

Análisis de arcilla expansiva mezclada con pumita para la estabilización del suelo

Analysis of expansive clay mixed with pumice for soil stabilization

Recibido: 13 de septiembre de 2025

Aprobado: 12 de diciembre de 2025

Cómo citar: H. Castellanos Fuentes, C. H. Flórez Góngora, and L. Y. Ortiz Rojas, "Análisis de arcilla expansiva mezclada con pumita para la estabilización del suelo", *Mundo Fesc*, vol. 16, no. 34, pp. 175-195 Jan. 2026, doi: 10.61799/2216-0388.1989.

Hamer Castellanos Fuentes^{1*}



Ingeniería civil,
hamercf@ufps.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0002-9443-7494>,
Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

Carlos Humberto Flórez Góngora²



MSc. Ingeniería Civil,
carloshumbertofg@ufps.edu.co,
<http://orcid.org/0000-0001-6924-0713>,
Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

Luz Yineth Ortiz Rojas³



MSc. Ciencias Agrarias,
luzyinethor@ufps.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0002-0818-3089>,
Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

***Autor para correspondencia:**

hamercf@ufps.edu.co



Análisis de arcilla expansiva mezclada con pumita para la estabilización del suelo

Resumen

Las arcillas con comportamiento expansivo, constituyen un problema recurrente en obras geotécnicas debido a las deformaciones que experimentan cuando se producen variaciones en la humedad. Estas modificaciones volumétricas afectan negativamente el desempeño de pavimentos, cimentaciones y estructuras civiles, generando fisuras y asentamientos diferenciales como lo evidencian un sinnúmero de investigaciones alrededor del mundo. La respuesta expansiva del suelo se relaciona directamente con la presencia de minerales activos capaces de absorber agua y alterar su estructura cristalina. Diversos estudios se han encaminado a lograr la reducción de la expansión de este tipo de suelos obteniendo resultados favorables que han ayudado a mitigar los efectos negativos. El objetivo central de la investigación se enfocó encontrar la mezcla óptima de arcilla y pumita para crear una estabilización efectiva, es decir, lograr la disminución de la expansión reduciendo parámetros como el índice de plasticidad del suelo, entre otros. Para lograr lo anterior se establecieron tres mezclas de diferente porcentaje en adición de pumita al suelo natural arcilloso y para cada composición se midieron mediante laboratorios, las características físicas, químicas, mecánicas y morfológicas que indicaran los patrones de estabilización a través de la medición de índices claves. Dentro de los resultados sobresalientes se encontró que, la mezcla con veinticinco por ciento de pumita presentó una disminución del índice de plasticidad del treinta por ciento, un descenso de la expansión libre en probeta superior al cuarenta y cinco por ciento y una reducción del potencial volumétrico de muy crítico a marginal. Los análisis morfológicos confirmaron la modificación en la composición mineralógica y química del suelo tratado, evidenciando una reducción en la concentración de minerales expansivos y formación de nuevas fases minerales. Estos hallazgos indican que la pumita puede ser utilizada como un estabilizante eficaz, sostenible para suelos arcillosos con alto potencial de expansión.

Palabras clave: Arcilla expansiva, expansión, estabilización de suelos, inestabilidad, morfología, plasticidad, pumita.

Analysis of expansive clay mixed with pumice for soil stabilization

Abstract

Expansive clays pose a recurring problem in geotechnical engineering due to the deformations they undergo when moisture levels fluctuate. These changes in volume negatively affect the performance of pavements, foundations, and civil engineering structures, causing cracks and differential settlement, as evidenced by countless studies around the world. Soil expansion is directly related to the presence of active minerals capable of absorbing water and altering its crystalline structure. Various studies have aimed to reduce expansion in this type of soil, yielding favorable results that have helped mitigate negative effects. The central objective of the research was to find the optimal mixture of clay and pumice to achieve effective stabilization, that is, to reduce expansion by lowering parameters such as the soil plasticity index, among others. To achieve this, three mixtures with different percentages of pumice added to the natural clay soil were prepared, and for each mixture, laboratories measured the physical, chemical, mechanical, and morphological characteristics that indicate stabilization patterns through the measurement of key indices. Among the notable results, it was found that the mixture containing 25 percent pumice exhibited a 30 percent decrease in the plasticity index, a reduction in free expansion of more than 45 percent, and a reduction in volumetric potential from very critical to marginal. Morphological analyses confirmed the change in the mineralogical and chemical composition of the treated soil, showing a reduction in the concentration of expansive minerals and the formation of new mineral phases. These findings suggest that pumice can be used as an effective, sustainable stabilizer for clay soils with high expansion potential.

Keywords: Expansion, expansive clay, instability, morphology, plasticity, pumice, soil stabilization.

Introducción

Las propiedades expansivas de ciertos suelos arcillosos representan una limitación importante para el desarrollo de proyectos de infraestructura. Estos suelos presentan una alta susceptibilidad a la expansión y contracción, lo que puede ocasionar deformaciones significativas y daños estructurales en distintas obras de infraestructura. El cambio volumétrico se presenta ante la presencia de agua o como consecuencia del aumento del tamaño de los cristales mineralógicos que contiene. Por lo general estos suelos son de textura fina (tamaño menor a 0.002 cm), con límite de contracción menor a 8%, actividad mayor a 0,75, presión de expansión lambe de 5 a 9 e índice de expansión libre > 100. Cuando estos materiales absorben humedad, pueden incrementar su volumen y posteriormente contraerse durante los procesos de secado, ocasionando alteraciones estructurales que comprometen la estabilidad de las obras. Este comportamiento se encuentra asociado principalmente con la mineralogía del suelo y con la capacidad de intercambio de agua de determinados minerales arcillosos. Las capas pueden acoplarse compartiendo oxígenos, de acuerdo con la organización estructural los minerales generan filosilicatos bilaminares o trilaminares, estos se agrupan en diferentes familias. Las esmectitas, las micas y los minerales fibrosos hacen parte de dicha clasificación. Dentro de los minerales expandibles del grupo de las esmectitas se encuentran: montmorillonita, la nontronita y la beidelita (de tipo dioctaédricas; y saponita, la sauconita y la hectorita (de tipo trioctaédricas) [1].

Como consecuencia de estos problemas asociados a las arcillas expansivas, diversos autores han estudiado su comportamiento y estabilidad mediante el uso de distintos materiales para su estabilización. La estabilización de la arcilla se entiende como la reducción o eliminación de la capacidad expansiva de la misma, de modo que, no represente un riesgo estructural. La literatura ha documentado múltiples estrategias de estabilización, especialmente mediante aditivos químicos [2]. Entre los materiales empleados se destacan aquellos con propiedades puzolánicas, tales como cenizas volantes [3], valvas de moluscos usados para pavimentación [4], vidrio reciclado [5], mezcla de cal y ceniza volante [6], cenizas de carbón [7], ceniza de quinua [8], ceniza de mazorca de maíz [9] y el uso de ceniza de cáscara de arroz [10]. También se ha reportado compuestos que generan reacciones químicas beneficiosas para la mejora del suelo, como el silicato de sodio [11] que, con una adición óptima del 3% mejora significativamente las propiedades físicas, mecánicas, y químicas del suelo [12]. Para el caso de la estabilización de vías, se ha propuesto el uso de cáscara de huevo pulverizada, cuya composición química incluye principalmente carbonato de calcio (CaCO_3), que constituye aproximadamente el 94% de su masa, además de pequeñas proporciones de carbonato de magnesio (MgCO_3 , 1%) fosfato tricálcico ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, 1%), las cuales actúan como agentes estabilizadores al modificar las propiedades fisicoquímicas del suelo arcilloso [13]. Otras técnicas empleadas incluyen la inyección de polímeros [14], el uso de polímero bicomponente [15], y reacciones electroquímicas con compuestos como

el aceite sulfonado [16]. La estabilización pretende crear un comportamiento hidrofóbico de la arcilla [17].

