



Capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos derivados de cenizas volcánicas parcialmente saturados

Bearing capacity of shallow foundations in partially saturated volcanic ash soils

CATALINA LOZADA LÓPEZ¹ - CRISTHIAN CAMILO MENDOZA BOLAÑOS² -
HERMES ARIEL VACCA GÁMEZ³ - ESTEBAN GUACANEME⁴

1. Doctora en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7630-1710>.

2. Doctor en Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2888-6507>.

3. Doctor en Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3159-6997>.

4. Magíster en Ingeniería Civil con Énfasis en Geotecnia. Pontificia Universidad Javeriana. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0075-3101>.

catalinalozadal@javeriana.edu.co - cmendozab@unal.edu.co - vacca@javeriana.edu.co
- guacamene.esteban@javeriana.edu.co

Recibido: 02/02/2025 Aceptado: 15/03/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se evalúa la capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos derivados de cenizas volcánicas en condiciones de saturación parcial, incorporando explícitamente el efecto de la succión matricial en el comportamiento mecánico del suelo. A partir de resultados experimentales y del análisis de parámetros geotécnicos relevantes, se examina la influencia del grado de saturación en la resistencia al corte y en la capacidad portante última de zapatas superficiales.

En el estudio se comparan las condiciones saturadas y parcialmente saturadas, evidenciando incrementos significativos en la capacidad portante asociados a la presencia de succión, así como variaciones en los mecanismos de falla. Los resultados obtenidos permiten resaltar la importancia de considerar el estado de saturación real del suelo en el diseño geotécnico, particularmente en depósitos de origen volcánico, donde las condiciones no saturadas son frecuentes.

En el trabajo se aportan elementos técnicos que contribuyen a una evaluación más realista y segura del desempeño de cimentaciones superficiales en este tipo de materiales.

Palabras claves: Suelos derivados de cenizas volcánicas, suelos parcialmente saturados, capacidad portante, cimentaciones superficiales, succión matricial.

Abstract

This article evaluates the bearing capacity of shallow foundations in soils derived from volcanic ash under conditions of partial saturation, explicitly incorporating the effect of matrix suction on the mechanical behavior of the soil. Based on experimental results and the analysis of relevant geotechnical parameters, the influence of the degree of saturation on the shear strength and ultimate bearing capacity of shallow footings is examined.

The study compares saturated and partially saturated conditions, showing significant increases in bearing capacity associated with the presence of suction, as well as variations in failure mechanisms. The results highlight the importance of considering the actual saturation state of the soil in geotechnical design, particularly in deposits of volcanic origin, where unsaturated conditions are common.

The work provides technical elements that contribute to a more realistic and reliable assessment of the performance of shallow foundations in this type of material.

Keywords: Soils derived from volcanic ash, partially saturated soils, bearing capacity, shallow foundations, matrix suction.

INTRODUCCIÓN

Colombia cuenta con vastas zonas geológicas que albergan depósitos de suelos complejos, como los derivados de ceniza volcánica, sobre los cuales se han desarrollado asentamientos humanos, infraestructuras industriales y centros gubernamentales (Mendoza et al., 2021). El estudio de estos suelos es desafiante debido a que su comportamiento mecánico y dinámico varía según los procesos de formación, además de que presentan problemas de inestabilidad de taludes, alta sensibilidad y agrietamiento (Hernández et al., 2018). En particular, las condiciones climáticas tropicales de Colombia influyen en los procesos de transferencia de calor y vapor de agua en el interior del suelo. En condiciones secas, el flujo de agua es ascendente, lo que produce una pérdida de humedad y genera cambios en el volumen y en la resistencia al corte del suelo; por el contrario, en periodos húmedos se pierde resistencia al disminuir el contenido de humedad a causa del incremento de la succión.

