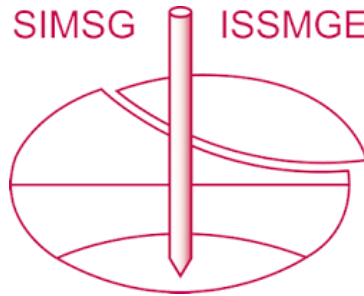


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Comportamiento volumétrico de un suelo no saturado derivado de cenizas volcánicas del departamento del Cauca, Colombia

Ana María LATORRE^{a,1}, Carol Andrea MURILLO^a y José Andrés CRUZ^a

^a*Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Colombia*

Resumen. Los suelos residuales derivados de ceniza volcánica son materiales que exhiben propiedades particulares, las cuales destacan de las de otros suelos de distinto origen. Estos materiales cubren aproximadamente el 12% del territorio colombiano; sin embargo, los estudios disponibles en el país son limitados. Este artículo analiza el comportamiento mecánico de un suelo derivado de ceniza volcánica del Departamento del Cauca en Colombia, en condiciones de saturación parcial a través del estudio de la respuesta de cambio volumétrico de muestras compactadas del suelo volcánico para diferentes valores de succión. El programa experimental comprende el estudio de las propiedades físicas del suelo, la obtención de las curvas de retención de agua y la determinación de algunos parámetros de rigidez asociados a los cambios en el esfuerzo y la succión por medio de ensayos edométricos y de cambio volumétrico con succión.

Palabras Clave. Suelos residuales, ceniza volcánica, succión, cambio volumétrico.

1. Introducción

Colombia es un país que se ha enfrentado al conflicto interno con grupos armados al margen de la ley durante los últimos 55 años, lo cual ha tenido un gran impacto en el desarrollo económico y social de la población. La situación de violencia, ha expuesto a las comunidades a la vulneración de sus derechos, excluyéndolas del sistema social ofertado por el Estado Colombiano. Por esta razón, en el marco de los acuerdos de paz que se han adelantado entre el Gobierno Nacional y los grupos armados, se busca mejorar la calidad de vida de los pobladores a través de la inversión en materia de infraestructura. Estas inversiones buscan brindar condiciones adecuadas de salud, educación, seguridad, entre otras, que promuevan la construcción de espacios de paz y faciliten la reinserción social de los integrantes de los grupos armados, reemplazando los actos violentos y los cultivos ilícitos por actividades productivas legales. Sin embargo, dado que los recursos son limitados, las inversiones realizadas deben ser eficientes y ajustarse a los requerimientos que imponen las condiciones propias de cada región [1].

Desde el punto de vista geotécnico, las distintas combinaciones entre los factores topográficos, geológicos y climáticos que presentan amplia variabilidad a lo largo del

¹ Ana María Latorre, Carol Andrea Murillo, José Andrés Cruz, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia; E-mail: amlatorreb@unal.edu.co, camurillof@unal.edu.co, josandcwil@yahoo.com.

territorio colombiano, dan origen a una gran diversidad de materiales térreos naturales, los cuales desarrollan características y propiedades particulares que definen su comportamiento en las obras civiles. Así, se tiene que la comprensión adecuada de dichos materiales es quizá la mayor limitante para el cumplimiento de los objetivos trazados en cuanto al desarrollo y/o mejoramiento de la infraestructura nacional y, por tanto, se requiere investigar en el comportamiento propio de estos materiales locales, especialmente aquellos cuyo estudio ha sido limitado [2-3].

Los suelos derivados de cenizas volcánicas, por ejemplo cubren aproximadamente el 12% del territorio nacional, porcentaje que aunque parece poco representativo, resulta en un gran interés científico no solo por exhibir ciertos rasgos peculiares que suelen dificultar su estudio, sino que por su gran capacidad agrícola, grandes densidades de población están asentadas sobre ellos y por ende allí se concentra buena parte de las obras de infraestructura [4]. Estos suelos se originan a partir de la meteorización depósitos de cenizas volcánicas que se componen mayormente por vidrio volcánico, cuya alteración química da paso a la formación de materiales amorfos que le brindan al suelo ciertas características únicas que no se encuentran fácilmente en otros suelos [5-7]. Entre estas se incluyen baja densidad aparente, consistencia altamente friable, alta porosidad, plasticidad, permeabilidad así como gran capacidad de retención de agua. Todas ellas originadas por los materiales amorfos que dominan la fracción coloidal en los suelos de tipo alofánico y la acumulación de materia orgánica en los no alofánicos [8-9].

