

Probabilistic analysis of slope stability in completely decomposed granite residual soils

Evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en suelos residuales de granito completamente descompuesto

W. Fernández *, S. Villalobos ^{1*}, R. King *

* Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción. CHILE

Fecha de Recepción: 24/10/2017

Fecha de Aceptación: 06/03/2018

PAG 05-14

Abstract

The effects of physical and chemical weathering processes in completely decomposed granitic rocks strongly condition the shear strength parameters commonly used in soil mechanics, where soils have high variability. The technological progress and the joint use of deterministic and probabilistic methods allow for the incorporation of soil variability within the calculations. This paper presents a probabilistic slope stability analysis using a model of random variables to characterize the shear strength parameters. The Monte Carlo simulation is used for generating the values of the random variables, which also allows for the simultaneous evaluation of slope stability in terms of the factor of safety, probability of failure and reliability index. The results of this methodology tend to be more conservative, considering the risk of using average safety factors to evaluate stability when considering the variability of soil properties.

Keywords: Residual soil, Monte Carlo simulation, slope stability, factor of safety, probability of failure, reliability index

Resumen

Los efectos de los procesos de meteorización física y química que han sufrido las rocas graníticas completamente descompuestas condicionan fuertemente los parámetros de resistencia al corte utilizados comúnmente en la mecánica de suelos, siendo suelos que presentan una alta variabilidad. Con el avance de la tecnología, el uso conjunto de métodos determinísticos y probabilísticos permite la incorporación de la variabilidad del suelo dentro de los cálculos. En este artículo se presenta un análisis probabilístico de estabilidad de taludes utilizando un modelo de variables aleatorias para caracterizar los parámetros resistentes. Para la generación de valores de las variables aleatorias se utiliza la simulación de Monte Carlo la cual además permite la evaluación simultánea de la estabilidad del talud en términos de factor de seguridad, probabilidad de falla e índice de confiabilidad. Los resultados de esta metodología tienden a ser más conservadores, considerándose bastante riesgoso la utilización de factores de seguridad medios para evaluar la estabilidad cuando se considera la variabilidad de las propiedades del suelo.

Palabras clave: Suelo residual, simulación de Monte Carlo, estabilidad de taludes, factor de seguridad, probabilidad de falla, índice de confiabilidad

1. Introducción

En muchas obras de ingeniería civil se necesita ejecutar taludes temporales y permanentes, por ejemplo, en excavaciones para edificios, cortes abiertos para carreteras, embalses de suelo, terraplenes. Por lo tanto, es de interés evaluar la estabilidad de taludes contra posibles fallas por deslizamiento. El método de diseño determinístico comúnmente usado en ingeniería geotécnica se caracterizan por tener una gran incertidumbre de las variables consideradas. Las propiedades del suelo varían de una ubicación a otra y también pueden cambiar con el tiempo, de modo que la información obtenida para una ubicación no asegurara la información en ningún otro lugar. La incertidumbre también surge de la estimación de la propiedad de resistencia al corte del suelo *in-situ* (cohesión y ángulo de fricción interna) basada en los resultados de ensayos de laboratorio. En tales ensayos, las condiciones reales del terreno no siempre pueden ser reproducidas perfectamente, por ejemplo, por los cambios en el sistema de carga, perturbaciones durante el muestreo, anisotropía, presión de poros, etc. (Tang et al., 1976). Luego, el método determinístico, para hacer frente a esta gama de incertidumbres aplica factores de seguridad de diseño, los que dependiendo del caso pueden ser parciales o globales.

Desde 1975 en adelante se han desarrollado métodos probabilísticos complementarios al método determinístico para evaluar la estabilidad de taludes. El método determinístico se basa en minimizar el factor de seguridad en un rango de potenciales superficies de falla, determinando así la superficie del factor de seguridad mínimo, conocida como la superficie de deslizamiento crítica. Por otro lado, un método probabilístico comúnmente usado determina la confiabilidad de un talud basándose en el cálculo de la probabilidad de falla e índice de confiabilidad, correspondientes a la superficie de deslizamiento crítica. El análisis probabilístico también puede ser realizado para superficies de deslizamiento arbitrarias, es decir, considerando diferentes superficies específicas de deslizamiento no asociadas con el factor de seguridad o índice de confiabilidad mínimos (Bhattacharya et al., 2003).

Varias metodologías probabilísticas han sido desarrolladas incorporando las incertidumbres en el análisis de estabilidad de taludes, tales como el método de primer orden (FORM), el método de primer orden segundo momento (FOSM), el método de superficies de respuesta (RSM) y la simulación de Monte Carlo (MCS), entre otras (Baecher y Christian, 2003). Este último método ha ganado popularidad debido a su robustez y simplicidad conceptual (Wang et al., 2010), el cual genera una gran cantidad de valores aleatorios, dentro de un rango y según una distribución de probabilidad, para los parámetros considerados en el análisis, y posteriormente evalúa la estabilidad en términos de probabilidad de falla (Reale et al., 2015).