En varias investigaciones experimentales se ha demostrado que la succión y la cementación desempeñan un papel clave en el aumento de la resistencia del suelo (Delage y Cui, 1996; Pereira et al., 2005; Caicedo et al., 2014). A pesar de la relevancia de estudiar estos suelos, existen pocas investigaciones acerca de la respuesta esfuerzo-deformación y el comportamiento parcialmente saturado de los depósitos de ceniza volcánica, dado que constituyen menos del 1 % de los suelos en el mundo (Lizcano et al., 2006).

Recientemente, se ha estudiado la capacidad portante teórica de las cimentaciones superficiales en suelos no saturados (Oh y Vanapalli, 2008; Vanapalli y Mohamed, 2013; Lozada et al., 2019). En estos estudios se concluye que la capacidad portante del suelo aumenta a medida que lo hacen los parámetros de resistencia al corte, los cuales, en suelos parcialmente saturados, dependen de la succión matricial.

El objetivo de este trabajo es determinar el incremento de la capacidad portante teórica en suelos derivados de ceniza volcánica en condiciones de parcial saturación, mediante la determinación de los parámetros de resistencia al corte por medio de ensayos de laboratorio.

Así mismo, en este estudio se busca llenar el vacío existente en la bibliografía científica sobre los efectos que ocurren en suelos derivados de ceniza volcánica, los cuales no se comprenden completamente en la actualidad.

INTRODUCTION

Colombia has extensive geological regions composed of complex soil deposits, such as those derived from volcanic ash, where human settlements, industrial infrastructure, and governmental facilities have been developed (Mendoza et al., 2021). The study of these soils is challenging because their mechanical and dynamic behavior varies according to their formation processes. In addition, they often present problems related to slope instability, high sensitivity, and cracking (Hernández et al., 2018).

In particular, the tropical climatic conditions of Colombia influence the processes of heat and water vapor transfer within the soil. Under dry conditions, water flow tends to move upward, causing moisture loss and changes in soil volume and shear strength. Conversely, during wet periods, soil strength decreases as moisture content increases and matric suction is reduced.

Several experimental studies have shown that suction and cementation play a key role in increasing soil strength (Delage and Cui, 1996; Pereira et al., 2005; Caicedo et al., 2014). Despite the importance of studying these soils, there is still limited research on the stress-strain response and partially saturated behavior of volcanic ash deposits, as they represent less than 1% of the world's soils (Lizcano et al., 2006).

In recent years, the theoretical bearing capacity of shallow foundations in unsaturated soils has been studied (Oh and Vanapalli, 2008; Vanapalli and Mohamed, 2013; Lozada et al., 2019). These studies conclude that the bearing capacity of soil increases as shear strength parameters increase, which in partially saturated soils depend on matric suction.

The objective of this study is to determine the increase in the theoretical bearing capacity of volcanic ash soils under partially saturated conditions by estimating shear strength parameters through laboratory testing.

Furthermore, this research seeks to contribute to filling the gap in the scientific literature regarding the behavior of soils derived from volcanic ash, whose mechanisms are still not fully understood.

METODOLOGÍA

El suelo utilizado en esta investigación corresponde a un suelo derivado de ceniza volcánica obtenido en la ciudad de Manizales (Colombia), a una profundidad

de 1,5 m, el cual se clasifica en el sistema SUCS como un limo de alta plasticidad MH (tabla 1). Los límites de plasticidad obtenidos y la clasificación coinciden con los reportados en la bibliografía para suelos cuya composición mineralógica corresponde principalmente a mineral de tipo haloisita (Vásquez-Varela y Mendoza, 2021). En la figura siguiente (figura 1), obtenida mediante microscopia SEM, se muestra la morfología tubular cilíndrica del mineral haloisita presente en las muestras de suelo analizadas.

La curva de distribución del tamaño de partículas se obtuvo empleando el Masterseizer 2000, expresada en porcentaje de volumen acumulado (figura 2). De esta curva se deriva que el 2 % corresponde a la fracción arcillosa ($d < 0,002$ mm), el 54 % a la fracción limosa ($0,002$ mm $< d < 0,06$ mm) y el 44 % a la fracción arenosa ($d > 0,06$ mm). La distribución de tamaños obtenida se encuentra dentro del rango de los suelos derivados de cenizas volcánicas previamente reportados en la ciudad de Manizales para diferentes profundidades (Herrera et al., 2007).