El conocimiento detallado de las propiedades mineralógicas es fundamental para poder comprender cómo reacciona un suelo expansivo ante la adición de materiales estabilizantes. Esta comprensión permite modificar su estructura y mejorar su comportamiento, con el objetivo de prevenir los daños que pueda ocasionar [18][19]. La evaluación integral de un proceso de estabilización requiere no solo ensayos físicos y mecánicos, sino también análisis químicos y mineralógicos que permitan comprender los cambios generados en la estructura interna del suelo. En este sentido, la presente investigación analiza el comportamiento de mezclas de arcilla expansiva y pumita triturada, considerando parámetros geotécnicos y estudios morfológicos para determinar la efectividad del material volcánico como estabilizante.

Metodología

El estudio se desarrolló mediante una metodología experimental orientada a evaluar las modificaciones producidas por la incorporación de pumita en un suelo expansivo. Se presenta la secuencia utilizada para llevar a cabo los procesos que permitieron verificar la modificación de las condiciones iniciales del suelo arcilloso expansivo para lograr la disminución de la característica expansiva del mismo.

Localización de sitios de muestreo para suelo expansivo y material estabilizador

El área de desarrollo del proyecto se localizó en los barrios Aguas Calientes y La Ermita, en la ciudad de San José de Cúcuta, Colombia. Las muestras fueron obtenidas en diferentes sectores de San José de Cúcuta asociados geológicamente con la Formación León, unidad reconocida por la presencia de arcillas de elevada plasticidad y comportamiento expansivo ubicados en las siguientes coordenadas: Sitio 1: 7°52'39"N, 72°28'37"W; Sitio 2: 7°52'40"N, 72°28'44"W; y Sitio 3: 7°56'03"N, 72°31'20"W. Los suelos de la Formación León se caracterizan por presentar sedimentos microlaminados, con lentes de yeso y fragmentos de carbón entre las capas. Durante la exploración se realizaron dos (2) apiques manuales a una profundidad de 1,50 metros. Adicionalmente, se tomó una muestra de una zona afectada por un deslizamiento causado por remoción en masa. La Figura 1 muestra la localización geográfica de los puntos de muestreo del suelo natural [20].

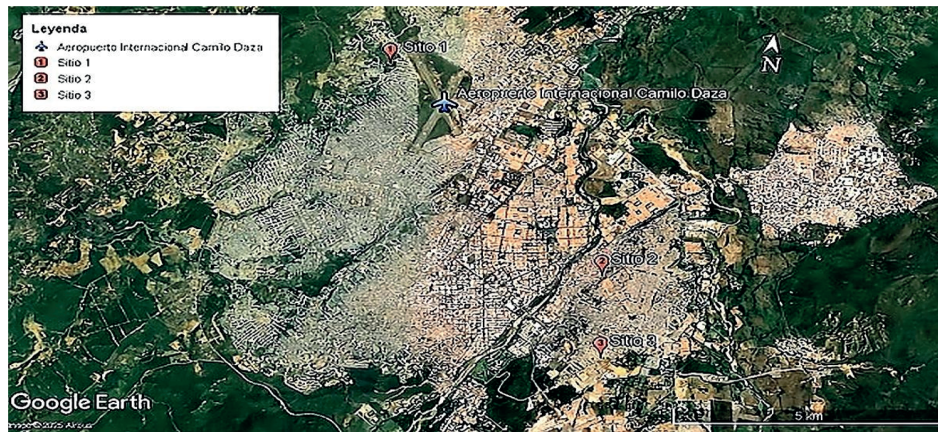


Figura 1. Mapa topográfico de localización de los sitios de exploración. Se muestran los tres puntos de muestreo en la ciudad de San José de Cúcuta, Colombia: Sitio 1 (7°56'03"N, 72°31'20"W), Sitio 2 (7°53'40"N, 72°28'44"W), y Sitio 3 (7°52'39"N, 72°28'37"W). El mapa incluye referencias geográficas clave como el Aeropuerto Internacional Camilo Daza y el Puente Internacional Atanasio Girardot, Coordenadas proyectadas en el sistema geodésico WGS84. Escala 1:85.000.

De otro lado, la pumita empleada como material estabilizante fue obtenida de los depósitos de origen ígneo extrusivo formados por erupciones del volcán Chimborazo, Ecuador, Sur América. La Tabla I, presenta una descripción detallada del trabajo de campo, incluyendo el sitio de muestreo, las coordenadas geográficas, la geoforma, el número de excavaciones, descripción del método de toma de muestras y cantidad recolectada de las mismas.

Tabla I. Características generales del trabajo de campo y localización de los sitios de muestreo.

Sitio	Nombre sitio de muestreo	Coordenadas geográficas	Geoforma	Número excavaciones exploratorias	Descripción	Número de muestras
1	Barrio Aguas Calientes	7°52'39"N 72°28'37"W	Corte	1	1 apique manual a profundidad de 1,50 m.	3
2	Barrio Aguas Calientes	7°52'40"N 72°28'44"W	Explanación	1	1 apique manual a profundidad de 1,50 m.	3
3	Barrio La Ermita	7°56'03"N 72°31'20"W	Corte	1	Toma sobre deslizamiento de tierra	3

Diseño de mezcla suelo natural - pumita

Se seleccionaron las nueve muestras de suelo para ser tratadas con pumita triturada y a partir de estas se diseñaron tres mezclas experimentales variando el contenido de pumita en peso seco y volumen, con las siguientes proporciones: mezcla 1 con 85% arcilla y 15% de pumita triturada, mezcla 2 con 75% arcilla y 25% pumita, y mezcla 3 con 65% arcilla y 35% de pumita triturada.

Ejecución de ensayos

La caracterización del suelo se llevó a cabo siguiendo, en su mayoría, los procedimientos establecidos en las metodologías estándar de la sociedad estadounidense para pruebas

y materiales (ASTM, por su sigla en inglés), con excepción de los ensayos de índice de expansión libre y expansión en lambe, los cuales se realizaron conforme a las normas del instituto nacional de vías (INVÍAS, por sus siglas en español) [21][22]. Se indican los ensayos de laboratorio ejecutados.

Ensayo para caracterización mecánica y física del suelo.

