

RESEARCH ARTICLE

Análisis Tenso-Deformacional Del Talud Ubicado En La Avenida Mariscal Sucre Sector La Comuna

Erick Avellán¹  Jorge Carrera¹  Diego Sánchez¹ 

¹ Universidad Central de Ecuador, Avenida Universitaria 170521, Quito – Ecuador.



Correspondencia: dmsanchezo@uce.edu.ec



+ 593 99 254 0970

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj62090>

Resumen: La estabilidad de taludes es una actividad muy importante en la prevención de deslizamiento de tierra. Un deslizamiento, si se produce en una zona urbana, puede provocar pérdidas económicas y humanas. El presente estudio aborda la problemática de la estabilidad del talud ubicado en el tramo de la Av. Mariscal Sucre comprendido entre la vía de acceso al teleférico y el acceso al túnel de San Juan bajo diferentes condiciones de saturación y la incidencia de un evento sísmico. El objetivo principal está enfocado en investigar el comportamiento mecánico del suelo bajo diferentes factores desencadenantes de deslizamiento. Se tomaron muestras alteradas e inalteradas que fueron posteriormente procesadas en laboratorio, se obtuvo una clasificación del material que constituye el cuerpo del talud, así como sus propiedades mecánicas responsables de su resistencia al esfuerzo cortante. Una vez realizado el análisis se llegó a la conclusión que el contenido de humedad y el factor sísmico son la combinación crítica capaz de llevar al talud a un estado de equilibrio límite e incluso provocar la falla de este.

Palabras claves: Talud, estabilidad, desencadenante, evento sísmico, deslizamiento



Check for updates

Cita: Avellán, E., Carrera, J., & Sánchez, D. (2023). Análisis Tenso-Deformacional Del Talud Ubicado En La Avenida Mariscal Sucre Sector La Comuna. Green World Journal, 06(03), 090. <https://doi.org/10.53313/gwj62090>

Received: 11/aug /2023

Accepted: 31/oct /2023

Published: 01/nov /2023

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.

Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial

editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



Tensile-Deformational Analysis of the Slope Located on Mariscal Sucre Avenue, La Comuna

Abstract: Slope stability is a very important activity in preventing landslides.

A landslide, if it occurs in an urban area, can cause economic and human

losses. The present study addresses the problem of the stability of the slope located in the section of Av. Mariscal Sucre included between the access road to the cable car and the access to the San Juan tunnel under different saturation conditions and the incidence of a seismic event. The main objective is focused on investigating the mechanical behavior of the soil under different landslide triggering factors. Altered and unaltered samples were taken and subsequently processed in the laboratory, a classification of the material that constitutes the body of the slope was obtained, as well as its mechanical properties responsible for its resistance to shear stress. Once the analysis was carried out, it was concluded that the moisture content and the seismic factor are the critical combination capable of bringing the slope to a state of limit equilibrium and even causing its failure.

Keywords: Slope, stability, trigger, seismic event, landslide.

© 2023 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license. Creative Commons Attribution (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

1. Introducción

La ciudad de Quito, Ecuador, está rodeada de laderas, al finalizar el año 2021 y durante el año 2022 ocurrieron deslizamientos de tierra en laderas que colindan con varias avenidas perimetrales de la ciudad [1] [2] [3]. Este fenómeno es capaz de ocasionar graves daños a la propiedad pública como a la privada y en eventos extremos puede traer consigo consecuencias fatales. La susceptibilidad para que ocurra un deslizamiento está condicionado principalmente por la erosión del suelo, acciones antrópicas, superficies de falla de deslizamientos previos, movimientos sísmicos, entre otros [4].

Las carreteras construidas en zonas muy accidentadas provocan que se presenten taludes de pendientes pronunciadas [2]. Gran parte de los taludes que colindan con las principales avenidas perimetrales de la ciudad comparten una geometría y configuración geotécnica similar, Peñafiel [3] indica que la ciudad de Quito al estar rodeada de volcanes es lógico que gran parte del suelo esté conformado por materiales del mismo origen considerados como suelos rígidos. Los suelos rígidos (cangahuas), en estado seco son mucho más resistentes que en un estado elevado de humedad, por lo que se llega a inferir que el material pierde resistencia en la medida que el contenido de humedad en su estructura aumenta [6].

