

Artículo de Investigación

Mejoramiento de suelos mediante sustitución química: Estudio de caso de la autopista Azogues - El Descanso (Ecuador)

Soil improvement through chemical substitution: A case study of the Azogues - El Descanso motorway (Ecuador)

Ana Paulina Ortiz Viñán¹: Universidad Técnica Particular de Loja San Cayetano, Ecuador.
aportiz1@utpl.edu.ec

Juan Carlos Guanín Vásquez: Universidad Técnica Particular de Loja San Cayetano, Ecuador.
jcguanin@utpl.edu.ec

Fecha de Recepción: 25/05/2024

Fecha de Aceptación: 08/11/2024

Fecha de Publicación: 05/02/2025

Cómo citar el artículo:

Ortiz, A. P. y Guanín J. C. (2025). Mejoramiento de suelos mediante sustitución química: Estudio de caso de la autopista Azogues - El Descanso (Ecuador) [Soil improvement through chemical substitution: A case study of the Azogues - El Descanso motorway (Ecuador)]. *European Public & Social Innovation Review*, 10, 01-19.
<https://doi.org/10.31637/epsir-2025-1233>

Resumen:

Introducción: Las arcillas expansivas sufren cambios de volumen debido a variaciones en su humedad adquirida por capilaridad y/o por infiltración. Algunas edificaciones cimentadas sobre estratos tipo arcilloso expansivo, experimentan constantes cambios volumétricos.

Metodología: Se aplica un método de estabilización química a las muestras de suelo alteradas

¹ **Autor Correspondiente:** Ana Paulina Ortiz Viñán. Universidad Técnica Particular de Loja San Cayetano, (Ecuador).

e inalteradas obtenidas en el sector de la Autopista Azogues- El Descanso, mediante la sustitución del suelo por diversos porcentajes de hidróxido de cal obtenidos del ábaco propuesto por Charles McDowell, en función del índice plástico y porcentaje de suelo pasante del tamiz Nro. 40 por vía húmeda. **Resultados:** Los resultados de ensayos aplicados al suelo natural lo clasifican como arcillas inorgánicas de alta plasticidad, expansivas tipo CH, al que se adicionó 3% de hidróxido de cal obtenido del ábaco de Charles McDowell; este suelo modificado experimentó transformaciones físicas y químicas definidas de la caracterización, pasando a clasificarse como suelo tipo limoso orgánico ML. **Discusión:** El porcentaje de hidróxido de cal añadido al suelo provoca reducción de la plasticidad y mejora su comportamiento, debido a los nuevos silicatos y aluminatos de calcio generados por la sustitución. **Conclusiones:** El suelo estabilizado con 3% hidróxido de cal, se caracteriza por el incremento de resistencia al corte y resistencia a la compresión.

Palabras clave: cambios volumétricos; hidróxido de calcio; ábaco C. McDowell; compresión; corte directo; estabilización; resistencia del suelo; suelos expansivos.

Abstract

Introduction: Expansive clays undergo volume changes due to variations in their moisture acquired by capillarity and/or infiltration. Some buildings founded on expansive clay strata experience constant volumetric changes. **Methodology:** A method of chemical stabilization is applied to altered and unaltered soil samples obtained in the sector of the Autopista Azogues-El Descanso, by replacing the soil with various percentages of lime hydroxide obtained from the abacus proposed by Charles McDowell, based on the plasticity index and the percentage of soil passing through sieve No. 40 by wet method. **Results:** The results of tests applied to the natural soil classify it as inorganic clays of high plasticity, expansive type CH, to which 3% of lime hydroxide obtained from Charles McDowell's abacus was added; this modified soil underwent defined physical and chemical transformations of the characterization, being reclassified as organic loamy soil type ML. **Discussion:** The percentage of lime hydroxide added to the soil causes a reduction in plasticity and improves its behavior, due to the new silicates and calcium aluminates generated by the substitution. **Conclusions:** The soil stabilized with 3% lime hydroxide is characterized by an increase in shear strength and compressive resistance.

Keywords: volumetric changes; calcium hydroxide; C. McDowell abacus; compression; direct cut; stabilization; soil resistance; expansive soils.

1. Introducción

La presencia de arcillas y limos como material soportante, suele relacionarse con problemas de deformación de obras civiles construidas (López-Lara *et al.*, 2010). Así, las arcillas expansivas sufren cambios de volumen debido a las variaciones en su humedad, que se produce ya sea por capilaridad o por infiltración (Lin y Cerato, 2012). En consecuencia, cualquier construcción asentada sobre este tipo de suelos experimenta deformaciones causadas por la expansión de la arcilla (Gómez-Pérez *et al.*, 2016).

Los suelos de grano fino como arcillas y/o limos pueden mejorar sus características de resistencia ante la aplicación de cargas mediante la alteración de sus propiedades como resultado de la aplicación de procesos de estabilización de suelos (Stavridakis, 2006). A decir de Ospina-García *et al.* (2020), las subrasantes suelen estar constituidas por suelos en su estado natural (sin ninguna mejora), o por suelo con algún tipo de adición para su mejoramiento, tales como: la estabilización mecánica o la estabilización físico-química con aditivos.

Cabe señalar que la estabilización es una técnica introducida hace muchos años con el objetivo de mejorar las características físicas y químicas de los suelos y hacerlos capaces de cumplir con los requisitos de resistencia necesarios en proyectos de ingeniería específicos (Kolias *et al.*, 2005). En este sentido, constituye un proceso importante en la ingeniería civil y geotécnica que permite mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos que tienen partículas de pequeño tamaño, como arcillas (Pandey y Rabbani, 2017).