La caracterización del material incluyó ensayos geotécnicos convencionales tales como contenido de humedad, límites de atterberg, clasificación SUCS y AASHTO, expansión libre e índice de expansión lambe. Todos los procedimientos se ejecutaron siguiendo especificaciones ASTM e INVÍAS. Complementariamente, se realizaron análisis de difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de energía dispersiva para identificar cambios mineralógicos y composicionales generados por la interacción entre el suelo y la pumita. La Tabla II resume los ensayos aplicados al suelo natural y a las diferentes mezclas, junto con las respectivas normas técnicas utilizadas para cada uno. Se listan los ensayos realizados, su propósito y las normas técnicas que regulan su ejecución.

Tabla II. Ensayos de caracterización física y mecánica del suelo con su referencia normativa.

Nombre de ensayo	Referencia normativa
Contenido de humedad	ASTM D2216 - 19
“Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos”	ASTM D4318 - 17
Lavado sobre tamiz 75 µm (No. 200)	ASTM C117 - 17
Determinación de suelos expansivos	INV E 132 - 13
“cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de lambe”	INV E 120 - 13
“Práctica normalizada para la clasificación de suelos y áridos para la construcción de carreteras”.	ASTM D3282 - 15
“Práctica normalizada para la clasificación de suelos con fines de ingeniería (Sistema unificado de clasificación de suelos)”	ASTM D2487 - 17

Contenido de humedad

El ensayo de contenido de humedad, es un procedimiento de laboratorio que busca establecer la cantidad de agua presente en una muestra, se lleva una muestra de material húmedo al horno de secado con una temperatura programada de 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F) y se seca hasta que se obtenga la masa seca constante, el cálculo se relaciona con la masa de agua en la muestra húmeda con la masa en la muestra seca, generalmente expresada como un porcentaje de peso seco, conocer el porcentaje de humedad (agua) en los suelos es fundamental para el diseño de cimentaciones y otros elementos constructivos.

Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

El método de prueba estándar para los límites de Atterbergh de los suelos une tres procedimientos definidos, el límite líquido que consiste en seleccionar una cantidad de suelo fino, mezclarla con cantidades de agua hasta obtener una consistencia pastosa, colocar la porción del suelo húmedo en el equipo (cazuela de Casagrande) y se divide

en dos partes con una herramienta especial llamada ranurador, se golpea la copa contra una base de forma repetida, lo que hace que las dos partes de la muestra se junten. Se registra el número de golpes obtenido para que las juntas se unan, se repite tres veces para obtener la curva de flujo y el límite líquido se obtiene como el contenido de humedad correspondiente a un número específico de golpes, correspondiente a 25 golpes.

El límite plástico consiste en determinar la humedad (agua) con la que el suelo deja de moldearse y se agrieta al ser amasado en forma de cilindros, se utiliza parte de la muestra del límite líquido después de ser remezclado o al obtener el primer número de golpes, con la masa de suelo húmedo, se hacen rollos cilíndricos de 3,2 mm de diámetro amasando cuidadosamente con la palma de la mano hasta que se vea agrietado o se desmorone el suelo. Se repite el procedimiento dos veces, luego se calcula el contenido de humedad promedio de las pruebas realizadas, y este valor se considera el límite plástico del suelo.

Lavado sobre tamiz 75 μ m (No. 200)

El ensayo de lavado sobre tamiz N° 200, consiste en tomar una muestra de material que debe ser secada en un horno programado a temperatura de 110 ± 5 °C hasta que se obtenga la masa seca constante, la muestra se deja en un recipiente saturada con agua, luego se agita vigorosamente para dejar en suspensión las partículas finas, posteriormente se deja que el agua caiga libremente sobre el tamiz evitando hacer fricción sobre el mismo, se devuelve las partículas retenidas en el tamiz al recipiente y se sigue lavando hasta que el agua dentro del recipiente se observe relativamente clara.

Ensayo de expansión libre en probeta

El método de expansión libre consiste en usar una muestra de 20 gramos secada al horno, separar las muestras en dos cada una de 10 gramos, colocarlas en probetas de 100 ml, y llenar una con agua y otra con kerosene, después de llenas las probetas se agitan con una varilla de vidrio removiendo el aire atrapado, posterior a ello se deja en reposo por 24 horas para luego determinar el valor que alcanza cada suelo en la probeta.

Cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de lambe

El cambio volumétrico potencial de un suelo permite identificar en que zona de riesgo asociado se encuentra el suelo analizado, dentro del grupo se encuentran: no crítico, marginal, crítico y muy crítico. Dependiendo de donde se encuentre el suelo, define su potencial cualitativo de expansión. El ensayo determina la presión de expansión que requiere una muestra tallada de suelo compactado bajo condiciones de humedad establecidas sometida a inmersión en el aparato medidor de lambe.

Los ensayos de laboratorio desarrollados en esta etapa permitieron obtener la

información clave sobre las propiedades de los geomateriales, tanto naturales como tratados. Estas pruebas facilitaron la determinación de las características de plasticidad y clasificación, así como las propiedades físicas, mecánicas, químicas y la interacción entre los componentes de las mezclas.

Además de la caracterización inicial del suelo natural, se llevó a cabo la trituración de la pumita utilizada como aditivo estabilizante, la preparación de las mezclas en laboratorio y la verificación del cumplimiento normativo aplicable. Finalmente, se efectuó la preparación de las muestras para ensayos químicos y su desarrollo para laboratorios especializados correspondientes.

Se seleccionaron las nueve muestras de suelo para ser tratadas con pumita triturada y a partir de estas se diseñaron tres mezclas experimentales variando el contenido de pumita en peso seco y volumen, con las siguientes proporciones: mezcla 1 con 85% arcilla y 15% de pumita triturada, mezcla 2 con 75% arcilla y 25% pumita, y mezcla 3 con 65% arcilla y 35% de pumita triturada.

Las actividades desarrolladas en la fase de trabajo incluyeron los cálculos técnicos, diseños de formatos, procesamiento, análisis de datos y discusión de los productos, consolidando así la información obtenida durante la investigación y generando los resultados que se presentan en este estudio.

Ensayos para caracterización morfológica del suelo natural y mezcla suelo-pumita

Para la caracterización morfológica del suelo y sus mezclas tratadas, se realizaron análisis mediante Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS, por su sigla en inglés). Estos ensayos permitieron observar la estructura cristalina, la morfología superficial y la composición elemental de los materiales analizados.

Difracción de Rayos X (DRX)

El ensayo de difracción de rayos x, es un método analítico que ayuda a identificar la composición mineralógica y la estructura cristalina de los suelos. Este ensayo consiste en la interacción de los rayos x con los átomos de la muestra, produciendo un patrón de difracción que revela la disposición de los átomos en el material. Para ejecutar el ensayo, es necesario homogenizar y triturar una muestra mínima que, al ser prensada manualmente con un émbolo, es colocada en el equipo realizando lecturas a la muestra preparada y emitiendo un diagrama. El difractograma obtenido por el equipo de difracción de rayos x, se analiza e interpreta con base a los datos otorgados por el equipo.