A lo largo de la avenida Mariscal Sucre son notables los deslizamientos localizados a lo largo del cuerpo del talud, lo que refleja la susceptibilidad de una futura falla de una escala mayor. Para el desarrollo de este estudio se eligieron las zonas con deslizamientos localizados considerables y en donde la erosión de la superficie era más evidente. Con las condiciones anteriores, en conjunto con la alta incidencia de precipitaciones al año y por el alto peligro sísmico, la zona definida para el análisis reúne las características propicias para ser considerada como crítica para la ocurrencia de un deslizamiento de tierra importante que afecte a los usuarios de la infraestructura vial.

Considerando todos los factores expuestos anteriormente surge la necesidad de responder la pregunta: ¿Cuál de los siguientes desencadenantes: sismicidad, deterioro y contenido de humedad, ¿será capaz de provocar la pérdida de estabilidad del talud localizado en la avenida Mariscal Sucre? Para responder a esta interrogante se planteó realizar un análisis del comportamiento del suelo que conforma el cuerpo del talud considerado en este estudio. Para alcanzar este propósito se realizaron ensayos de laboratorio con el fin de establecer la clasificación del suelo y la resistencia característica al esfuerzo cortante. Con los resultados obtenidos se realizó el análisis de estabilidad para diferentes estados de acción de los desencadenantes mencionados.

Durante la recopilación de resultados y considerando los parámetros de clasificación y resistencia al corte del suelo surge la hipótesis que posiblemente el factor sísmico, el deterioro o el contenido de humedad será el desencadenante crítico responsable de la pérdida de estabilidad que traerá como consecuencia el deslizamiento de una importante masa de suelo del talud. Con toda la información recopilada durante el desarrollo de este proyecto hemos llegado a resultados determinantes sobre la incidencia de los principales agentes desestabilizadores y su incidencia sobre la estabilidad del talud, objeto de este estudio.

2. Materiales y métodos

Esta investigación presenta tres etapas. La primera etapa corresponde al trabajo de campo, en esta etapa se obtienen las muestras de suelo presentes en el talud. La segunda etapa corresponde a los ensayos de laboratorio requeridos para obtener los parámetros de suelo necesarios para el análisis. La tercera etapa corresponde al análisis del talud usando los datos recopilados en las dos primeras etapas.

2.1. Reconocimiento de la zona de estudio

La zona delimitada para el desarrollo de este estudio abarca una longitud total de 2000 metros comprendidos entre el acceso al teleférico de Quito y el acceso al túnel de San Juan. De acuerdo con los estudios realizados por Aguiar [4] el suelo de la zona puede clasificarse como un material de resistencia media de origen volcánico conformado, en gran parte, por suelos rígidos. Para el desarrollo de este proyecto de investigación se realizó un recorrido en esta zona.

Durante el recorrido se observaron secciones del talud en donde habían ocurrido deslizamientos previos, esta fue la principal condición para establecer una sección como crítica para su posterior análisis. Bajo este criterio se tomaron 5 secciones críticas del talud donde se notaba el alto grado de erosión de la superficie y un perfil topográfico irregular. La ubicación de las secciones críticas se muestra en la figura 1 y en la figura 2.



Figura 1. Secciones críticas 1 al 4 del talud con alto nivel de deterioro y deslizamientos localizados previos.



Figura 2. Sección crítica 5 del talud con alto nivel de deterioro y deslizamientos localizados previos.

2.2. Toma de muestras alteradas

Una vez definidas las secciones críticas del talud se tomaron muestras de suelo alteradas por debajo de la capa vegetal, aproximadamente 20 cm por debajo de la capa superficial. Se tomaron un total de 17 muestras alteradas a lo largo de todo el cuerpo del talud en las secciones críticas seleccionadas.

2.3. Toma de muestras inalteradas

En base a una clasificación preliminar del suelo se decidió tomar un bloque de suelo inalterado (Figura 3) en la parte superior e inferior en cada una de las secciones críticas del talud. Con método de calicata a cielo abierto.