Tabla 1

Propiedades del suelo derivado de ceniza volcánica obtenido de Manizales (Colombia)

Propiedad	Valor	Unidad
Límite líquido (w_L)	74	%
Límite plástico (w_p)	37	%
Índice de plasticidad (IP)	37	%
Gravedad específica (G_s)	2,08	-

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

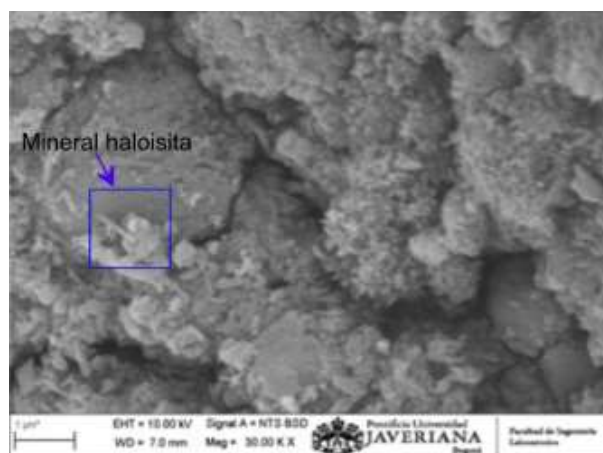


Figura 1. Imagen SEM de un suelo derivado de ceniza volcánica en Manizales (Colombia)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

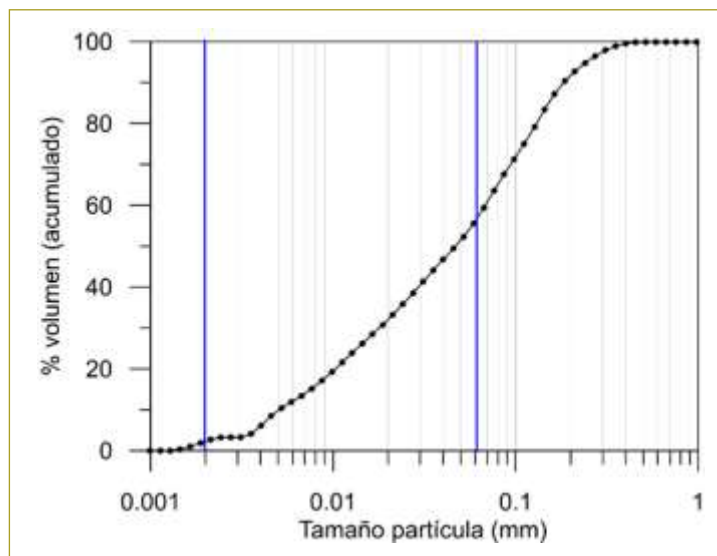


Figura 2. Curva de distribución de tamaño de partículas (Mastersizer 2000)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

Se hicieron ensayos de corte simple en el equipo Direct Shear Test Track II en la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Las muestras de suelo se prepararon secándolas al aire y llevándolas a un contenido de humedad $w_{opt} = 44,5$ %, correspondiente a la densidad óptima obtenida en el ensayo de compactación Proctor estándar $\gamma_d = 10,5$ kN/m³. Se efectuaron ensayos saturando la muestra después de la compactación y ensayos en muestras secadas al aire después de la compactación inicial. Durante la ejecución de los ensayos, no se hicieron el control ni la medición de la succión del suelo.

A continuación se presentan los ensayos de corte simple efectuados para tres valores de esfuerzo normal aplicado (tabla 2). Para las muestras parcialmente saturadas, el valor de succión inicial se obtiene a partir de la curva de retención de agua del suelo, realizada por Herrera et al. (2007) para muestras de suelo tomadas en la ciudad de Manizales. Las características mineralógicas de estos tipos de suelos resultan en una gran capacidad de retención de agua en el suelo, lo que evidencia que para una diferencia en el contenido de humedad de 21 % se obtienen 400 kPa de succión matricial (tabla 2).