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La microscopía electrónica de barrido es un ensayo que utiliza un haz de electrones para

examinar la superficie de una muestra. En lugar de luz visible, la microscopia electrónica de barrido genera imágenes y utiliza un haz de electrones que "barre" la superficie de la muestra, interactuando con ella y generando diversas señales. Estas señales, como los electrones secundarios y retrodispersados, son detectadas y procesadas por un software para generar imágenes de alta resolución de la superficie. Los electrones secundarios y retrodispersados se utilizan para generar una imagen, con base a la imagen se asocia la morfología y la topografía de la muestra, mientras que los electrones retrodispersados muestran contraste en la composición de los elementos de la muestra.

Espectroscopía de dispersión de energía (EDS)

La espectroscopía de dispersión de energía es un ensayo utilizado para determinar la composición elemental de una muestra. Consiste en medir la energía y la intensidad de los rayos x emitidos por la muestra cuando es expuesta a un haz de electrones. Los datos obtenidos permiten identificar los elementos presentes y su abundancia relativa. La Espectroscopia de dispersión de energía permite realizar un análisis elemental químico para una muestra que se encuentre dentro de un microscopio electrónico. Es utilizado para caracterizar la composición química de las muestras. Cada elemento de la tabla periódica puede emitir rayos x de ciertas energías características en el que el microscopio analiza y cuantifica la composición elemental de la muestra con una resolución manométrica gracias a la identificación de estos rayos x.

Resultados y Discusión

Límite líquido e índice de plasticidad (LL, IP)

Los resultados indican que la adición de pumita influye directamente en la plasticidad del suelo. En la mezcla con 15% de pumita se evidenció una reducción en el límite líquido y el índice de plasticidad, aunque esta disminución no fue suficiente para cumplir con los criterios técnicos de estabilización establecidos en la normativa. Ante esta situación, se incrementó el contenido de pumita al 25%, lo cual generó una disminución del límite líquido del 23% y una reducción del índice de plasticidad del 36% con respecto al suelo natural. Este comportamiento refleja una mejora significativa en el LL y la trabajabilidad del suelo, reduciendo su sensibilidad a los cambios de humedad y aumentando su estabilidad estructural. Sin embargo, al incrementar la proporción pumita al 35%, los resultados mostraron una tendencia a la estabilización de los valores, sin mejoras sustanciales adicionales. De hecho, se evidenció que el aumento del contenido de aditivo no solo representa mayores costos y tiempos de procesamiento, sino que tampoco ofrece beneficios técnicos proporcionales. En este sentido, los datos sugieren que existe un punto óptimo de adición en torno 25% de pumita, en el cual se maximiza la reducción del índice de plasticidad sin incurrir en sobre costos ni en manejo ineficiente del material.

De acuerdo con los resultados, se muestra de forma clara una tendencia decreciente

del índice de plasticidad conforme se incrementa la proporción de pumita en las mezclas desde 0 % hasta 25 %. Esta disminución es especialmente notoria entre el 15 % y el 25 %, donde se presenta una disminución del índice de plasticidad en todas las muestras, lo que indica una respuesta consistente del suelo ante el tratamiento con el material estabilizante. Este comportamiento sugiere que, en ese rango, la pumita actúa eficazmente sobre la estructura del suelo, posiblemente promoviendo un intercambio catiónico y una reducción en la actividad de los minerales arcillosos, como la montmorillonita, responsables de la alta plasticidad. Al alcanzar el 25 % de adición, el índice de plasticidad promedio de las muestras cae a valores cercanos o inferiores a 23 %, lo cual representa una mejora sustancial respecto a las condiciones iniciales, donde se registraban valores superiores a 40 %.

En contraste, al aumentar la proporción de pumita al 35 %, el índice de plasticidad muestra un ligero aumento o una estabilización, sin mejoras significativas adicionales. Este comportamiento puede explicarse por una saturación en la capacidad de interacción del suelo con el material estabilizante, o incluso por la dilución de la fracción fina plástica con un exceso de material granular inerte, lo cual limita la efectividad del proceso de estabilización. Por lo tanto, la evidencia empírica respalda que la cantidad de pumita requerida para la estabilización del suelo estudiado sea del 25%, ya que representa el equilibrio ideal entre rendimiento técnico, eficiencia económica y viabilidad operativa.

Clasificación del suelo según AASHTO

De acuerdo con el sistema de clasificación aashto, los suelos estudiados se encuentran clasificados como A-7-6-(41), esto indica que es un suelo con alta plasticidad y baja calidad para uso como subrasante en la construcción de estructuras.

Clasificación del suelo según SUCS.

Mediante el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) se obtuvo que el suelo se encuentra clasificado como arcilla de alta plasticidad (CH). La mezcla de suelo tratado con 25% de pumita indicó la clasificación como arcilla arenosa de baja plasticidad (CL) esta se mantiene con la interacción de la pumita y da mayor estabilidad al suelo natural.

Contenido de humedad

Se ejecutó el ensayo de humedad a las nueve muestras tomadas en las tres fuentes de los cuáles se obtuvo resultados de 4,78% a 5,2%. Esto indica que al momento de la toma de muestras el suelo se encontraba en estado relativamente seco y con observaciones de campo en estado friable.

Lavado sobre tamiz N°200

Los resultados obtenidos del ensayo de lavado sobre tamiz N° 200 mostraron que, entre

el 96,77% y 97,53% del suelo de estudio, sus partículas son más finas que el tamaño de abertura del tamiz #200 (0.075 mm). Esto sugiere que el suelo está compuesto principalmente por partículas finas como limos y arcillas, y que tiene muy poca o ninguna cantidad de partículas más grandes como arenas o gravas, con implicaciones en su cohesión, plasticidad, compresibilidad y permeabilidad, que pueden afectar su comportamiento en diversas aplicaciones.

Ensayo de expansión libre en probeta

Los ensayos expansión libre revelaron que los suelos analizados se encuentran en categoría de expansión alta a muy alta, de acuerdo con la tabla H 9.1-1 del título H de la norma sismo resistente (NSR -10). Al aplicar el tratamiento con 25% de pumita en las nueve submuestras evaluadas, se evidenció una reducción del 47% en el índice de expansión libre. Como resultado, la clasificación del suelo mejoró, pasando de la categoría muy alta a media, lo cual representa un avance significativo en términos de comportamiento geotécnico y riesgo de deformaciones diferenciales. Estos resultados confirman la efectividad de la pumita como agente estabilizante en suelos expansivos, al reducir tanto el potencial de hinchamiento medido por el cambio de potencial volumétrico como la expansión libre, aportando estabilidad volumétrica.

Cambio de potencial volumétrico

Los resultados evidenciaron que los suelos de las zonas estudiadas presentan índices de expansión clasificados alta y muy alta, lo cual representa un riesgo considerable para la estabilidad de las estructuras. Al aplicar la mezcla con 25% de pumita, se observó una reducción significativa en el comportamiento expansivo.