Por otra parte, tal vez la característica más peculiar de estos suelos corresponde a los cambios que sus propiedades presentan al ser sometidos a algún proceso de secado, bien sea al aire o al horno. Estos procesos, según lo explica Kubota [10] reducen de forma irreversible la dispersabilidad de las partículas, de modo que aquellas de tamaño limo y arcilla se agregan para formar fracciones más grandes. En pocas palabras, la matriz del suelo cambia con el secado y el material seco puede ser considerado como un material diferente al inicial.

En cuanto a sus propiedades mecánicas, un aspecto que resalta notablemente de estos materiales en su estado inalterado es la estabilidad que presentan en pendientes pronunciadas, lo cual no se espera en materiales de plasticidades elevadas. Por ejemplo, Rao [11] y Wesley [12] reportan valores para el ángulo de fricción (ϕ') superiores a los 30° , los cuales Rao atribuye a la capacidad de agregación del material antes descrita. Sin embargo, una vez se ha alterado la estructura original del material, este pierde resistencia en una cantidad tal que no es capaz de soportar ni siquiera la carga de la maquinaria de construcción [13].

Al hablar de comportamiento volumétrico, se tiene que con materiales tan porosos las relaciones de vacíos (e) son muy elevadas, de modo que los suelos son bastante compresibles una vez se excede el esfuerzo de pre consolidación. Con el remoldeo se han encontrado algunas variaciones en la e inicial y la dificultad de identificar el punto de inflexión del esfuerzo de pre consolidación respecto de muestras inalteradas. Además, con el secado los suelos de cenizas volcánicas a diferencia de suelos de otro origen presentan decrementos volumétricos mayormente irreversibles [12-14]. Por lo anterior, se resalta la importancia de estudiar los cambios volumétricos que presentan estos materiales no solo con la aplicación de carga sino con la variación en las condiciones de humedad y por tanto de succión que experimentan en campo.

Así pues, este artículo analiza algunas propiedades, físicas y mecánicas particulares de un suelo derivado de ceniza volcánica del Departamento del Cauca en Colombia, sitio que se ha visto grandemente afectado por los conflictos internos del país y cuyos materiales locales se encuentran de alguna manera fuera del estado del conocimiento.

Esto permitirá analizar la variabilidad de sus propiedades respecto de otros suelos del mismo origen y hacer un primer acercamiento a entender su comportamiento volumétrico particular para avanzar en el mejoramiento de la infraestructura nacional en tiempos del posconflicto.

2. Materiales y métodos

Para los propósitos de la investigación, se utilizaron muestras de suelo derivado de cenizas volcánicas, extraídas como parte del desarrollo del proyecto realizado en el 2016 por la Universidad Nacional de Colombia y el Ministerio de Transporte para la Identificación, caracterización y desarrollo de especificaciones para materiales locales, para vías con bajos y medios niveles de tráfico, que incentiven el desarrollo de la infraestructura vial en las zonas de posconflicto. El sitio de exploración seleccionado se localiza en el municipio de Cajibío (departamento del Cauca – Colombia), como se expone en la Figura 1. Allí, se talló un bloque inalterado y se recuperaron muestras alteradas en lonas a una profundidad entre 1.0 m y 1.5 m, que fueron almacenadas de manera que mantuvieran su contenido de agua inicial.

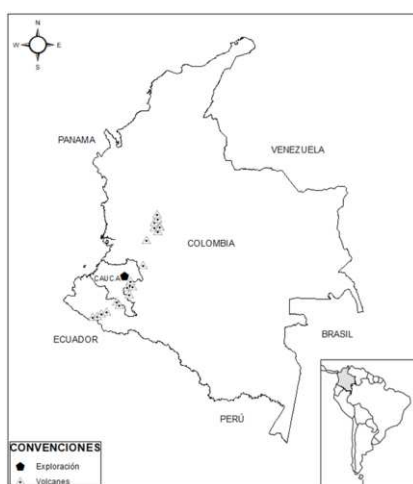


Figura 1. Localización Sitio de Exploración (Cauca-Colombia).