Tabla 2
Ensayos de corte simple

Ensayo	Esfuerzo normal σ'_n (kPa)	Contenido de humedad inicial w_o (%)	Succión matricial s (kPa)
ISS-50-100-200	50, 100, 200	47,0	0
ISW-50-100-200	50, 100, 200	26,4	400

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

La envolvente de resistencia de Mohr-Coulomb obtenida para las muestras analizadas con diferente nivel de succión matricial se presenta en la figura siguiente (figura 3, parte a), en la que se evidencia que la resistencia al corte del suelo aumenta al incrementarse la succión. Este efecto se explica por medio del criterio de falla de Mohr-Coulomb extendido, el cual permite considerar el efecto de la succión en los suelos parcialmente saturados en el cálculo de la resistencia al corte (Fredlund, 1979). En este criterio, se introduce un eje adicional que incluye la succión matricial. Los puntos ubicados en el espacio de esfuerzo normal, succión y resistencia última se encuentran sobre una envolvente de resistencia, la cual se puede determinar en términos de esfuerzos totales o efectivos (Fredlund, 1978).

El ángulo de fricción interna del suelo obtenido para el suelo saturado es $\varphi' = 44,73^\circ$, y para el suelo

parcialmente saturado, $\varphi' = 43,88^\circ$. En la muestra saturada, el suelo no presenta valor de cohesión, mientras que, en la condición parcialmente saturada, el valor de la cohesión es 20,6 kPa.

Estos valores son consistentes con los ángulos de fricción reportados en la bibliografía, los cuales pueden estar entre 26° y 43° (Forero et al., 1999). Los valores elevados del ángulo de fricción son característicos de estos materiales, a pesar de presentar un alto valor de límite líquido y minerales arcillosos.

Adicionalmente, en ensayos de corte directo realizados con suelos derivados de cenizas volcánicas en Chile (Sepúlveda et al., 2016), se han obtenido ángulos de fricción de 47° para condiciones saturadas en muestras alteradas, similares a los obtenidos en muestras inalteradas. Los valores de cohesión para las muestras saturadas en estos suelos son 17 kPa para las muestras saturadas inalteradas y 8 kPa para las muestras alteradas. En suelos parcialmente saturados, el ángulo de fricción obtenido en las muestras saturadas y parcialmente saturadas es similar, con rangos entre 38° y 47° .

A continuación se presenta la envolvente de resistencia de Mohr-Coulomb en materia de esfuerzos efectivos, donde la pendiente de la curva en el espacio succión y resistencia al corte se denomina φ^b . De los ensayos efectuados, se obtuvo un valor $\varphi^b = 1,1$ para σ'_n de 50 kPa y φ^b promedio de $11,2^\circ$ para σ'_n de 100 y 200 kPa (figura 3, parte b).

La ecuación que permite determinar la resistencia al corte del suelo en términos de esfuerzos efectivos, considerando la succión del suelo, es la propuesta por Vanapalli y Vanapalli (1996):