El cambio de potencial volumétrico es un parámetro fundamental para estimar la magnitud del hinchamiento que puede experimentar un suelo arcilloso al entrar en contacto con el agua, y, por tanto, su capacidad potencial para generar deformaciones volumétricas perjudiciales en estructuras superficiales. Los resultados reflejan una reducción significativa del cambio del potencial volumétrico, que pasa de un valor inicial de 6,5 en el suelo natural (clasificado como muy crítico) a un valor de 4,5 en la muestra tratada con pumita (clasificado como marginal-crítico). Esta disminución del 30 % en el valor del cambio de potencial volumétrico representa una mejora importante en la estabilidad volumétrica del suelo.

El comportamiento observado puede explicarse por la interacción química y física de la pumita con los minerales arcillosos expansivos. La pumita, al ser un material de origen volcánico con alto contenido de sílice y estructuras amorfas de baja densidad, promueve reacciones puzolánicas que modifican la disposición de las partículas arcillosas. Además, su incorporación reduce la plasticidad y a su vez también la capacidad de absorción de agua del sistema suelo-mezcla, lo que se traduce en un menor grado de expansión

al hidratarse. Desde el punto de vista de la ingeniería geotécnica, esta estabilización tiene implicaciones prácticas relevantes, ya que sugiere que la adición de un 25 % de pumita es efectiva para reducir el riesgo de deformaciones volumétricas excesivas, que pueden afectar la funcionalidad y durabilidad de las cimentaciones, los pavimentos y otras estructuras construidas sobre este tipo de suelos.

Composición química del suelo natural, pumita y la mezcla suelo-pumita 25%

El análisis comparativo evidencia un aumento significativo en el contenido de sílice (SiO_2) en la mezcla estabilizada con respecto al suelo natural. Lo cual se atribuye a la naturaleza silíceas de la pumita. Esta modificación en la composición mineralógica sugiere el desarrollo de reacciones puzolánicas que podrían favorecer el desarrollo y formación de productos cementantes, como lo son silicatos y aluminatos de calcio, responsables de la mejora de las propiedades mecánicas del suelo tratado. Asimismo, se observa una disminución en el contenido de alúmina (Al_2O_3), lo cual puede estar relacionado con el efecto de dilución generado por la adición de pumita. En cuanto a los óxidos metálicos, se reporta una reducción al 5% en los contenidos de el hierro (Fe), magnesio (Mg), manganeso (Mn) y azufre (S). Por el contrario, se registra un aumento proporcional en los contenidos de en calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y bario (Ba), elementos que podrían favorecer la estabilidad química del sistema suelo-mezcla. También se identificó una disminución de hasta un 12 % en dióxido de titanio (TiO_2) y Fosfopentóxido (P_2O_5), lo que sugiere una menor presencia de fases minerales accesorias con capacidad reactiva baja. La figura 2 muestra la composición química del suelo natural, la pumita y la mezcla de 75% de suelo arcilloso y 25% de pumita. Se identifican los porcentajes de los óxidos presentes en la muestra de suelo natural, pumita y mezcla suelo (75%) pumita (25%).

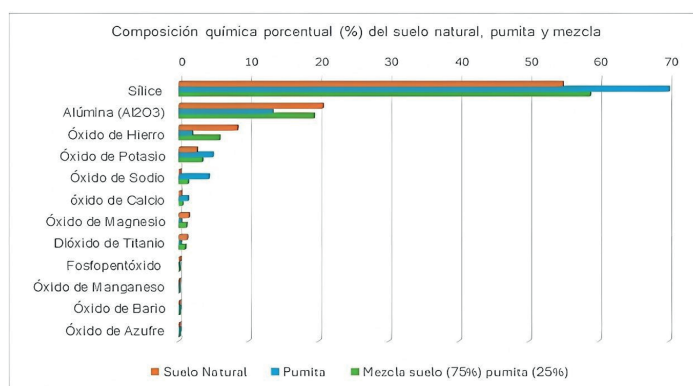


Figura 2. Composición química porcentual (%).

Difracción de rayos x (DRX) para suelo natural y mezcla suelo-pumita (25%).

En el suelo natural se encontraron los siguientes minerales con sus respectivas proporciones: cuarzo (43,68%), caolinita (12,26%), moscovita (22,94%), halloysita (14,46%), vermiculita (2,65%) y anatasa (3,01%). Esta composición refleja la presencia

de minerales típicos de suelos altamente plásticos, con elevado potencial expansivo, como la halloysita y la vermiculita. Al ser tratado con pumita, se observaron cambios en la proporción relativa de algunos minerales. En la mezcla tratada, los minerales presentes fueron: cuarzo (40,22%), caolinita (14,26%), moscovita (21,53%), halloysita (14,55%), vermiculita (< 1%) y anatasa (3,81%). Destaca la reducción de la vermiculita, mineral altamente expansivo, a valores inferiores al 1 %, lo cual representa una mejora mineralógica relevante desde el punto de vista geotécnico.

Además, el contenido de cuarzo disminuyó ligeramente, mientras que la caolinita aumentó en aproximadamente 2 %, lo cual puede atribuirse a la influencia de la pumita sobre la organización cristalina del suelo. Las Figuras 3 y 4 ilustran los difractogramas obtenidos, donde los picos principales corresponden a la presencia de cuarzo en el suelo natural (figura 3) y su reducción tras el tratamiento con pumita (figura 4). Estos resultados confirman que la adición de pumita genera una reconfiguración mineralógica que favorece la estabilización del suelo, mediante la disminución de fases expansivas y el incremento de minerales de menor reactividad, como la caolinita.

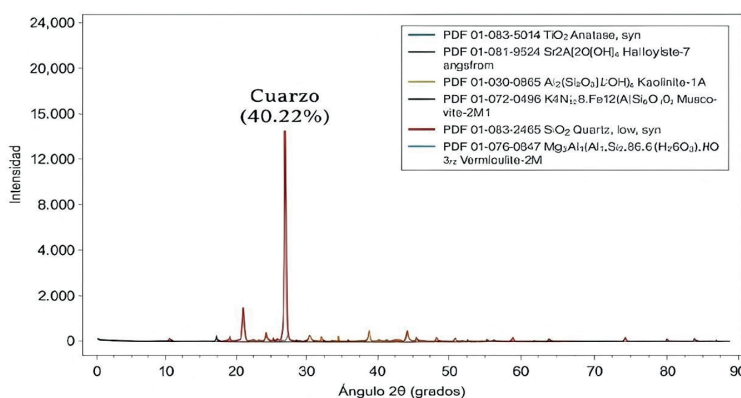


Figura 3. Difractograma de rayos x del suelo natural expansivo. se identifican fases cristalinas predominantes como cuarzo (43,68 %), moscovita, caolinita, halloysita, vermiculita y anatasa. El pico principal corresponde a la presencia significativa de cuarzo, indicativa de la alta proporción de minerales no plásticos en el suelo sin tratar.