Figura 3. Extracción y moldeado in-situ de bloque de suelo inalterado.

2.4. Clasificación SUCS del suelo

De acuerdo con Das [5], el análisis mecánico del suelo consiste en determinar los diferentes tamaños de partículas del suelo. Se realizó el análisis granulométrico del suelo por medio de tamizado mecánico en base a la norma ASTM D6913-17 [6]. Seguido se realizó la prueba de los límites de plasticidad del suelo con la copa de Casagrande en base a la norma ASTM D4318-18 [7].

2.5. Gravedad específica del suelo

Para determinar la gravedad específica de los sólidos se usaron picnómetros normalizados con capacidad de 250 ml, se realizó la prueba en base a la normativa ASTM D854-14 [8]. Durante la clasificación del suelo se presentaron casos de frontera que categorizaban al suelo como limo y/o arcilla. Por esta razón se realizó el estudio de hidrometría para constatar el contenido de partículas de arcilla en los casos de frontera. Esta prueba se realizó en base a la normativa ASTM D7928-17 [9].

2.6. Ensayo de corte directo

Debido a la baja cohesión del suelo, varias no fue posible moldear probetas cilíndricas para la ejecución de un ensayo triaxial. Por este motivo se optó por realizar un ensayo de corte directo para determinar las propiedades mecánicas de las muestras inalteradas de suelo. La prueba se realizó para esfuerzos de confinamiento de 0.5, 1 y 2 kg/cm² en base a la normativa ASTM D3080-04 [10].

Debido a las condiciones de cohesión de una de las muestras fue posible realizar el moldeado de probetas cilíndricas (Figura 4) de dimensiones adecuadas para el ensayo de corte triaxial. Al igual que en el ensayo de corte directo la prueba se realizó para esfuerzos de confinamiento de 0.5, 1 y 2 kg/cm² tomando como referencia la normativa ASTM D2850-15 [11].



Figura 3. Extracción y moldeo in-situ de bloque de suelo inalterado.

2.7. Análisis de estabilidad usando software

Con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el laboratorio se realizó el análisis de estabilidad de talud usando la herramienta informática GEO5 (Figura 5). Para el análisis de estabilidad de taludes se consideraron los métodos propuestos de Janbu, Spencer y Sarma [12]. En una evaluación preliminar de la estabilidad, se consideró el método de Bishop. Este arrojó resultados erróneos por a la topografía irregular del talud [13]. Debido a esta irregularidad, se cambió la superficie de falla, de una circular a una poligonal. La superficie de falla poligonal considera la topografía irregular del terreno y las superficies de falla de los deslizamientos previos en cada una de las secciones en estudio.

Para considerar el efecto de la fuerza sísmica, se aplicó el método de Mononobe Okabe para determinar los factores de aceleración horizontal y vertical. En base a lo que establece la AASHTO [14] se utilizaron las ecuaciones (1) y (2):

$$Kh = \frac{2}{3} * a_g * Fa \quad (1)$$

En donde Kh es el factor de aceleración horizontal del sismo, ag es el factor de aceleración del sitio, Fa es el valor máximo de amplitud del sismo en función del tipo de suelo

$$Kv = \frac{4}{9} * a_g * Fa \quad (2)$$

En donde Kv es el factor de aceleración vertical del sismo, ag es el factor de aceleración del sitio, Fa es el valor máximo de amplitud del sismo en función del tipo de suelo.