Los estudios reportados muestran que, para la estabilización de suelos finos, se plantea la adición de sustancias que pueden modificar las características del suelo (Kiran *et al.*, 2018). Por ello, entre los métodos de estabilización se tiene la adición de hidróxido de cal al suelo arcilloso con lo que inmediatamente sus partículas pierden poder de cohesión transformando al suelo plástico en un material más granular (Rivera *et al.*, 2020). A partir de la citada adición de hidróxido de cal, el suelo cambia sus características como el contenido óptimo de humedad, resistencia, así como variación del índice de plasticidad y la densidad seca máxima (Guney *et al.* 2007). Con el diseño y las técnicas de construcción apropiadas, el tratamiento con hidróxido de calcio transforma químicamente los suelos susceptibles en materiales utilizables. Además, el soporte estructural de los suelos estabilizados con este aditivo puede ser aprovechado en el diseño de pavimentos (Higuera Sandoval *et al.*, 2012).

En la actualidad, en las obras viales de Ecuador no se aplican estas técnicas de mejoramiento, lo cual puede deberse a que existen pocas investigaciones que respalden la eficiencia de estos procesos de estabilización mediante el mejoramiento de propiedades. Es por ello que resulta interesante analizar los cambios volumétricos que presentan los suelos del sector de la Autopista Azogues – El Descanso, los mismos que experimentan variaciones y fallas de soporte. Ante esta problemática, se propuso como objetivo analizar las características del suelo natural de este sector mediante la adición de un determinado porcentaje de hidróxido de cal obtenido del ábaco propuesto por Charles Mc Dowell, con la finalidad de proponer un método de estabilización química efectivo y sencillo.

Con el estudio se propone además garantizar la estabilidad del suelo cohesivo, mediante la aplicación de un método ecológicamente favorable en comparación con otros métodos de estabilización, lo que se enmarca al Objetivo de Desarrollo Sostenible 12, cuya finalidad es implementar políticas que apoyen un cambio hacia prácticas sostenibles y desvinculen el crecimiento económico del uso de los recursos (Naciones Unidas, 2015).

A continuación, se realiza una breve descripción de algunas generalidades del proyecto como ubicación, clima y formación geológica del sector analizado.

1.1. Ubicación y acceso

El área de estudio se ubica en Ecuador, entre las provincias de Azuay y Cañar, a lo largo de la Autopista denominada Azogues – El Descanso que une las provincias de Azuay y Cañar, sentido norte-sur. Esta autopista conecta a centros poblados importantes de los cantones Azogues de la provincia Cañar y Cuenca de la Provincia de Azuay.

Los sectores que presentan cambios volumétricos se ubican en los puntos en los que se realizaron los sondeos, que se muestran en la tabla 1 y figura 1.

Tabla 1.

Coordenadas ubicación sondeos

Sondeo	Coordenadas	
	Norte	Este
1	9691955,43	736817,50
2	9690187,00	736133,00

Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 1.

Sondeos de Campo



Fuente: Google Earth (2021).

1.2. Clima y vegetación

El clima de la zona varía: en las partes más altas predominan los climas fríos y húmedos, y en las partes bajas los climas frescos en donde la temperatura promedio es de 13,45 °C (Verdezoto Villacis, 2006).

La vegetación encontrada en la zona es muy diversa debido a las diferentes altitudes de la zona y a los tipos de suelos encontrados en ella. En las partes más altas se tienen pajonales y bosques naturales; bajo el páramo se encuentran bosques andinos o matorrales con presencia de especies tipo arbustos como el sarar, marar, guabisay y romerillo; y en las partes bajas la vegetación predominante consta de árboles como eucalipto, ciprés o pino (Verdezoto Villacis, 2006).

1.3. Geología zonal

Respecto a la geología, la superficie de estudio está ubicada entre la Cordillera Real, zona Subandina, y un fragmento de la Cordillera Occidental, en donde sus alturas varían entre los 1600 a 3900 metros sobre el nivel del mar. Se caracteriza por tener una morfología variada debido a la presencia de depresiones, mesetas y elevados macizos (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 2017).

Los relieves montañosos de la parte oriental presentan pendientes fuertes y altas que oscilan entre los 2000 a 3900 metros sobre el nivel del mar, mientras que en el centro occidente del área se tienen relieves ondulados con pendientes suaves, los cuales se formaron por el basamento metamórfico de la Cordillera Real y rocas volcánicas (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 2017).

El oeste de la zona tiene alrededor de 15 kilómetros de ancho y 33 kilómetros de largo, en donde las alturas van desde los 2200 a los 3000 metros sobre el nivel del mar. Aquí el relieve está conformado de colinas disecadas, relieves escalonados y valles encañonados debido a la socavación que producen los ríos Cañar y Paute. Además, la cuenca tiene sedimentos de origen fluvial, lacustre y volcano-sedimentario (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 2017).