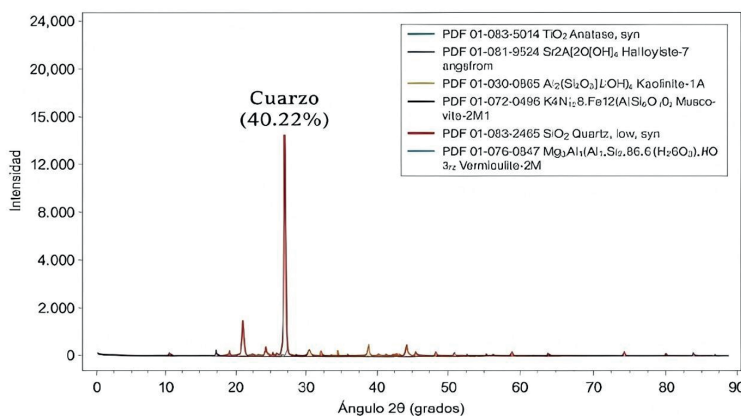


Figura 4. Difractograma de rayos x de la mezcla estabilizada con 25 % de pumita. Se observa una ligera disminución en la intensidad del pico de cuarzo (40,22 %) y un aumento en la proporción de caolinita (14,26 %), junto con la reducción marcada de vermiculita (< 1 %), lo que evidencia un cambio en la estructura mineralógica hacia una configuración más estable y menos expansiva.

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

El ensayo de microscopía electrónica de barrido, permitió observar la morfología superficial tanto del suelo arcilloso natural como de la pumita triturada, así como su interacción en la mezcla estabilizada con 25 % de aditivo. En las micrografías correspondiente al suelo natural, se identificaron estructuras típicas de partículas de arcilla con superficies lisas, disposición laminar y bordes pocos definidos, lo cual es característico de suelos con alta plasticidad y capacidad de expansión.

Por su parte, las imágenes de la pumita triturada como se muestra en la figura 5, revelaron partículas con formas angulares e irregulares, compuestas por diaclasas, bordes filosos y estructuras laminares con extremos puntiagudos, que incrementan la reactividad física del material. Esta morfología facilita la adherencia entre las partículas de pumita y los granos de arcilla al ser incorporadas a la mezcla.

En La figura 6, correspondiente a imagen de la mezcla de 75% suelo expansivo con 25% pumita, muestra las partículas de pumita adherirse fuertemente a las superficies de arcilla, formando agregados granulares compactos. Estos agregados que llenan los espacios vacíos reducen la porosidad del sistema suelo-mezcla y generan una especie de campo de restricción físico, que limita la capacidad de expansión de la arcilla al absorber agua. Este efecto contribuye directamente a mejorar la resistencia del suelo y a disminuir su susceptibilidad frente a variaciones de humedad.

En conjunto, los resultados del análisis de microscopia respaldan los datos obtenidos en los ensayos físicos y mecánicos, demostrando que la pumita no solo actúa como material de relleno, sino que también desempeña un rol activo en la modificación de la microestructura del suelo, favoreciendo la estabilización del sistema.

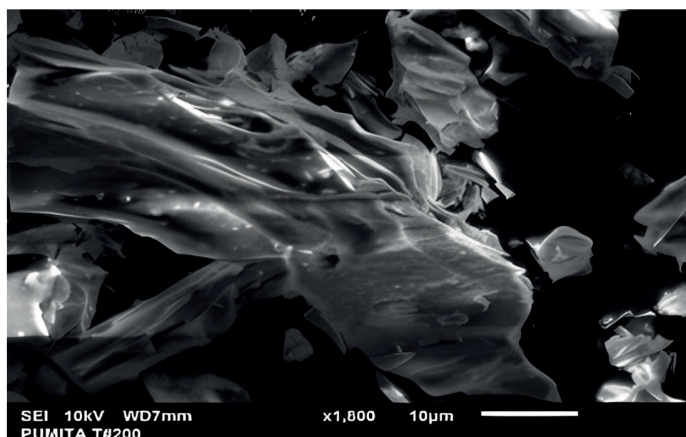


Figura 5. Micrografía obtenida por microscopía electrónica de barrido de la pumita triturada utilizada como material estabilizante. Se observan partículas con morfología angular, bordes irregulares, diaclasas y estructuras laminares con extremos puntiagudos, características que favorecen su adherencia a las partículas de arcilla y su capacidad para modificar la estructura del suelo.

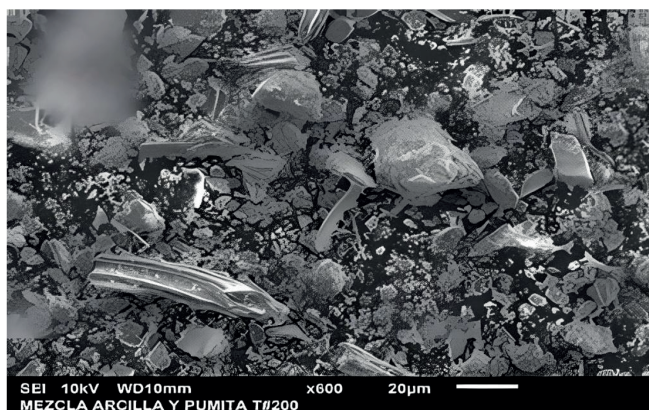


Figura 6. Micrografía de la mezcla suelo arcilloso (75 %) con pumita triturada (25 %). Se evidencia la formación de agregados entre partículas de pumita y granos de arcilla, los cuales rellenan vacíos y generan un campo físico de restricción que limita la expansión del suelo frente a la absorción de agua, mejorando así su estabilidad volumétrica y resistencia estructural.

Espectroscopía de energía dispersiva

El análisis de espectroscopía de energía dispersiva, realizado mediante un MEB, permitió identificar de manera secuencial cualitativa y semicuantitativa las partes químicas ligadas al suelo natural, la pumita triturada y la mezcla suelo-pumita. En el suelo arcilloso natural, el mapeo elemental evidenció principalmente la presencia de aluminio (Al), silicio (Si), calcio (Ca) y oxígeno (O), ver figura 7. Estos elementos son representativos de minerales típicos de arcillas como la caolinita, moscovita y halloysita, y explican el comportamiento expansivo del suelo debido a su capacidad de interacción con el agua.

En la pumita triturada, según figura 8, el análisis mostró mayor diversidad de elementos, incluyendo sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), aluminio (Al), silicio (Si), oxígeno (O), así como trazas de tántalo (Ta) y bromo (Br). Estos elementos confirman la naturaleza silíceo-alumínica del material volcánico, además de indicar la presencia de otros componentes minoritarios que podrían influir en reacciones químicas de estabilización.

En la mezcla suelo + 25 % pumita (Figura 9), el espectro dispersivo reveló una combinación de los elementos encontrados en ambas muestras individuales, con presencia de sodio (Na), magnesio (Mg), potasio (K), tántalo (Ta), bromo (Br), aluminio (Al), silicio (Si), carbono (C) y oxígeno (O). Esta composición refleja una integración efectiva de la pumita con el suelo arcilloso, y sugiere la posible formación de nuevas fases minerales o productos de reacción puzolánica que podrían estar asociadas con la mejora del comportamiento físico-mecánico del suelo.