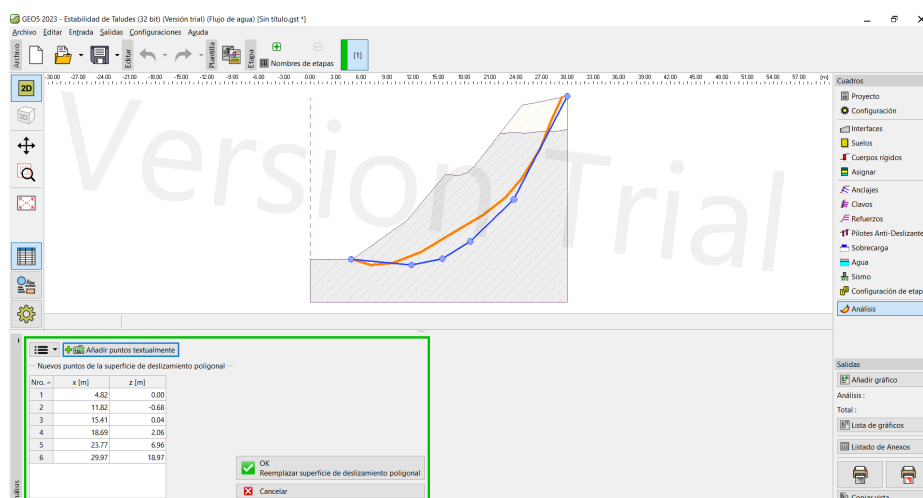


Figura 5. Modelación de una de las secciones críticas del talud utilizando la herramienta informática GEO5.

3. Resultados

Procesadas cada una de las muestras alteradas tomadas en las secciones críticas del talud se categorizó al material como un limo de baja compresibilidad (ML) con moderado contenido de arena. Durante la realización del ensayo granulometría por tamizado todas las muestras ensayadas presentaron un material pasante en masa, por el tamiz N°200, en un rango de entre 50 a 80% del total de material tamizado. Esto indica que efectivamente se trata de un suelo compuesto por gran parte de material fino. Realizada la prueba de límites de consistencia del suelo con la copa de Casagrande el índice de plasticidad de las muestras en rangos que oscilan entre el 1.48% hasta el 6.96%. Bajo estos resultados y según la carta de plasticidad de Casagrande [15] se categoriza al suelo como un ML. Sin embargo, en 4 casos de las muestras (L2M2, L3M3, L4M4, L5M1) procesadas se presentó un caso de frontera que clasificaba al suelo como una arcilla de baja compresibilidad (CL). Por esta razón se realizó la prueba de hidrometría para comprobar el contenido de partículas de arcilla en las muestras mencionadas. El resultado fue concluyente ya que el máximo contenido de arcilla encontrado en las muestras fue de un 7%. En la tabla 1 se presenta un resumen de los tipos de suelo que conforman el talud en estudio.

Esta sección puede dividirse por subtítulos. Debe proporcionar una descripción concisa y precisa de los resultados experimentales, por lo general responderá a su hipótesis, objetivo o problema.

Tabla 1. Clasificación SUCS de muestras alteradas del talud ubicado en la Av. Mariscal Sucre.

Clasificación de SUCS de Suelo		
Lugar	Código	SUCS
L1	L1M1	SM
	L1M2	ML
	L1M3	ML
	L1M4	ML
L2	L2M1	ML
	L2M2	ML
	L2M3	ML
	L2M4	ML
L3	L3M1	ML
	L3M2	ML
	L3M3	ML
L4	L4M1	ML
	L4M2	ML
	L4M3	ML
L5	L4M4	ML
	L5M1	ML
	L5M2	ML

Con las muestras inalteradas se calculan las relaciones fundamentales del suelo (Tabla 2). Se obtiene el peso específico de las partículas sólidas, este valor está en un rango de 2.52 a 2.60. Por otra parte, el suelo en condiciones de humedad natural presenta un grado de saturación que oscila entre 20 % y el 57% que representa el porcentaje de ocupación de líquido en los espacios vacíos del suelo.

Tabla 2. Relaciones fundamentales del suelo del talud en estudio.

Lugar	Código	γ_w g/cm ³	Gravedad Específica Gs	Relación de Vacíos e	Porosidad n	Contenido de Humedad %	Grado de Saturación %
L1	L1MI-1	1.26	2.58	1.49	0.6	12.12	20.94
	L1MI-2	1.26	2.59	1.17	0.54	5.41	12.01
L2	L2MI-1	1.39	2.6	0.89	0.47	13.58	39.77
	L2MI-2	1.57	2.6	0.83	0.45	9.28	29.1
L3	L3MI-1	1.66	2.53	0.98	0.49	21.92	56.69
	L3MI-2	1.66	2.55	1.32	0.57	18.84	36.55
L4	L4MI-1	1.44	2.56	1.02	0.5	13.7	34.36
	L4MI-2	1.34	2.56	1.07	0.52	16.54	39.49
L5	L5MI-1	1.25	2.54	1.35	0.57	15.52	29.24
	L5MI-2	1.27	2.52	1.34	0.57	18.04	33.86