Para la caracterización física del material de estudio se determinó su humedad natural (w_n), gravedad específica (G_s), límites de Atterberg con y sin secado previo, distribución de tamaños de partículas sobre las muestras alteradas y su peso unitario a partir de un fragmento del bloque tallado. Para esta caracterización se siguieron los procedimientos descritos en las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías INVIAS (2013) vigentes en Colombia. La evaluación del comportamiento mecánico y volumétrico del suelo incluyó la obtención de la curva de retención de agua, así como ensayos de corte directo en modalidad CD (consolidado - drenado), consolidación unidimensional en condiciones saturadas y para las condiciones de parcial saturación, la construcción de una curva que relaciona la relación de vacíos con la succión del material.

En primer lugar, la curva de retención de agua se obtuvo usando un higrómetro de punto de rocío (WP4C), que permitió estimar la succión total del suelo de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D6836-02. También se efectuaron algunas mediciones de succión matricial con papel filtro Whatman No. 42 en contacto con la muestra. Esta segunda metodología al igual que los ensayos de corte directo y consolidación en condiciones saturadas, se realizaron acorde a los lineamientos establecidos por la normativa INVÍAS. Para la construcción de la curva de cambio volumétrico en función de la succión, se midió esta última en distintas muestras empleando el WP4C y luego se midió su volumen empleando el método de la parafina.

Finalmente, cabe aclarar que los ensayos de este programa experimental, fueron ejecutados en especímenes de suelo alterado compactado estáticamente en laboratorio a la densidad seca del peso unitario inalterado a una velocidad de 1 mm/min. Esto dado que la consistencia friable del material no permitió el tallado de las muestras correspondientes del bloque obtenido en campo. De esta manera, se trata de simular el comportamiento del suelo inalterado sin modificar de ninguna manera sus condiciones de humedad naturales.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización Intrínseca

Las muestras de suelo ensayadas presentan w_n que oscilan en un rango entre 120% y 130%. Se obtuvo también un valor G_s promedio de las mediciones realizadas de 2.49 y un peso unitario seco del bloque inalterado de 5.02 kN/m³. Lo anterior, muestra las propiedades de baja densidad y alta porosidad esperadas para este tipo de materiales. En cuanto a los límites de Atterberg, el suelo sin secado previo exhibe un límite líquido (LL) de 162% e índice de plasticidad (IP) de 35.6%; sin embargo, con el secado al aire estas características cambian drásticamente y, el material se comporta como un material no plástico (NP), lo cual de acuerdo con Warkentin & Maeda [15], refleja la presencia de alófana en su fracción coloidal.

De la distribución de tamaños de partículas se encontró un 89% de partículas finas de 0.075 mm, que en conjunto con sus características de plasticidad lo clasifican como un limo de alta plasticidad (MH) en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). No obstante, según lo explican Maeda *et al.* [13] la distribución de tamaños de partículas obtenida no es un índice adecuado en la predicción del comportamiento del suelo de estudio, puesto que la tendencia de sus partículas a agregarse y su baja dispersabilidad no permite identificar si dicha distribución realmente es la correspondiente al material o un reflejo del grado de agregación que este presentaba al momento del ensayo.

Para el análisis de variabilidad de las propiedades del suelo estudiado, se compararon los resultados obtenidos con otros suelos del mismo origen. En Colombia se emplean los resultados obtenidos por la Universidad Nacional de Colombia en suelos del Cauca en los municipios de Cajibío y Suárez [16] y suelos de Manizales [17] y Palestina [18] en el departamento de Caldas. Igualmente, se extractaron datos reportados para suelos de Ecuador [19], Costa Rica [20] y Dominica [15] en América, Nueva Zelanda [14], Indonesia [12] y Japón [15]. Este análisis arroja que aunque la G_s se mantiene dentro de un rango entre 2.2 y 2.9 para todos los suelos comparados, los límites de Atterberg, muestran una amplia variación. En la Figura 2 se grafican los valores de LL y LP de los

distintos suelos, encontrando que las características de plasticidad del material estudiado en este artículo se encuentran notablemente por encima de la mayor parte de los suelos considerados, con única excepción en los suelos de Java, Indonesia.