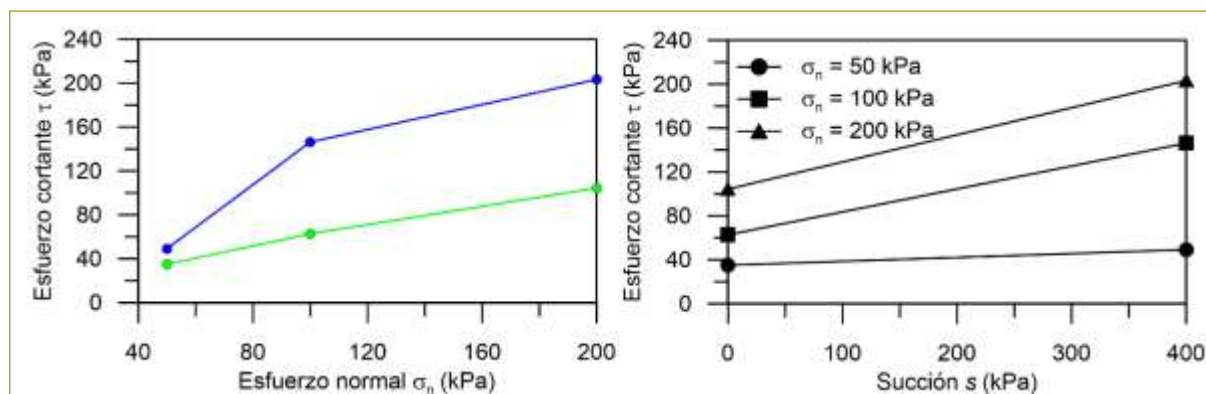


Figura 3. Resistencia al corte del suelo. a) Criterio de falla de Mohr-Coulomb. b) Criterio de falla extendido de Mohr-Coulomb para suelos parcialmente saturados

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u_w)_f \tan \varphi^b$$

Donde:

φ' : ángulo de fricción interna.

c' : cohesión efectiva.

φ^b : ángulo de cambio de resistencia al corte con respecto a la succión matricial.

u_a : presión del aire.

$(u_a - u_w)$: succión matricial.

Capacidad portante de cimentaciones superficiales en suelos no saturados

La capacidad portante teórica de cimentaciones superficiales en suelos no saturados ha sido objeto de estudio reciente por varios autores (Oh y Vanapalli 2008; Vanapalli y Mohamed 2013). La ecuación propuesta por Vanapalli y Mohamed (2007) es una aproximación planteada en términos de esfuerzos efectivos. Para el análisis de resistencia a corto plazo, la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$q_u = (S_u + (u_a - u_w)_f \tan \varphi_b) N_c$$

Donde S_u es la resistencia al corte no drenado, $(u_a - u_w)_f$ es la succión final obtenida de la curva de retención de humedad (SWCC) y $N_c = 5,14$ es el factor de capacidad portante.

Para simular el efecto de la succión en la capacidad portante de una cimentación superficial, se hicieron cálculos teóricos de capacidad portante para las muestras de suelo ISS, IO y ISW, sometidas al proceso de desecación mencionado previamente. Los cálculos se efectuaron utilizando la ecuación (2). Considerando un valor de $S_u = 70$ kPa (Mendoza, 2021) para una condición saturada se obtiene la resistencia última del suelo, incluyendo el efecto de la succión.

A renglón seguido se muestra la variación de la capacidad portante del suelo para una cimentación superficial cuadrada. Se evidencia un incremento del 51,4 % de la capacidad portante en el suelo del ensayo ISW, comparado con las muestras ISS (tabla 3).

Tabla 3

Capacidad portante de una cimentación superficial considerando el efecto de la succión

Ensayo	Succión matricial s (kPa)	Capacidad portante q_u (kPa)
ISS-50-100-200	0	359,8
ISW-50-100-200	400	544,7

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recopilados para un proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana.

CONCLUSIONES

Los suelos derivados de cenizas volcánicas están ampliamente presentes en el territorio colombiano. A pesar de esto y de la complejidad en su comportamiento, los estudios relacionados en los que se considera el efecto de la succión son limitados. En la investigación realizada, se llevaron a cabo ensayos de corte simple en muestras de suelos derivados de cenizas volcánicas de Colombia, sometidas a diferentes niveles de succión. Como resultado, se obtienen las siguientes conclusiones principales:

- Los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan un tamaño de partículas que los clasifica como suelos finos; sin embargo, se caracterizan por tener ángulos de fricción elevados. En los ensayos hechos no se observó una variación significativa del ángulo de fricción con respecto al incremento de la succión matricial. No obstante, se determinó un ángulo de fricción $\varphi_b = 11,2^\circ$ debido al efecto de la succión para valores de esfuerzos normales superiores a 50 kPa.
- Las características de retención de agua de estos suelos generan que los cambios en el contenido de humedad ocasionen variaciones considerables en la succión. Como resultado de esto, la capacidad portante de una cimentación superficial aumenta en un 51,4 % a causa del incremento de la succión.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá, por financiar esta investigación mediante el proyecto de la Facultad de Ingeniería ID 21344, denominado “Estudio de cargas cíclicas en suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia”.