Una vez realizados los ensayos de corte directo y compresión triaxial se obtiene el ángulo de fricción interna, su valor varía entre 24° y 36°. Como se puede observar en la tabla 3 el suelo es poco cohesivo, esta es la razón por la que no fue posible moldear probetas cilíndricas, a excepción de la muestra L1MI-3 que presenta una cohesión elevada.

Tabla 3. Resistencia al cortante del suelo.

Código	Angulo fricción interna °	Cohesión kPa
L1MI-1	34.94	12.69
L1MI-2	32.7	4.88
L2MI-1	31.1	22.94
L2MI-2	24.84	20.65
L3MI-1	36	301.06
L3MI-2	36	301.06
L4MI-1	28.3	15.2
L4MI-2	31.9	14.34
L5MI-1	27.3	20.94
L5MI-2	31.4	12.62

Con los resultados obtenidos se efectúa el análisis de estabilidad en condiciones estáticas. El análisis muestra que el talud es capaz de mantener su estabilidad aun cuando la saturación toma valores entre el 50% y 75 % o cuando el suelo está completamente saturado. Esto indica que la condición estática, aun aumentando el contenido de agua en la estructura del suelo, no desencadenaría un deslizamiento de la masa de tierra. En la tabla 4 se presentan los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los perfiles en estudio.

Tabla 4. Análisis estático de estabilidad del talud para diferentes grados de saturación.

FACTORES DE SEGURIDAD A DIFERENTES GRADOS DE SATURACION

Sección en estudio	Método de análisis	Perfil en estado natural	Grado de saturación al 75%	Grado de saturación al 100%
		F.S.	F.S.	F.S.
Perfil 1	F.S. Janbu	1.39	1.35	1.34
	F.S. Spencer	1.38	1.34	1.32
	F.S. Sarma	1.36	1.31	1.29
	F.S. Crítico	1.36	1.31	1.29
	Análisis	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Perfil 2	F.S. Janbu	1.39	1.34	1.31
	F.S. Spencer	1.4	1.34	1.31
	F.S. Sarma	1.65	1.54	1.48
	F.S. Crítico	1.39	1.34	1.31
	Análisis	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Perfil 3	F.S. Janbu	7.35	6.74	6.38
	F.S. Spencer	7.05	6.34	5.98
	F.S. Sarma	8.64	8.33	7.87
	F.S. Crítico	7.05	6.34	5.98
	Análisis	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Perfil 4	F.S. Janbu	1.47	1.43	1.42
	F.S. Spencer	1.33	1.29	1.27
	F.S. Sarma	1.45	1.38	1.35
	F.S. Crítico	1.33	1.29	1.27
	Análisis	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Perfil 5	F.S. Janbu	1.7	1.63	1.59
	F.S. Spencer	1.65	1.57	1.54
	F.S. Sarma	1.61	1.53	1.5
	F.S. Crítico	1.61	1.53	1.5
	Análisis	Aceptable	Aceptable	Aceptable

A continuación, se realiza el análisis pseudoestático, según los resultados obtenidos la condición crítica, capaz de provocar un deslizamiento de tierra, es bajo una acción sísmica, independientemente del grado de saturación del suelo, estos resultados se presentan en la tabla 5. Bajo estos efectos el talud alcanza un factor de seguridad muy cercano a la unidad lo que indica el estado límite de equilibrio.

Tabla 5. Análisis pseudoestático de estabilidad del talud para diferentes grados de saturación.

