensayos de laboratorio y modelaciones de desempeño para las tecnologías de la familia de estabilizantes #20_T2," informe técnico, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, may. 2022.
- [14] O. Pantoja-Quiscualtad, L. Cruz-Velasco, y V. Muñoz-Méndez, "Estudio básico de suelos derivados de ceniza volcánica modificados con cemento (bajos contenidos de cemento)," *Rev. UIS Ing.*, vol. 23, núm. 4, 2024. doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v23n4-2024001>
- [15] S. M. Gómez-Rodríguez, Y. F. Valbuena-Muñoz, y L. G. Cruz-Velasco, "Estabilización superficial de suelos derivados de cenizas volcánicas con cemento en taludes de infraestructura vial," *Ing. Compet.*, vol. 27, núm. 1, 2025. doi: <https://doi.org/10.25100/iyc.v27i1.14444>
- [16] P. V. Vettorelo, "Análisis de los efectos de la adición de cal y fibras en un suelo loésico," tesis de maestría, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2020.
- [17] Y. F. Arifin y A. S. Kusworo, "Utilization of lightweight brick waste as soils stabilizing agent," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 980, núm. 1, art. 012071, 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/980/1/012071>
- [18] A. S. Muntohar y G. Hantoro, "Stabilization of tropical volcanic soils using calcium-based binders," *Soils Found.*, vol. 62, núm. 3, 2022.
- [19] A. P. Olaya, "Aplicación de agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías," trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia, 2018.
- [20] H. Singh, P. Garg, y I. Kaur, Eds., *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Waste Management through Design (IC_SWMD 2018)*, vol. 21. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02707-0>

- [21] J. D. Solorzano, "Estudio de las cenizas de fondo de caldera de bagazo y/o carbón como sustituto del clinker y/o adición para mortero por medio de tratamiento químico alcalino," trabajo de grado, Universidad de San Buenaventura, Colombia, 2014.
- [22] INGELABSP S.A.S., "Informe técnico de estabilizantes comerciales aplicados a suelos volcánicos del Cauca," informe técnico, INGELABSP S.A.S., Popayán, Colombia, 2024.
- [23] A. B. Moale y E. J. Rivera, "Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica," trabajo de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú, 2019. doi: <https://doi.org/10.19083/tesis/648846>
- [24] A. Salimah, M. Hazmi, M. F. R. Hasan, y P. A. M. Agung, "A comparative study of red brick powder and lime as soft soil stabilizer," *F1000Research* 2022, **10**:777. doi: <https://doi.org/10.12688/f1000research.27835.2>