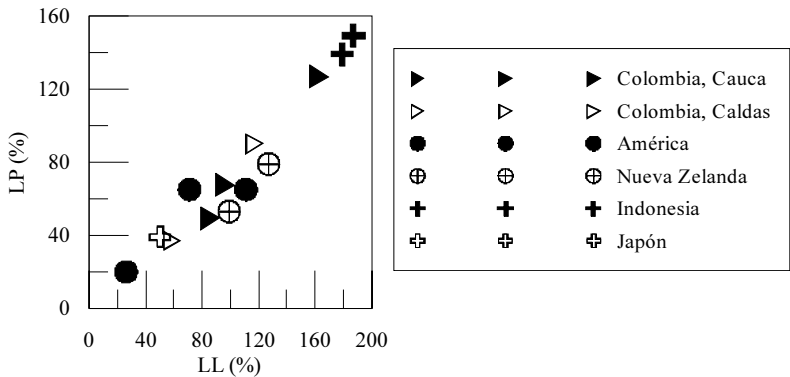


Figura 2. Comparativo Límites de Atterberg.

3.2. Curva de retención de agua

En la Figura 3(a) se muestra la curva de retención de agua obtenida para el suelo de estudio por las dos metodologías empleadas, con respecto al w_n , siguiendo una trayectoria de secado en la cual se identifica un valor inicial de succión (s) para el suelo en condiciones naturales de humedad en un rango de 30-80 kPa.

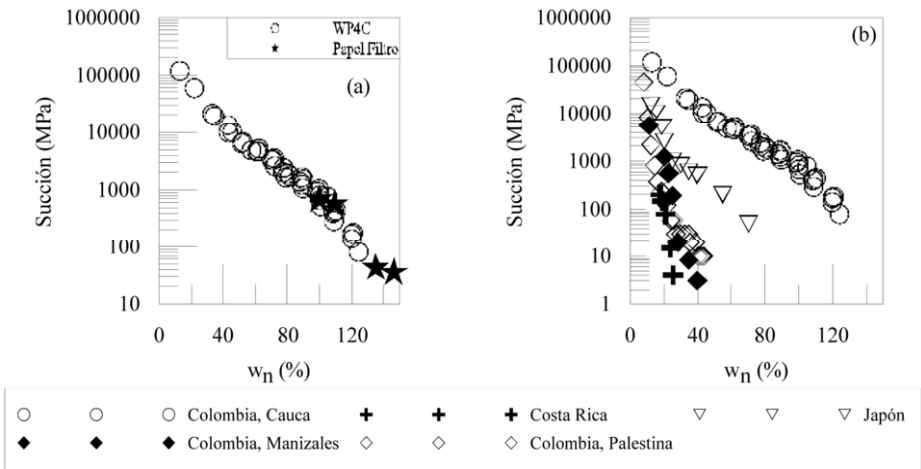


Figura 3. Curva de retención de agua.

De igual manera, se verifica que el material posee una alta capacidad de retención de agua superando valores de s de 100 MPa para w_n alrededor del 10%. Por su parte, comparando las mediciones obtenidas por cada método de medición, se obtiene que la succión total y matricial del material no exhiben variaciones significativas entre ellas, de modo que es posible inferir que este no tiene una componente de succión osmótica apreciable. Por su parte, en la Figura 3(b) se comparan estas características de retención

con las de suelos de Manizales [17] y Palestina [21] en Colombia, Costa Rica [20] y Japón [22], donde se evidencia que el suelo del Cauca aquí estudiado, presenta una capacidad de retención de agua notablemente mayor a la de los demás suelos analizados, en un rango de humedad significativamente más amplio.

3.3. Resistencia al corte

Para los ensayos de corte directo se impuso sobre la muestra un esfuerzo vertical (σ) equivalente al esfuerzo in situ estimado para el primer punto, dos veces este esfuerzo para el segundo y cuatro veces para el tercer punto. En la Figura 4, se muestra la envolvente de resistencia obtenida, donde se determinan los parámetros de resistencia drenados ϕ' y c' por medio del criterio de falla de Coulomb. Las muestras ensayadas presentaron resistencia al corte concordante con lo encontrado por Rao [11] y Wesley [12] para suelos derivados de cenizas volcánicas en condiciones inalteradas. De manera que se puede inferir que las muestras compactadas asemejan su comportamiento al de especímenes inalterados y no a los remoldeados, para los cuales Jacquet [14] encontró valores de ϕ' por debajo de los 15° .

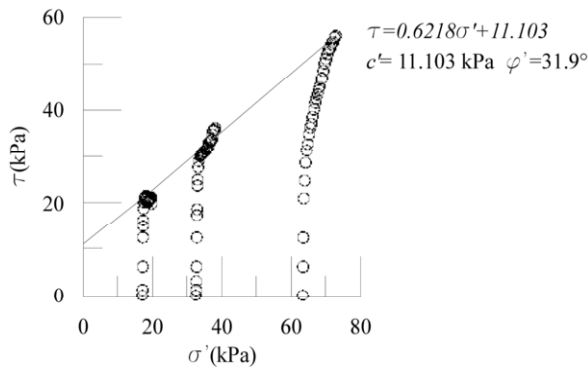


Figura 4. Envolvente de resistencia-resultados de corte directo.