FACTORES DE SEGURIDAD A DIFERENTES GRADOS DE SATURACION (ANALISIS PSEUDOESTATICO)				
Sección en estudio	Método de análisis	Perfil en estado natural	Grado de saturación al 75%	Grado de saturación al 100%
		F.S.	F.S.	F.S.
Perfil 1	F.S. Janbu	0.99	0.97	0.96
	F.S. Spencer	0.97	0.95	0.93
	F.S. Sarma	0.93	0.89	0.87
	F.S. Crítico	0.93	0.89	0.87

	Análisis	No Aceptable	No Aceptable	No Aceptable
Perfil 2	F.S. Janbu	1.06	1.03	1.01
	F.S. Spencer	1.05	1.02	0.99
	F.S. Sarma	1.15	1.09	1.04
	F.S. Crítico	1.05	1.02	0.99
	Análisis	Aceptable	Aceptable	No Aceptable
Perfil 3	F.S. Janbu	6.93	6.68	6.32
	F.S. Spencer	6.73	6.51	6.16
	F.S. Sarma	7.98	7.69	7.25
	F.S. Crítico	6.73	6.51	6.16
	Análisis	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Perfil 4	F.S. Janbu	1.15	1.13	1.12
	F.S. Spencer	1	0.95	0.94
	F.S. Sarma	1.03	0.97	0.95
	F.S. Crítico	1	0.95	0.94
	Análisis	No Aceptable	No Aceptable	No Aceptable
Perfil 5	F.S. Janbu	1.27	1.22	1.2
	F.S. Spencer	1.16	1.1	1.07
	F.S. Sarma	1.12	1.05	1.02
	F.S. Crítico	1.12	1.05	1.02
	Análisis	Aceptable	Aceptable	Aceptable

4. Discusión y Conclusiones

Realizada la caracterización de las propiedades físicas de las distintas muestras alteradas de suelo tomadas en diferentes puntos del talud, se determinó que el talud ubicado entre el acceso al teleférico y el ingreso al túnel de San Juan en la Av. Mariscal Sucre está conformado principalmente por suelos limosos con moderado contenido de arena y escaso contenido de partículas de arcilla. El suelo que conforma el cuerpo del talud en estudio se clasificó, basado en el sistema de clasificación SUCS, como un limo de baja compresibilidad (ML) y es el material predominante en la estructura del talud.

El análisis del contenido de humedad y grado de saturación de las muestras de suelo evidencia que en la mayor parte de las superficies tomadas para este estudio el volumen de vacíos no es ocupado en gran medida por agua, esto se debe a la infiltración. Este efecto se produce por capa vegetal del talud y el efecto de las raíces dentro del estrato de suelo.

Según la investigación de laboratorio para la determinación de las propiedades resistentes al esfuerzo cortante de las muestras inalteradas tomadas del talud se han obtenido valores de cohesión y ángulo de fricción interna que se encuentran dentro de los rangos típicos de suelos con alto contenido de limo. Esto corrobora la clasificación SUCS elaborada como primer paso de este proyecto de investigación y se puede asegurar que la estructura del talud está gobernada por material limoso.

Los perfiles 3 y 5 son los más estables del estudio ya que superan la frontera de $F.S. = 1.5$. El perfil 3 debe su estabilidad a la alta cohesión que presenta la estructura del suelo que conforma el perfil. El perfil 5 debe su estabilidad a su baja altura e inclinación menor pronunciada. Sin embargo, los demás perfiles analizados se encuentran aún en condiciones aceptables de estabilidad ya que el $F.S.$ supera la unidad. Con esto se puede concluir que el contenido de humedad en la estructura interna del suelo no es el desencadenante crítico de un movimiento de tierra.

Bajo condiciones naturales, sin considerar el efecto sísmico, se puede asegurar que el talud es estable manteniendo factores de seguridad mayores a la unidad. Lo que demuestra que el contenido de humedad no es el desencadenante que puede provocar un deslizamiento de tierra.

Si se considera la humedad del terreno y la condición sísmica se obtienen factores de seguridad cercanos a la unidad o por debajo de esta. Esto muestra que la condición crítica desencadenante es la combinación del contenido de humedad y el factor sísmico para un posible deslizamiento de tierra.