¹ Autor de Correspondencia:

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.
E-mail: svillalobos.ic@gmail.com



Basándose en datos de laboratorio y de terreno, este estudio busca demostrar la aplicación de técnicas probabilísticas para evaluar la estabilidad y potencial falla de taludes en suelos residuales de granito completamente meteorizado, particularmente de la zona de Concepción. Usando un método de equilibrio límite e incorporando explícitamente la variabilidad de las propiedades de resistencia al corte del suelo residual a través del uso de datos generados por la simulación de Monte Carlo, es evaluada de forma probabilística la estabilidad de taludes, obteniéndose la probabilidad de falla y el índice de confiabilidad para distintas geometrías de talud.

2. Suelo residual de granito

En los últimos años, la ciudad de Concepción se caracteriza por desarrollar proyectos inmobiliarios y de infraestructura en zonas con suelos residuales, principalmente formados por la descomposición de rocas graníticas. Varios investigadores han estudiado de forma experimental las propiedades de resistencia al corte y el comportamiento de taludes en estos tipos de suelos (Ruiz, 2002; Cabrera, 2007;

Villalobos, 2011; Villalobos et al., 2013; Rodríguez, 2015; Flandes, 2017).

En los suelos residuales, las variaciones en la mineralogía y el tamaño de grano de la roca madre y el proceso de meteorización química, desintegración física, alteración hidrotermal y lixiviación dan como resultado suelos heterogéneos, lo cual es una fuente importante de incertidumbre para la estimación de las propiedades de resistencia al corte y en la identificación de posibles mecanismos de falla en taludes (El-Ramly et al., 2005).

La Figura 1 muestra la unidad geológica presente en la ciudad de Concepción que corresponde a una roca ígnea intrusiva altamente meteorizada que forma parte del batolito Costero. Esta roca granítica paleozoica tiene entre 250 y 570 millones de años y es el resultado de la actividad tectónica causada por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa suramericana. La meteorización ha destruido la unión entre los granos minerales y ha transformado una roca con alta resistencia mecánica en bloques desintegrados de suelo residual, conocido localmente como Maicillo. Este tipo de suelo es muy complejo de analizar, ya que es difícil determinar si se comportará como una roca o un suelo, o una combinación de ambos (Villalobos et al., 2013).

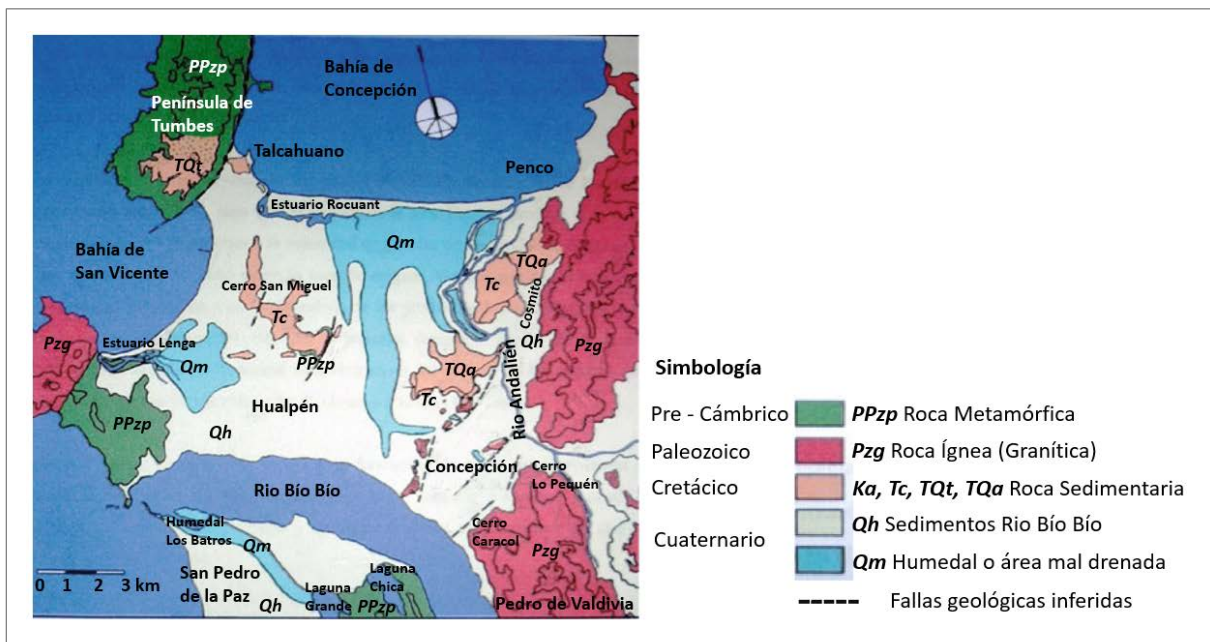


Figura 1. Mapa geológico general de Concepción (Poblete y Dobry, 1968)

2.1 Variabilidad de propiedades en suelos residuales

Los suelos residuales son formados por la meteorización del material de roca primario subyacente y tienen una química general muy similar al material de roca original (Brady y Weil, 1996). La meteorización del material de roca original puede ocurrir a través de la meteorización física (desintegración), la meteorización química (descomposición) o transformación química. Por lo tanto, las propiedades de estos suelos pueden variar drásticamente debido a la variación de los materiales parentales y las diferentes formas de meteorización (Zhai et al., 2016).