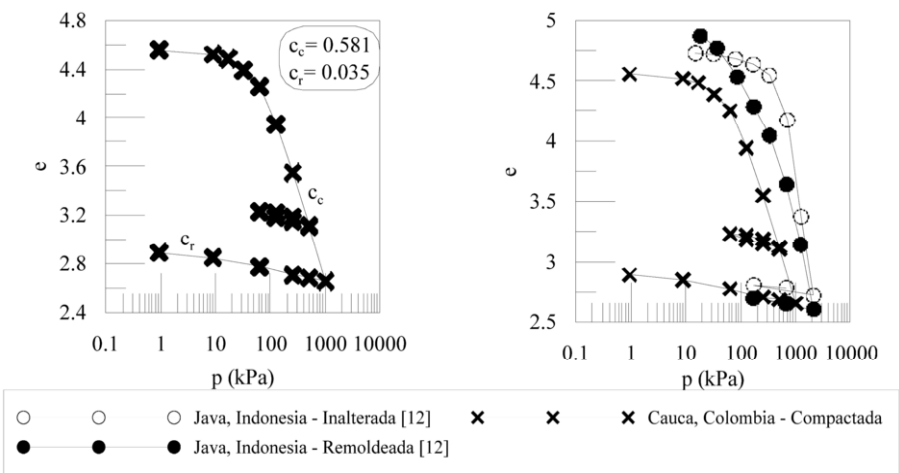


Figura 5. (a) Curva de compresibilidad suelo de estudio. (b) Comparación suelo inalterado y remoldeado.

3.4. Cambio volumétrico

Para las condiciones saturadas, en la Figura 5(a) se muestra la curva de compresibilidad del material estudiado, para el cual se obtuvieron los coeficientes de compresibilidad (c_c) de 0.581 y de re compresibilidad (c_r) de 0.035. Además, en la Figura 5(b) se evidencia que la forma de la curva de compresibilidad obtenida se asemeja más a la curva inalterada que a la remoldeada con un punto de inflexión de claro, aun cuando se puede notar que el suelo presenta cierto grado de alteración.

En cuanto a las condiciones de parcial saturación, en la Figura 6 se muestra una curva de cambio volumétrico expresado como e , para succiones en un rango entre 80 y 2000 kPa. Allí, no se alcanza a identificar completamente la línea de compresión virgen en el espacio e -log(s), por lo que no es posible estimar el coeficiente de compresibilidad respecto de la succión $c_e(s)$; sin embargo estos primeros puntos parecen esbozar lo que sería una primera línea de recompresión en el mismo espacio, para la cual se estima un coeficiente de re compresibilidad respecto de la succión $c_r(s)$ de 0.221.

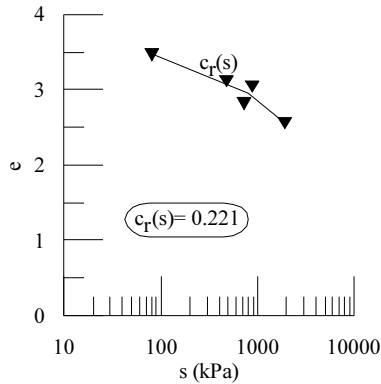


Figura 6. Cambio volumétrico con la succión.

4. Conclusiones

Los suelos derivados de cenizas volcánicas estudiados en el departamento del Cauca (Colombia) presentan una amplia variabilidad en sus propiedades respecto de otros suelos del mismo origen que se tienen en el país, entre las cuales se tienen límites de consistencia y capacidad de retención de agua notablemente superiores. Demostrando así, que en cada punto los materiales locales presentan comportamientos distintos y por tanto es indispensable caracterizar cada suelo a emplear en cualquier proyecto de infraestructura. Los ensayos de resistencia y cambio volumétrico realizados a las muestras compactadas en laboratorio, mostraron un comportamiento más cercano a muestras inalteradas que a muestras remoldeadas, por lo que se infiere que las probetas empleadas en esta investigación logran simular de alguna manera el comportamiento natural del suelo. Finalmente, se presentan algunos parámetros de rigidez del suelo del Cauca asociados a los cambios en el esfuerzo y la succión, que son propios y particulares para el material del sitio de exploración. De acuerdo con lo encontrado en el análisis de variabilidad de propiedades realizado, se tiene que estos parámetros no son extrapolables a otros suelos aun cuando provengan de la misma región.