La condición topográfica del talud no permite analizarlo usando una superficie de falla circular por el método de Bishop, esto debido a que se presentan superficies de falla localizadas en todos los taludes, provocando que el perfil de cada uno de los taludes sea bastante irregular. Esto afecta al resultado del análisis del talud hecho con una superficie de falla circular con el método de Bishop, ya que este método divide dicha superficie en dovelas con forma de trapecios rectos despreciando gran parte de la superficie de falla real. Por esta razón, se ha considerado una superficie de falla poligonal con un análisis hecho por los métodos de Janbu, Spencer y Sarma, los cuales, si consideran la superficie de falla total, sea esta irregular o no.

La vegetación tiene efectos beneficiosos que aportan estabilidad al talud y efectos adversos que aportan a la inestabilidad. En este estudio, el aporte de la vegetación a la estabilidad del talud no es un parámetro que pueda modelarse ya que no existen actualmente herramientas que permitan hacerlo con un alto grado de certeza.

Financiamiento: La investigación no fue financiada por ninguna entidad.

Conflictos de interés: Los autores declaran la no existencia de conflicto de interés alguno.

Referencias

- [1] El Comercio. (2021, Diciembre) [Online]. <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/deslizamiento-tierra-la-bota-quito.html>
- [2] Expreso. (2021, Diciembre) [Online]. <https://www.expreso.ec/quito/lluvias-provocan-deslizamientos-tierra-sectores-117359.html>
- [3] Euronews. (2022, febrero) [Online]. <https://es.euronews.com/2022/02/01/ecuador-inundaciones-deslizamiento>
- [4] Luis Escobar and Yamile Valencia. (2012, Junio) Scielo. [Online]. <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n31/n31a04.pdf>
- [5] Adan Prado, Juan Aguilar, and Rinath Cruz, *Análisis de estabilidad de talud de la carretera NIC.7 en el km 176, municipio de Santo Tomas, del departamenteo Chontales*. Managua: UNAN, 2020.
- [6] Lilia Peñafiel, *Geología y análisis del recurso hídrico subterráneo de la subcuenca del sur de Quito*. Quito, Ecuador : Escuela Politécnica Nacional, 2009. [Online]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1147>
- [7] Roberto Aguiar, *Microzonificación sísmica de Quito*. Quito: ESPE, 2013.
- [8] Braja Das, *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*, Cuarta ed. México: CENGAGE Learning, 2015.
- [9] ASTM D6913-17. (2017) Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. [Online]. <https://www.astm.org/d6913-04r09e01.html>
- [10] ASTM D4318-18. (2018) Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. [Online]. <https://www.astm.org/d4318-17.html>
- [11] ASTM D854-14. (2014) Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. [Online]. <https://www.astm.org/d0854-14.html>
- [12] ASTM D7928-17. (2017) Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. [Online]. <https://www.astm.org/d7928-17.html>

- [13] ASTM D3080-04. (2004) Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. [Online]. <https://www.astm.org/d3080-04.html>
- [14] ASTM D2850-15. (2015) Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. [Online]. <https://www.astm.org/d2850-15.html>
- [15] Filippo Catanzariti. (2018, junio) GeoStru. [Online]. [https://www.geostru.eu/blog/2016/06/13/estabilidad-de-taludes/?lang=es#:~:text=M%C3%A9todo%20de%20Spencer%20\(1967\),i%3D1%E2%80%A6n](https://www.geostru.eu/blog/2016/06/13/estabilidad-de-taludes/?lang=es#:~:text=M%C3%A9todo%20de%20Spencer%20(1967),i%3D1%E2%80%A6n)
- [16] Universidad Industrial de Santander. (2017) Método de Bishop y ejemplos. [Online]. <https://www.studocu.com/gt/document/universidad-industrial-de-santander/estabilidad-de-taludes/metodo-de-bishop-y-ejemplos/2628678>
- [17] AASHTO, *AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS*. Washington D.C., 2014.
- [18] Mauricio Bernal. (2018, noviembre) Carta de plasticidad de Casagrande. [Online]. <https://www.researchgate.net/publication/3K58jU9jmt1JRuYcDcmXWky8CyvW79pq1qxePi72FucuiGhUuKnTTThKqhV4npsciGstSpAa1XdrrBPs/citation/download>



© 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>