1.4. Formación geológica

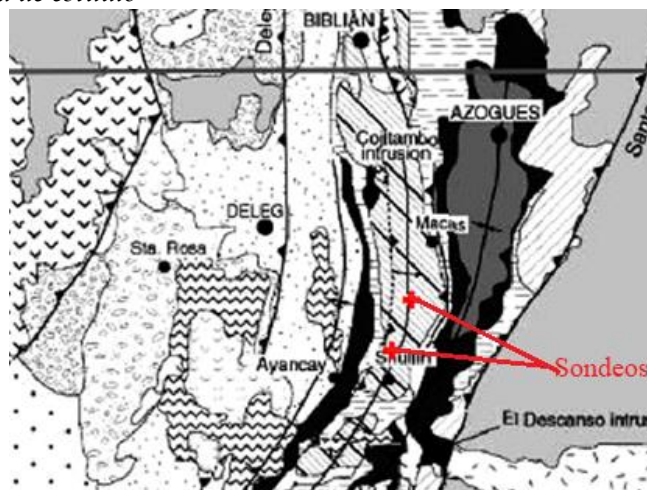
A continuación, se describe cada una de las formaciones geológicas que conforman la cuenca intramontañosa, lugar donde se ubica el sector de análisis. Según Núñez del Arco Andrade (2003), la zona de estudio se localiza sobre la formación Biblián, Guapán y Mangán:

1.4.1. Descripción Formación Biblián

Esta formación geológica es la más antigua de la provincia del Azuay, tiene una extensión que va desde el Norte Biblián hasta el Valle al Sur Este del cantón Cuenca; se extiende desde el sector Jadán hasta Quingeo y al sur hasta llegar al poblado de Santa Ana. El espesor de esta formación tiene aproximadamente 1000 metros, consta de conglomerados de color café y areniscas; generalmente el color característico púrpura caracterizado por la presencia de lutitas arenosas y limosas (Núñez del Arco Andrade, 2003). Ante estas características, en la Figura 2 se ubican los sondeos dentro de la formación geológica.

Figura 2.

Mapa Geológico del área de estudio



Fuente: (Hungerbühler *et al.*, 2001).

1.4.2. Formación Guapán

Esta formación en un principio fue confundida por la formación Loyola por su gran similitud, aflora en las regiones de Borrero, Azogues, Guapán, etc y ocurre en el sinclinal de Azogues y en otros puntos al oeste de Cojitambo y en el occidente anticlinal de Biblián. Se caracteriza por

tener lutitas laminadas de color café oscuro a su negro cubiertas de polvo de limolita de color amarillo debido al proceso de meteorización por el cual atraviesan (Núñez del Arco Andrade, 2003).

1.4.3. Formación Mangán

Aflora con espesores de 100 a 1200 metros en los poblados de Ayancay y Deleg, está conformado por capas de lutitas y areniscas y en su parte superior posee conglomerados, adicional existen vetas de carbón, discordancia angularmente con la formación Azogues y también posee un contacto concordante con la formación Loyola (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 2017).

2. Metodología

A continuación se describe el tipo de investigación, obtención de muestras y el proceso metodológico aplicado.

2.1. Tipo de investigación

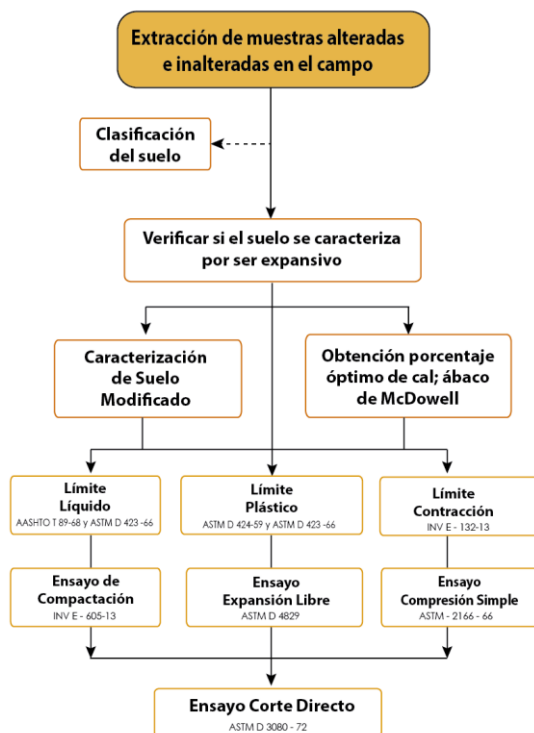
La investigación es de tipo exploratoria, debido a que se manipulan las variables independientes para medir el resultado que producen sobre la variable dependiente, así mismo se enmarca dentro del tipo experimental-cuantitativa-deductiva, porque se manejan variables dependientes e independientes. La variable independiente corresponde a los porcentajes de hidróxido de cal o agente estabilizante, este porcentaje se añade al suelo en función de su peso seco, de modo que se obtienen distintos resultados que permiten identificar el mejoramiento en la expansibilidad del suelo.

La recolección de muestras se realizó en campo en el sector de la Autopista Azogues - El Descanso, por medio de dos sondeos a cielo abierto cuyas coordenadas de ubicación se indican en tabla 1. Estas muestras fueron analizadas en el laboratorio, con el fin de determinar el porcentaje óptimo de hidróxido de calcio que se debe añadir al suelo para controlar el grado de expansibilidad.

A continuación, por medio de la figura 3, se resume el procedimiento aplicado en la investigación:

Figura 3.

Descripción del modelo metodológico



Fuente: Elaboración propia (2024).

2.2. Obtención de muestras

La obtención de muestras alteradas e inalteradas se realizó con la aplicación de equipos mecánicos, mediante dos excavaciones de calicatas a cielo abierto de 2,20 metros de profundidad, como se observa en la figura 4.

Figura 4.

Excavación de calicatas a cielo abierto



Fuente: Elaboración propia (2024).