Autoría

C. Lozada se encargó de la redacción del documento técnico y diseñó el modelo de análisis utilizado.

C. Mendoza contribuyó a la redacción del documento técnico y al diseño del modelo de análisis empleado.

H. Vacca ayudó con el análisis técnico de resultado y consultante en ensayos de laboratorio.

E. Guacaneme proporcionó los ensayos de laboratorio.

Los autores declaran no tener conflicto de intereses en relación con este artículo.

REFERENCIAS

- Caicedo, B., Tristanco, J., Thorel, L., y Leroueil, S. (2014). Experimental and analytical framework for modelling soil compaction. *Engineering Geology*, 175, 22-34.
- Delage, P., y Cui, Y. (1996). Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, 46(2), 291-311. <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.2.291>
- Forero-Dueñas, C., Gálvez, E., Fino, W., y Ulloa, E. (1999). Estudios de la estructura de las cenizas volcánicas de Armenia y su relación con el comportamiento geotécnico. *X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Boletín Colombiano de Geotecnia. Sociedad Colombiana de Geotecnia*.
- Fredlund, D. G. (1979). Second Canadian Geotechnical Colloquium: appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1), 121-139.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., y Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321.
- Hernández, O., Cordão Neto, M. P., y Caicedo, B. (2018). Structural features and hydro-mechanical behaviour of a compacted andesitic volcanic soil. *Geotechnical Letters*, 8(3), 195-200. <https://doi.org/10.1680/jgele.18.00056>
- Herrera, M. C., Lizcano, A., y Santamarina, J. C. (2007). Colombian volcanic ash soils [datos no completos para cita formal].
- Lizcano, A., Herrera, M. C., y Santamarina, J. C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia [volcanic ash soils in Colombia]. *Accidente e Infraestructura Civil*, 6(2), 167.
- Lozada, C., Thorel, L., y Caicedo, B. (2019). Bearing capacity of circular footings resting on unsaturated desiccated soils. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 19(3), 154-166.
- Mendoza, C., Ramos, R. A., y Calle, O. C. (2021). Seismic evaluation of a profile of volcanic ash from the South American Andes. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering*, 12(1), 40-60. <https://doi.org/10.4018/IJGEE.2021010104>
- Oh, W. T., y Vanapalli, S. K. (2008). Modelling the stress versus settlement behavior of model footings in saturated and unsaturated sandy soils. *Proceedings*, 1-6 [falta nombre de congreso o revista].
- Pereira, J. H., Fredlund, D. G., Cardão Neto, M. P., y Gitirana, G. F. (2005). Hydraulic behavior of collapsible compacted gneiss soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10), 1264-1273. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:10\(1264\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1264))
- Sepúlveda, S. A., Petley, D. N., Brain, M. J., y Tunstall, N. (2016). The effect of dynamic loading on the shear strength of pyroclastic ash deposits and implications for landslide hazard: the case of Pudahuel Ignimbrite, Chile. *Engineering Geology*, 205, 54-61.
- Vanapalli, S. K., y Mohamed, F. M. O. (2013). Bearing capacity and settlement of footings in unsaturated sands. *International Journal of Geomate*, 5(1), 595-604.
- Vanapalli, S. K., y Vanapalli, W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379-392.
- Vanapalli, S., y Fredlund, D. G. (2007). Mechanics of unsaturated soils for the design of foundation structures. *Conference Engineering Mechanics Structures* (pp. 363-377).
- Vanapalli, S., y Oh, W. (2008). Modeling the stress versus settlement behavior of model footings in saturated and unsaturated sandy soils. *Geotechnical Letters*, 1, 1-6.
- Vásquez-Varela, L. R., y Mendoza, C. (2021, November). Implications of physical and chemical changes in volcanic ash soils related to road construction. *Journal of Physics: Conference Series*, 2118(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2118/1/012012>