Referencias

- [1] Departamento Nacional de Planeación. República de Colombia (2016), Documento CONPES 3857: Lineamientos de política para la gestión de la red terciaria, 1–74.
- [2] C. A. Murillo (2017), Desafíos para el desarrollo de la Red Vial Terciaria en el Posconflicto, *Rev. Ingeniería*, vol. 45, 32–38, 2017.
- [3] S. Caro and B. Caicedo (2017), Tecnologías para vías terciarias: perspectivas y experiencias desde la academia, *Rev. Ingeniería*, vol. 45, 12–21.
- [4] A. Lizcano and M. C. Herrera (2006), Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia, *Rev. Int. Desastr. Nat. Accid. e Infraestruct. Civ.*, vol. 6, no. 2, 167–198.
- [5] S. Shoji, R. Dahlgren, and M. Nanzyo (1993), Terminology, Concepts and Geographic Distribution of Volcanic Ash Soils, *Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilization*, 1–5.
- [6] R. Dahlgren, S. Shoji, and M. Nanzyo (1993), Mineralogical Characteristics of Volcanic Ash Soils, *Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilization*, 1993, 101–143.
- [7] M. Nanzyo (2002), Unique properties of volcanic ash soils, *Glob. J. Environ. Res.*, vol. 6, no. 2, 99–112.
- [8] R. Dahlgren, M. Saigusa, and F. C. Ugolini (2004), The Nature, Properties and Management of Volcanic Soils, *Advances in Agronomy*, vol. 82, 119–184.
- [9] F. C. Ugolini and R. J. Zasoski (1979), Soils Derived from Tephra, *Volcanic Activity and Human Ecology*, Academic Press, INC., 83–124.
- [10] T. Kubota (1972), Aggregate-formation of allophanic soils: Effect of drying on the dispersion of the soils, *Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 18, no. 2, 79–97.
- [11] S. M. Rao (1995), Mechanistic approach to the shear strength behaviour of allophanitic soils, *Eng. Geol.*, vol. 40, 215–221.
- [12] L. Wesley (2009), Behaviour and geotechnical properties of residual soils and allophane clays, *Obras y Proy.*, no. 6, 5–10.
- [13] T. Maeda, H. Takenaka, and B. P. Warkentin (1977), Physical properties of allophane soils, *Adv. Agron.*, vol. 29, no. C, 229–264.
- [14] D. Jacquet (1990), Sensitivity to remoulding of some volcanic ash soils in New Zealand, *Eng. Geol.*, vol. 28, no. 1–2, 1–25.
- [15] B. P. Warkentin and T. Maeda (1974), Physical Properties of Allophane Soils from the West Indies and Japan, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 38, no. July, 372.
- [16] Universidad Nacional de Colombia and Ministerio de Transporte (2017), Identificación, Caracterización y Desarrollo de Especificaciones para Materiales Locales, para Vías con Bajos y Medios Niveles de Tráfico, que Incentiven el Desarrollo de la Infraestructura Vial, en las Zonas de Posconflicto.
- [17] M. C. Herrera (2006), Suelos Derivados de Ceniza Volcánica en Colombia: Estudio Fundamental e Implicaciones en Suelos, Universidad de los Andes.
- [18] L. Viveros (2014), Influencia del proceso de compactación en la resistencia al corte de un suelo derivado de ceniza volcánica, Universidad Nacional de Colombia.
- [19] J. Bommer, R. Rolo, A. Mitroulia, and P. Berdousis (2001), Geotechnical Properties and Seismic Slope Stability of Volcanic Soils, *12th European Conference on Earthquake Engineering*, 2001, vol. 695.
- [20] A. Ferrari, J. Eichenberger, and L. Laloui (2013), Hydromechanical behaviour of a volcanic ash, *Géotechnique*, vol. 63, no. 16, 1433–1446.
- [21] C. E. Naranjo (2016), Comportamiento volumétrico de suelos compactados derivados de ceniza volcánica, Universidad Nacional de Colombia.
- [22] S. Suzuki (2011), Verification of freezing point depression method for measuring matric potential of soil water, *Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 0768, 1277–1280.