El proceso para la extracción de muestras inalteradas se realizó cumpliendo normativa ASTM D420-18 (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2018a) e INEN 687 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, [INEN], 1982a). Se obtuvieron 2 bloques de 20 cm. cada arista, como se muestra en la figura 5.

Figura 5.

Obtención de Muestras Inalteradas



Fuente: Elaboración propia (2024).

La obtención de muestras alteradas se realizó conforme lo indica la norma AASHTO T86-70 (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2020) e INEN 686 (INEN, 1982b). Se obtuvo alrededor de 70 kilogramos de material en estado suelto, el proceso de extracción se indica en la figura 6.

Figura 6.

Obtención de muestras alteradas



Fuente: Elaboración propia (2024).

2.3. Caracterización de suelo natural

En laboratorio se aplicaron los siguientes ensayos de caracterización:

Análisis granulométrico según normas AASHTO T88-70 (AASHTO, 2020) y ASTM D422-63 (ASTM International, 2007), métodos SUCS y AASHTO.

- Límites de Atterberg según normas AASHTO T89 (AASHTO, 2013) y ASTM D423-66 (ASTM International, 1966), ASTM D424 (ASTM International, 1970). ASTM D4318-17e1 (ASTM International, 2018b).
- Compactación estándar, mediante norma ASTM D698-12 (ASTM International, 2021a).
- Corte directo, según norma ASTM D3080-11 (ASTM International, 2011).
- Compresión simple, según norma ASTM 2166-66 (ASTM International, 2000a).
- Ensayo Expansibilidad, aplicando norma ASTM D-4829 (ASTM International, 2021b).
- Ensayo Edométrico, mediante norma INV E-132-13 (INVIAS, 2013).

La clasificación de suelo se obtuvo aplicando procedimiento descrito en las normas AASHTO T88-70 (AASHTO, 2020a) y ASTM D422-63 (ASTM International, 2007), métodos SUCS y AASHTO.

2.4. Determinación de porcentaje de hidróxido de cal óptimo

Este cálculo dependió de resultados de los siguientes ensayos de laboratorio:

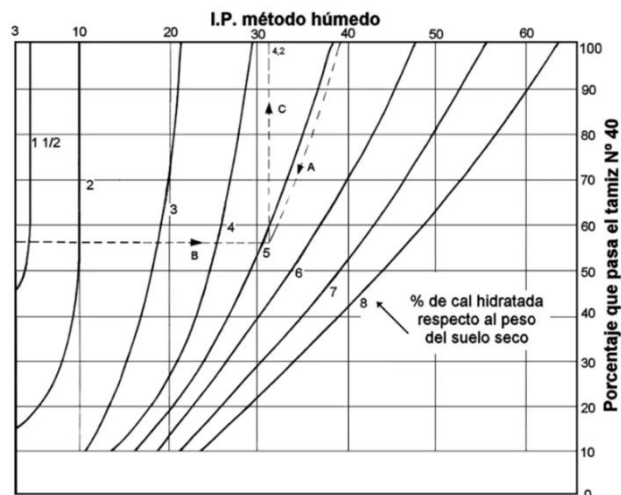
- Análisis granulométrico según normas AASHTO T88 (AASHTO, 2020) y ASTM D422-63 (ASTM International, 2007).
- Límites de Atterberg según normas AASHTO T89 (AASHTO, 2013) y ASTM D423-66 (ASTM International, 1966), ASTM D424 (ASTM International, 1970).

El ábaco propuesto por Charles McDowell (figura 7) muestra una escala logarítmica horizontal que representa el índice de plasticidad obtenido por método húmedo; numerada con los siguientes porcentajes: 3, 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 100. Así mismo, contiene una escala vertical que representa el porcentaje de suelo que pasa el tamiz No. 40, numerada: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100. Internamente contiene las curvas que representan el porcentaje de cal hidratada o hidróxido de calcio numeradas de la siguiente manera: $1\frac{1}{2}$, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

Para determinar el porcentaje óptimo en el ábaco propuesto por C. McDowell (figura 7), en primer lugar, se ubica en la escala horizontal el índice de plasticidad del suelo. Seguidamente, se ubica en la escala vertical el porcentaje de suelo que pasa el tamiz No. 40. Finalmente, se trazan paralelas de las lecturas horizontal y vertical hasta intersectar las curvas, con lo que se obtiene el porcentaje de cal hidratada o hidróxido de calcio que se requiere adicionar al suelo natural para la estabilización y mejora de sus propiedades (Higuera Sandoval *et al.*, 2012).

Figura 7.

Ábaco propuesto por C. McDowell



Fuente: Materiales tratados o estabilizados con cal (República de Honduras, 2007).

2.5. Caracterización de suelo que contiene hidróxido de cal

El suelo estabilizado con el porcentaje de cal, obtenido de ábaco propuesto por C. McDowell, se sometió a los siguientes ensayos de laboratorio:

- Compactación estándar, mediante norma ASTM D698-12 (ASTM International, 2021).
- Corte directo, según norma ASTM D3080-23 (ASTM International, 2023).
- Compresión simple, según norma ASTM 2166-66 (ASTM International, 1966).
- Ensayo Expansibilidad, aplicando norma ASTM D-4829 (ASTM International, 2021).
- Ensayo edométrico, mediante norma INV E-132-13 (INVIAS, 2013).

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de caracterización derivados del estudio de estabilización de la subrasante del caso de estudio:

3.1. Caracterización suelo natural

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en lo que respecta al contenido de humedad presente en las muestras de suelo natural.