La detección de elementos como el sodio, potasio y calcio, que actúan como cationes intercambiables, refuerza la hipótesis de que se generan reacciones de estabilización química entre la matriz arcillosa y la pumita. Estas reacciones contribuyen al incremento de la estabilidad volumétrica y mecánica del suelo tratado. En conjunto, los resultados del análisis de dispersión respaldan los hallazgos obtenidos por difracción de rayos x y microscopía, aportando evidencia composicional que valida la interacción efectiva entre

la pumita y los minerales del suelo. No obstante, se recomienda profundizar en estudios futuros para identificar la formación de fases específicas y cuantificar su impacto en las propiedades geotécnicas del material estabilizado. La literatura actual indica que el uso de aditivos minerales como la pumita tiene un alto potencial en la estabilización de suelos expansivos, abriendo nuevas líneas de investigación con enfoques sostenibles y eficientes [23][24][25].

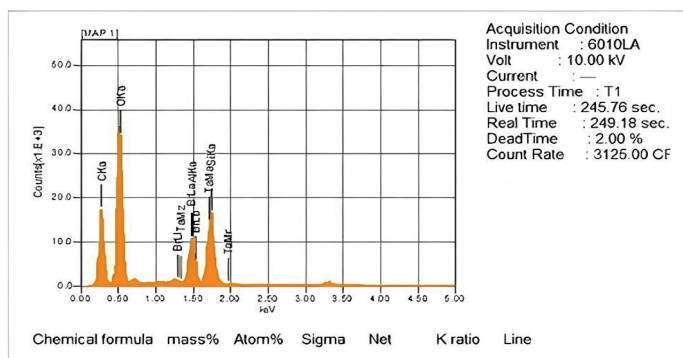


Figura 7. Espectro EDS del suelo arcilloso natural. Se identifican principalmente los elementos aluminio (Al), silicio (Si), calcio (Ca), oxígeno (O) y carbono (C), característicos de minerales arcillosos como caolinita, moscovita y halloysita, asociados al comportamiento expansivo del suelo.

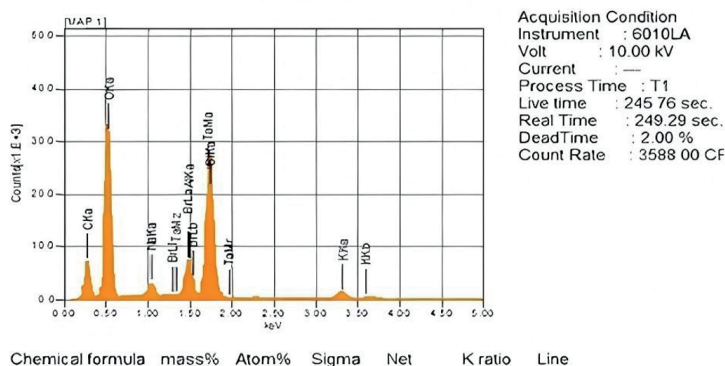


Figura 8. Espectro EDS de la pumita triturada utilizada como estabilizante. Se evidencian los elementos sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), silicio (Si), aluminio (Al), oxígeno (O), así como trazas de tántalo (Ta) y bromo (Br), que reflejan la composición sílice-alumínica y la complejidad mineralógica del material volcánico.

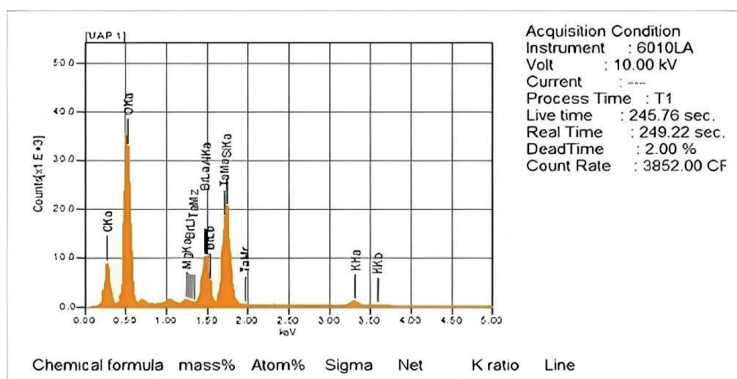


Figura 9. Espectro EDS de la mezcla suelo arcilloso (75 %) con pumita (25 %). El mapeo elemental muestra la combinación de elementos provenientes de ambas fases: sodio (Na), magnesio (Mg), potasio (K), tántalo (Ta), bromo (Br), aluminio (Al), silicio (Si), carbono (C) y oxígeno (O), lo cual evidencia la interacción química entre los componentes y sugiere la formación de nuevas fases estabilizadoras.

Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que la pumita triturada tiene un efecto favorable sobre las propiedades geotécnicas del suelo expansivo analizado. La dosificación correspondiente al 25 % de adición mostró el mejor comportamiento, logrando disminuir la plasticidad y el potencial expansivo del material lo que refleja una disminución en la susceptibilidad del suelo a deformaciones plásticas. La capacidad de potencial volumétrico descendió de un estado muy crítico a marginal, lo que indica una mejora sustancial en la estabilidad volumétrica del suelo tratado. La expansión libre en probeta se redujo en más del 45%, permitiendo reclasificar el suelo desde una categoría de expansión muy alta a media según los criterios establecidos en la NSR-10.

Las imágenes micrográficas resultado del ensayo MEB, evidencian una disminución de la porosidad y la formación de agregados compactos entre partículas de arcilla y pumita. Esta estructura sugiere la posible formación de productos cementantes de naturaleza puzolánica que contribuyen al refuerzo de la matriz del suelo y a su resistencia frente a cambios de humedad.

Desde una perspectiva aplicada, la utilización de pumita como estabilizante representa una alternativa técnica viable y ambientalmente favorable para el tratamiento de suelos arcillosos expansivos. Su empleo podría contribuir al mejoramiento del desempeño de obras civiles construidas sobre este tipo de materiales, así como una mejora en su comportamiento mecánico al reducirse la compresibilidad, la plasticidad y la expansión. Finalmente, se ha podido demostrar que la pumita ofrece una estabilización efectiva para este tipo de suelo expansivo al reducir la plasticidad, el intercambio catiónico entre los minerales del mismo y el aumento de la resistencia mecánica con tan solo un ¼ del peso del suelo tratado, aumentando así los diferentes beneficios que tiene este material en la ingeniería.

Agradecimientos

Los autores Agradecemos a la Doctora Sandra Ortega Sierra, rectora de la Universidad Francisco de Paula Santander por el apoyo en el financiamiento de los laboratorios de difracción de rayos x y microcopia electrónica de barrido y agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión UFPS por su gestión.

Agradecemos al Laboratorio de Análisis de Materiales Para la Construcción LABMAC del SENA Centro de La Industria La Empresa y los Servicios de Cúcuta por el apoyo en el acompañamiento y transferencia de conocimiento de los ensayos de laboratorio para caracterización física y expansiva del suelo.