Tabla 2.*Resultados de contenidos de humedad natural*

Material	Contenido humedad natural (%)
Sondeo 1	26,75
Sondeo 2	25,85

Fuente: Elaboración propia (2024).

Los resultados indican humedades naturales de 26,75% y 25,85% para el sondeo 1 y sondeo 2 respectivamente, lo cual revela que el suelo del área de estudio presenta similares características dentro de este parámetro.

En la tabla 3, por su parte, se muestran los resultados de análisis granulométricos obtenidos mediante el lavado de muestras aplicado al suelo de sondeo 1 y sondeo 2.

Tabla 3.*Análisis Granulométrico por Cribado – Sondeos*

Tamices	Sondeo 1 % Suelo Pasa	Sondeo 2 % Suelo Pasa
N° 4	100	100
N° 10	99,37	98,19
N° 40	96,63	95,05
N° 200	88,8	83,12

Fuente: Elaboración propia (2024).

Los resultados del ensayo aplicado a las muestras de suelo son similares, con lo que se evidencia que son suelos de grano fino y con granulometrías homogéneas.

A continuación, en las tablas 4 y 5 se muestran los resultados de los ensayos aplicados a las muestras del sondeo 1 y sondeo 2, correspondientes al suelo natural.

Tabla 4.*Resultados caracterización suelo natural*

Ensayo	Valor
Límite líquido (%)	53,92
Límite Plástico (%)	33,09
Índice de Plasticidad (%)	20,83
Límite de contracción (%)	17
Densidad seca máxima (Kg/m ³)	1568
Humedad óptima (%)	25
Ensayo de compresión simple, cohesión (Kg/cm ²)	0,155
Ensayo de corte directo, cohesión (Kg/cm ²)	0,2
Ensayo de corte directo, ángulo de fricción interna (°)	34
Expansión edométrica (%)	11
Expansión volumétrica (%)	10

Fuente: Elaboración propia (2024).

El índice de plasticidad en el suelo natural resulta ser 20,83%; al respecto y toda vez que en el proceso de estabilización se aplicará hidróxido de cal, en la investigación de Rivera *et al.* (2020) afirman que el hidróxido de cal actúa mejor en suelos finos con un contenido mínimo de arcilla del 10% e índice de plasticidad superior a 10%.

Tabla 5.

Resultado clasificación de suelos

Muestra	Clasificación	
	SUCS	AASHTO
Muestra 1	CH	A - 7 - 6
Muestra 2	CH	A - 7 - 6

Fuente: Elaboración propia (2024).

De los resultados obtenidos, se determina que el suelo analizado es de tipo arcilla inorgánica de alta plasticidad. A decir de Molina Villalobos (2023), las arcillas inorgánicas son suelos más problemáticos en cuanto se hace referencia a la cimentación de construcciones y estabilidad de taludes por sus diferentes características y propiedades de expansión volumétrica (Quintero-Lemus y Gallardo-Amaya, 2015).

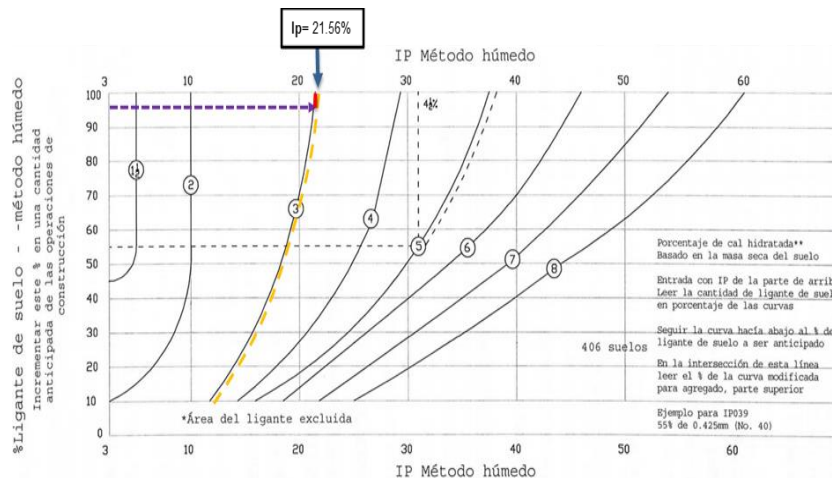
Al respecto, un suelo expansivo es un tipo de suelo arcilloso insaturado dentro del cual los huecos están parcialmente llenos de agua. Por lo tanto, incluso antes de que se produzca la expansión del suelo, el comportamiento se ve significativamente afectado por las fuerzas de tensión superficial (Lin y Cerato, 2012).

3.2. Determinación de contenido de hidróxido de calcio

Aplicando los resultados de caracterización del suelo natural y el ábaco propuesto por McDowell, se obtiene la recomendación de adición de 3% de hidróxido de cal, conforme se observa en la figura 8.

Figura 8

Porcentaje de adición de hidróxido de cal



Fuente: Materiales tratados o estabilizados con cal (República de Honduras, 2007).

3.3. Resultados caracterización suelo modificado

A continuación, en las tablas 6 y 7, se presenta un resumen de los resultados de los ensayos aplicados a la muestra de suelo modificado con el 3% de hidróxido de cal.

Tabla 6.

Resultados caracterización suelo modificado vs. suelo natural

Ensayo	Suelo + 3% hidróxido cal	Suelo natural
Límite líquido (%)	45,8	53,92
Límite Plástico (%)	31,98	33,09
Índice de Plasticidad (%)	13,82	20,83
Límite de contracción (%)	19	17
Densidad seca máxima (Kg/m ³)	1572	1568
Humedad óptima (%)	23	25
Ensayo de compresión simple, cohesión (Kg/cm ²)	2,02	0,155
Ensayo de corte directo, cohesión (Kg/cm ²)	0,64	0,2
Ensayo de corte directo, ángulo de fricción interna (°)	38	34
Expansión edométrica (%)	0	11
Expansión volumétrica (%)	27	10

Fuente: Elaboración propia (2024).

En investigaciones similares de estabilización, como la de Al-Mukhtar *et al.* (2012), después del tratamiento químico, el suelo tratado mejoró sus propiedades geotécnicas al reducir su plasticidad. En este caso, existe una reducción del 49% con lo que se reduce la posibilidad de hinchamiento e incrementa la resistencia, corroborando que inmediatamente al ser tratado el suelo con la cal pierde sus propiedades cohesivas y se transforma en un suelo granular con propiedades geotécnicas mejoradas.

Según Rivera *et al.* (2020), los cambios en la variación de resultados del suelo modificado en comparación con los resultados del suelo natural, se produce debido a que al mezclarse con hidróxido de cal se rompen partículas de arcilla, con lo que se libera sílice y alúmina que reaccionan con el calcio de la cal para formar silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) y aluminatos cálcicos hidratados (C-A-H) que son cementantes. Estos componentes hidratados forman una matriz con menor índice de plasticidad, la cual contribuye a la resistencia de las capas de suelo estabilizadas con cal y a su menor permeabilidad. Con ello, la capa de suelo se hace más fácil de trabajar y de compactar.

En este tipo de estabilización, puede considerarse el hidróxido de calcio como un activante alcalino apto para generar un suelo resistente, mecánica y químicamente, a partir de su acción con el suelo de carácter arcilloso.

Tabla 7.

Resultado clasificación de suelos

Muestra	Clasificación	
	SUCS	AASHTO
Suelo hidróxido de cal 3%	MH	A - 5

Fuente: Elaboración propia (2024).

El suelo modificado presenta características que lo definen como suelo limoso, de modo que existe una transformación respecto al suelo natural que pasa de suelo arcilloso a limoso.

4. Discusión

Según Bauza Castelló (2015), en la mezcla de la cal con un suelo arcilloso se producen dos tipos de reacciones: una primera, es la modificación inmediata de las condiciones de granulometría, textura y compacidad generada por el intercambio de iones entre la arcilla y la cal, la floculación de las partículas de arcilla y la reducción de la cantidad de agua absorbida; la segunda manifestación es la mejora de las características resistentes del suelo a medio y largo plazo producida por una reacción de cementación.

Respecto al suelo natural, el límite líquido del suelo modificado se reduce en 16%; según Ospina-García *et al.* (2020) esto se debe a la reducción del índice de plasticidad que sufre la mezcla, debido a que el hidróxido de calcio hace que funcione como material estabilizante. Los cambios que tiene el suelo estabilizado con hidróxido de cal son: mayor trabajabilidad, incremento de la resistencia, reducción de la contracción e índice de plasticidad (Navarro Mendoza *et al.*, 2022).

Así mismo, al adicionar hidróxido de cal a la arcilla, el límite de contracción se incrementa de 17% a 19%, lo cual se interpreta como una mayor capacidad del suelo para retener agua sin sufrir alteraciones de volumen. A decir de Dhar y Hussain (2021), estos cambios se presentan en el suelo como consecuencia de las propiedades absorbentes del hidróxido de cal que al mezclarse con la arcilla genera cambios en la capacidad de expansión. En general, los suelos de grano fino tratados con cal presentan una menor plasticidad, mejor trabajabilidad y reducción del cambio de volumen (Balaji *et al.*, 2018).

Majumder y Venkatraman (2022) coinciden en afirmar que la adición de hidróxido de calcio genera cambios positivos en algunas propiedades mecánicas del suelo, como incremento de resistencia y disminución del potencial expansivo. El suelo arcilloso expansivo estabilizado presentó cambios debido a los nuevos silicatos y aluminatos de calcio generados por la sustitución del suelo por el hidróxido de cal, que se evidencia en el incremento de la resistencia al corte del suelo de $0,155 \text{ kg/cm}^2$ a $2,02 \text{ kg/cm}^2$; de igual manera el ensayo a compresión simple se incrementa de $0,2 \text{ kg/cm}^2$ a $0,6 \text{ kg/cm}^2$. Así mismo, el suelo estabilizado presenta variación en los parámetros de cohesión, incrementando de esta manera su resistencia al corte, con lo que el suelo se vuelve más resistente (Fondjo *et al.*, 2021).

La aplicación del 3% de hidróxido de cal mejora las características físicas y geomecánicas del suelo, ya que, a partir de este porcentaje recomendado por el ábaco de McDowell, el material se comporta como un limo en base a los sistemas de clasificación SUCS y AASHTO, debido a la disminución de su plasticidad generado por los intercambios iónicos ocurridos en las reacciones químicas. De la misma manera, se cumple con el objetivo de mejorar las

características expansivas del suelo arcilloso, de tal manera que puede aplicarse este proceso de estabilización en la subrasante de la Autopista Azogues - El Descanso.