Referencias

- [1] J. E. Bowles, "Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil", Ciudad de México, México: McGraw-Hill, 1981. [En línea]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/517395227/Manual-de-laboratorio-de-suelos-en-ingenieria-civil-J-Bowles>. [Accedido: feb. 08, 2026].
- [2] B. Dharmendra and S. K. Dash, "Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 1319–1342, 2022, doi: 10.1016/j.jrmge.2022.02.011.
- [3] C. Flórez, Z. Caicedo, R. Zárate, and B. Contreras, "Estabilización química de suelos expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes," *Respuestas*, vol. 13, no. 2, pp. 19–31, 2016, doi: 10.22463/0122820X.536.
- [4] M. Ramírez, "Estabilización de suelos blandos con adición de valvas de conchas de abanico en la subrasante de la Av. Carapongo – Lurigancho – Chosica, 2020," Undergraduate thesis, Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/69711>. [Accedido: feb. 08, 2026].
- [5] A. Calderón Correa and J. Camargo Delgado, "Análisis del comportamiento geomecánico de mezclas de suelo arcilloso de la formación León con adición de partículas de vidrio de reciclaje," Undergraduate thesis, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/4552>. [Accedido: feb. 08, 2026].
- [6] J. E. Chicchi Callamullo, "Estabilización de suelos arcillosos con cal y ceniza volante para el tratamiento de la subrasante para tramo carretero Alegría – Barranca – Distrito 6 de la ciudad de Sucre," *Revista Técnica Ingenium**, Vol. 1 Núm. 3, Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre, Bolivia, 31-oct-2024. [En línea]. Disponible: <https://revistas.usfx.bo/index.php/ing/article/view/1510>. [Accedido: abr. 07, 2026].
- [7] F. E. Ríos Pérez, "Estabilización de suelos arcillosos utilizando cenizas de carbón con vidrio molido para uso como subrasante mejorada en pavimentos urbanos," Tesis de licenciatura, Fac. de Ingeniería, Univ. Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, Perú, 2025. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.usat.edu.pe/items/90af30ff-33f8-44ca-8054-8c63c5afb0f9/full>. [Accedido: feb. 07, 2026].
- [8] I. M. Almonacid, "Estabilización de subrasante mediante cal y ceniza de quinua en suelos del centro poblado Viñas, Tayacaja, Huancavelica," Undergraduate thesis, Univ. Peruana Los Andes, Huancayo, Perú, 2019. Disponible en: I. M. Almonacid, "Estabilización de subrasante mediante cal y ceniza de quinua en suelos del centro poblado Viñas, Tayacaja, Huancavelica," Undergraduate thesis, Univ. Peruana

- Los Andes, Huancayo, Perú, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12848/1916>. [Accedido: ene. 17, 2026].
- [9] D. Quispe Vilca, "Estabilización de suelos expansivos con ceniza de mazorca de maíz en la ciudad del Cusco," *Ambiente, Comportamiento y Sociedad*, vol. 4, no. 2, pp. 75–86, 2022, doi: 10.51343/racs.v4i2.808.
- [10] T. Rukenya, J. Wambua, C. Kabubo, and G. Thiong'o, "Soil stabilization using rice husk ash and natural lime as an alternative to cutting and filling in road construction," *J. Constr. Eng. Manage.*, vol. 143, no. 5, p. 04016127, 2017, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001235.
- [11] Á. Becerra Ortiz and Y. Martínez Omaña, "Estabilización de arcilla con silicato de sodio (Na_2SiO_3) usando mezclas en peso y volumen en la ciudadela Juan Atalaya, urbanización Cormoranes de San José de Cúcuta," Undergraduate thesis, Univ. Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/2836>. [Accedido: abr. 07, 2026].
- [12] C. Flórez, A. Garzón, and R. Molina, "Testing stabilization of high-plasticity clays used in sloping terrain by adding sodium silicate," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1587, no. 1, p. 012036, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1587/1/012036.
- [13] A. Olaya, "Aplicación de agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías," Specialization thesis, Univ. Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/20215>. [Accedido: ene. 27, 2026]
- [14] T. López Lara, J. B. Hernández Zaragoza, J. Horta Rangel, A. Coronado Márquez, y V. M. Castaño Meneses, "Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas," *Rev. Iberoamericana Polym.*, vol. 11, no. 3, pp. 159-168, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/07/2010-lopez.pdf>. [Accedido: ene. 27, 2026].
- [15] M. Yanqui, "Efecto de la adición de polímero bicomponente, en las propiedades físicas y mecánicas de arcillas expansivas del sector de Ccapac Modo – Cusco, 2021," Tesis de pregrado, Univ. Continental, Arequipa, Perú, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/10521>. [Accedido: abr. 04, 2026].
- [16] J. Camacho Tauta, Ó. J. Reyes Ortiz, y C. Mayorga Antolínez, "Curado natural y acelerado de una arcilla estabilizada con aceite sulfonado," **Ingeniería y Desarrollo**, vol. 24, no. 24, pp. 94-105, jun. 2024. [En línea]. 2011. Disponible en: <https://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/1680>. [Accedido: ene. 11, 2026].
- [17] J. Patrone y J. Prefumo, *La Acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones*.

Métodos de Prevención y Control. Montevideo, Uruguay: Facultad de Ingeniería, Univ. de Montevideo, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/244>. [Accedido: ene. 11, 2026].

- [18] S. Merchán, "Comportamiento de suelos expansivos em cimentaciones superficiales," Tesis de pregrado, Univ. de los Andes, Bogotá, Colombia, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/1992/11460>. [Accedido: abr. 07, 2026].
- [19] L. Quintero y R. Gallardo, "Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización," *Rev. Ingenio*, vol. 8, no. 1, pp. 83–92, 2016, doi: 10.22463/2011642X.2050.
- [20] "Hundimiento puso en emergencia 15 viviendas en Cúcuta, norte de Santander," *El Espectador*, Apr. 04, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.elespectador.com/colombia/mas-regiones/hundimiento-puso-en-emergencia-15-viviendas-en-cucuta-norte-de-santander/>. [Accedido: Ago. 07, 2024].
- [21] Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), "INV E 120 -13. Determinación del potencial de cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de Lambe", *Normas y Especificaciones INVÍAS*, 2013. [En línea]. Disponible: www.invias.gov.co. [Accedido: ene. 02, 2026].
- [22] Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), "INV E 132 -13. Determinación de suelos expansivos", *Normas y Especificaciones INVÍAS*, 2013. [En línea]. Disponible: www.invias.gov.co. [Accedido: ene. 02, 2026].
- [23] U. Zada et al., "Recent advances in expansive soil stabilization using admixtures: current challenges and opportunities," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, p. e01985, 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e01985.
- [24] R. Thirumalai, S. S. Babu, V. Naveennayak, R. Nirmal y G. Lokesh, "A Review on Stabilization of Expansive Soil Using Industrial Solid Wastes", *Engineering*, vol. 09, n.º 12, pp. 1008–1017, 2017, doi: 10.4236/eng.2017.912060.
- [25] J. Ordoñez, "Estabilización de arcillas expansivas con geomateriales de la región," *Rev. Pakbal*, vol. 1, no. 44, pp. 24–33, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.ingenieria.unach.mx/images/Articulos_revista/revistapakbal_44_pag24-33.pdf. [Accedido: abr. 07, 2026].