5. Conclusiones

El método de estabilización aplicado fue exitoso. De este modo, el porcentaje de cal óptimo que se debe añadir al suelo de la subrasante de la Autopista Azogues - El Descanso, se fijó a través del ábaco propuesto por el investigador norteamericano Chester McDowell, siendo este del 3%.

La estabilización del suelo mediante combinación con hidróxido de calcio generó cambios de clasificación del suelo. Además, se presentaron cambios positivos en algunas características físicas y geomecánicas como: límite plástico, límite líquido, límite de contracción, índice de plasticidad y cohesión; por otro lado, el suelo experimentó reducción de la expansibilidad, pasando de 11% en estado natural a una expansibilidad nula 0%.

La técnica de estabilización con hidróxido de calcio aplicada en esta investigación resulta ser económica, por lo que se recomienda replicar en zonas donde el hidróxido de cal es de fácil obtención.

La aplicación de hidróxido de cal como técnica para estabilizar suelos arcillosos expansivos, puede ser parte de una estrategia de reciclaje y reutilización de materiales, es considerada como una práctica que promueve la utilización eficiente de los recursos naturales y fomenta la adopción de prácticas sostenibles en la industria de la construcción. Esta técnica no solo mejora la calidad de los suelos para diversos proyectos de infraestructura, sino que también contribuye a la conservación del medio ambiente y a la reducción de la degradación del suelo.

Finalmente, la sustitución de hidróxido de cal en arcillas expansivas es una práctica que se alinea con los desafíos del Objetivo de Desarrollo Sostenible 12, porque promueve la utilización eficiente de los recursos y fomenta la adopción de prácticas sostenibles en la industria de la construcción. Esto no solo mejora la calidad de los suelos para diversos proyectos de infraestructura, sino que también contribuye a la conservación del medio ambiente.

6. Referencias

- Al-Mukhtar, M., Khattab, S. y Alcover, J. F. (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139-140, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2013). *Standard method of test for determining the liquid limit of soils* (AASHTO T89)
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). *Standard method of test for compressive strength of hydraulic cement mortars (using portions of prisms broken in flexure)* (AASHTO T86-70).
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *Standard method of test for particle size analysis of soils* (AASHTO T88-70).

- American Society for Testing and Materials. (1966). *Method of test for liquid limit of soils* (ASTM-D423 66).
- American Society for Testing and Materials. (1970). *Method of test for plastic limit and plasticity index of soils* (ASTM D424).
- American Society for Testing and Materials. (2000). *Standard test methods for unconfined compressive strength of cohesive soil* (ASTM D2166).
- American Society for Testing and Materials. (2007). *Standard test method for particle-size analysis of soils* (ASTM D422-63)
- American Society for Testing and Materials. (2018a). *Standard guide for site characterization for engineering design and construction purposes* (ASTM-D420-18).
- American Society for Testing and Materials. (2018b) *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils* (ASTM D4318-17e1).
- American Society for Testing and Materials. (2021a). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort* (ASTM D698).
- American Society for Testing and Materials. (2021b). *Standard test method for expansion index of soils* (ASTM D4829).
- American Society for Testing and Materials. (2023). *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions* (ASTM D3080-23).
- Balaji, S., Wadhwa, M. D., Waghe, A. P., Rathod, D. C. y Razvi, S. S. (2018). Soil Stabilization by using Lime. *International Journal of Engineering and Management Research*, 8(2), 79-86. <https://acortar.link/BNH2Ce>
- Bauza Castelló, J. D. (2015). *El tratamiento de los suelos arcillosos con cal. Comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla]. <http://hdl.handle.net/11441/32957>
- Dhar, S. y Hussain, M. (2021). The strength and microstructural behavior of lime stabilized subgrade soil in road construction. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4), 471-483. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1598623>
- Fondjo, A. A., Theron, E. y Ray, R. P. (2021). Stabilization of expansive soils using mechanical and chemical methods: a comprehensive review. *Civil Engineering and Architecture*, 9(5), 1295-1308. <http://dx.doi.org/10.13189/cea.2021.090503>
- Gómez Pérez, L. E., Guillín Acosta, W. F. y Gallardo Amaya, R. J. (2016). Variación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos comprensibles estabilizados con material cementante. *Revista Tecnura*, 20(Edición especial), 95-107. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6371465>
- Guney, Y., Sari, D. Cetin, M. y Tuncan, M. (2007). Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil. *Building and Environment*, 42(2), 681-688. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.035>

- Higuera Sandoval, C. H., Gómez Cristancho, J. C. y Pardo Naranjo, O. E. (2012). Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 21(32), 21-40. <https://www.redalyc.org/pdf/4139/413940771003.pdf>
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D. y Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57(1-2), 75-124. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00071-X)
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1982a). *Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 687: Mecánica de suelos. Toma de muestras inalteradas* (INEN 687).
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1982b). *Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 686: Mecánica de suelos. Toma de muestras alteradas* (INEN 686)
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (2017). *Memoria Anual 2017*. INGEMMET. <https://acortar.link/ocKreq>
- Instituto Nacional de Vías (2013). *Determinación de suelos expansivos* (INVIAS INV E-132-13).
- Kiran, Harsha, S., Raju, K. V. S. B. y Kumar, N. (2018). Experimental study on stabilization of Black Cotton soil with Molasses and Areca nut fibers. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(7), 219-223. <https://acortar.link/yFR9pN>
- Kolias, S. Kasselouri-Rigopoulou, V. y Karahalios, A. (2005). Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 301-313. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.019>
- Lin, B. y Cerato, A. B. (2012). Prediction of expansive soil swelling based on four micro-scale properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(1), 71-78. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0410-7>
- López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J. B., Horta-Rangel, J., Coronado-Márquez, A. y Castaño-Meneses, V. (2010). Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 11(3), 159-168. <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/07/2010-lopez.pdf>
- Majumder, M. y Venkatraman, S. (2022). Utilization of the lime as subgrade stabilizer in the pavement construction. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 4929-4942. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06291-2>
- Molina Villalobos, A. (2023). Determinación de parámetros de resistencia efectivos para arcillas expansivas. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(3), 1436-1447. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i3.1174>
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://acortar.link/137s>
- Navarro Mendoza, E. G., Alonso Guzmán, E. M., Ayala Ortega, L. A. y Sánchez Calvillo, A. (2022). Cal química para la estabilización de suelos arcillosos. *SIACOT 2022: Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra*, (pp. 127-132). Red PROTERRA. <https://acortar.link/TV88rI>

- Núñez del Arco Andrade, A. E. (2003). *Geología del Ecuador*. Cámara Ecuatoriana del Libro – Núcleo de Pichincha.
- Ospina-García, M. A., Chaves-Pabón, S. B. y Jiménez-Sicachá, L. M. (2020). Mejoramiento de subrasantes de tipo arcilloso mediante la adición de escoria de acero. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 11(1), 185-196. <https://doi.org/10.19053/20278306.v11.n1.2020.11692>
- Quintero-Lemus, L. J. y Gallardo-Amaya, R. J. (2015). Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización. *Revista Ingenio*, 8(1), 72-81. <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/ingenio/article/view/2050>
- Pandey, A. y Rabbani, A. (2017). Stabilisation of Pavement Subgrade Soil Using Lime and Cement: Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(4), 5733-5735. <https://acortar.link/YGIImX8>
- Rivera, J. F., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R. y Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos – Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador Técnico*, 84(2), 202-226. <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>
- Stavridakis, E. I. (2006). Assessment of anisotropic behaviour of swelling soils on ground and construction work. En A. Ali Al-Rawas y M. F. A. Goosen (eds.), *Expansive soils: recent advances in characterization and treatment* (pp. 371-384). Taylor & Francis/Balkema. <https://acortar.link/V1t2OQ>
- Verdezoto Villacis, P. A. (2006). *Levantamiento geológico del sector comprendido entre las latitudes 2°37' S y 2°50' S, provincias del Cañar y Azuay, con especial enfoque sobre las secuencias miocénicas* [Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/264>

CONTRIBUCIONES DE AUTORES/AS, FINANCIACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Contribuciones de los/as autores/as:

Conceptualización: González Maldonado Marcos Dario; Ortiz Viñán Ana Paulina; **Software:** González Maldonado Marcos Dario **Validación:** Ortiz Viñán Ana Paulina, Guanín Vásquez Juan Carlos **Análisis formal:** : González Maldonado Marcos Dario; Ortiz Viñán Ana Paulina; **Curación de datos:** González Maldonado Marcos Dario; Ortiz Viñán Ana Paulina; **Redacción-Preparación del borrador original:** González Maldonado Marcos Dario; Ortiz Viñán Ana Paulina **Redacción-Re- visión y Edición:** Ortiz Viñán Ana Paulina **Visualización** Ortiz Viñán Ana Paulina **Supervisión:** Ortiz Viñán Ana Paulina **Administración de proyectos:** Ortiz Viñán Ana Paulina **Todos los/as autores/as han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito:** Ortiz Viñán Ana Paulina, González Maldonado Marcos Dario, Guanín Vásquez Juan Carlos.

Financiación: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos: Universidad Técnica Particular de Loja y Universidad Católica de Cuenca

AUTORES:

Ana Paulina Ortiz Viñán

Universidad Técnica Particular de Loja San Cayetano, Ecuador.

Ingeniera Civil año 1999, Magister en Ingeniería Vial año 2017, ha desempeñado funciones en Instituciones públicas: Técnico Municipio del cantón Zamora período 2000-2001, Técnico Constructora QUIPAEN año 2002, Fiscalizador de obras civiles en el Consejo Provincial de Loja período 2003-2005, Técnico de Unidad Municipal de Tránsito de Loja período 2005-2010, Jefe Unidad Municipal de Tránsito período 2010-2014, Técnico Obras Públicas Municipales período 2015. Docente Investigador del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja desde octubre de 2015 hasta la actualidad, ha impartido algunas asignaturas como: Resistencia de materiales, Estructuras, Hormigón, Tecnología de la construcción, Topografía, Estática.

aportiz@utpl.edu.ec

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-6767-403X>

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59117019700>

Juan Carlos Guanín Vásquez

Universidad Técnica Particular de Loja San Cayetano, Ecuador.

Máster en Ciencias por la Universidad de Granada - España. Ingeniero de Minas graduado en la Universidad Nacional de Loja. Docente titular de la UTPL. Ha dictado cursos de Fundamentos de Minería, Voladura de Rocas: Explotación Minera. Conformo el Grupo de investigación: Investigación Minero Metalúrgico y Procesos del Departamento de Geociencias. Capacitación del Congreso de Educación Católica "Educar es un acto de esperanza". IV Encuentro de Investigación e Innovación 2021 - PUCE. reconocimiento por el póster fue uno de los más votados Tipo de reconocimiento investigación. Tipo premio Local.

jcguanin@utpl.edu.ec