Las propiedades geotécnicas de suelos residuales varían espacialmente incluso dentro de un mismo estrato. Sin embargo, la mayoría de los análisis geotécnicos adoptan un enfoque determinístico basado en parámetros de suelo promedios aplicados a cada estrato. La herramienta convencional para hacer frente a la heterogeneidad de los suelos en condiciones in-situ es la aplicación de factores de seguridad implementados por la experiencia local y el juicio de ingeniería (Elkateb et al., 2003). Sin embargo, se ha reconocido que el factor de seguridad no es una medida consistente para evaluar el riesgo de taludes, debido a que taludes con el mismo valor del factor de seguridad pueden exhibir distintos niveles de riesgo dependiendo de la variabilidad de las propiedades del suelo (Li y Lumb, 1987). En

consecuencia, en los últimos años se han desarrollado varias investigaciones que buscan validar el análisis probabilístico de estabilidad de taludes abordando de manera sistemática las incertidumbres de las propiedades del suelo (Alonso 1976); (Li y Lumb, 1987; Christian et al., 1994; Lacasse y Nadim, 1998; Griffiths y Fenton, 2004; El-Ramly et al., 2005; Cho, 2007; (Suchomel y Masín, 2010; Wang et al., 2009; Reale et al., 2015).

La variabilidad natural se encuentra asociada a la aleatoriedad de los procesos naturales, manifestándose como una variación en el tiempo y espacio, que puede ser aproximada mediante modelos físico - matemáticos. También existe una incertidumbre debido a la carencia de datos y errores asociados en su obtención, tanto en la metodología de muestreo, en errores de manipulación de datos o errores de transcripción (Hidalgo y Pacheco, 2011), así como en la no representatividad del ensayo a las condiciones naturales en las que se encuentra la muestra de suelo.

Las rocas graníticas, principalmente las de grano grueso y colores claros, son duras y densas cuando están frescas, y prácticamente impermeables. En Chile, estas rocas cubren amplias extensiones, tanto de la Cordillera de la Costa (Batolito Costero), como de la Cordillera de los Andes. El Batolito Costero, es una gran masa de roca intrusiva formada paralela a la zona de subducción, a partir del enfriamiento del magma a kilómetros de profundidad y que se emplaza a lo largo de la Cordillera de la Costa, desde Valparaíso hasta la Cordillera de Nahuelbuta. Además, muestra fracturamiento preferente en la zona contigua a la costa, lo que permite una pequeña circulación de agua subterránea; la que sumada a la acción antrópica como cortes de camino, carretera, extracción de canteras, las granodioritas y tonalitas, se han visto expuestas a un fuerte proceso de meteorización física y química que ha aflojado y desmembrado las uniones entre los cristales de cuarzo, mica, feldespatos ferromagnesianos y ortoclasas; originando materiales de textura arenosa, denominado localmente como Maicillo (Toro, 2007; Rodríguez, 2015).

2.2 Funciones de densidad de probabilidad

Al igual que en todas las rocas graníticas, al estar meteorizadas, la clasificación del suelo residual varía desde arenas gruesas a arena limosa o arcillosa, aunque también se pueden presentar fragmentos rocosos dentro del material. Los procesos de meteorización y alteración de las rocas se encuentran controlados por el tamaño de grano y mineralogía de la roca madre, micro-fracturas y diaclasamiento, lluvia e infiltración, lixiviación, historial y duración de la meteorización (El-Ramly et al., 2005). Esta gran aleatoriedad que puede presentar un mismo material al ser meteorizado genera una variabilidad significativa a corta distancia, incluso dentro de formaciones geológicas uniformes. Debido a su amplia variabilidad, las propiedades de resistencia al corte pueden ser modeladas como funciones dependientes de la probabilidad, la cual puede ser estimada a partir de datos de puntos relativamente cercanos, teniendo en consideración, la ubicación espacial u origen de la roca, entre otros.

Se realizó un análisis de bondad de ajuste mediante el método de Kolmogorov - Smirnov, para la determinación de la función densidad de probabilidad de los parámetros de resistencia al corte, con un nivel de confianza de 5%. Para ello se utilizan 24 datos de ángulo de fricción y 24 datos de cohesión, obtenidos a partir de ensayos de corte directo en suelos residuales graníticos del Batolito Costero del Sur, Chile.

Los datos muestran que los ángulos de fricción efectivos de los suelos graníticos varían entre $23,5^\circ$ y $38,5^\circ$. La media y la desviación estándar son $30,6^\circ$ y $3,6^\circ$, respectivamente. El valor de la cohesión efectiva oscila entre 4 y 24 kPa. La media y la desviación estándar son $10,7$ y $5,44$ kPa, respectivamente. La Figura 2 y la Figura 3 muestran los histogramas de probabilidad y las funciones de distribución de probabilidad acumulada del ángulo de fricción y la cohesión efectiva, respectivamente.

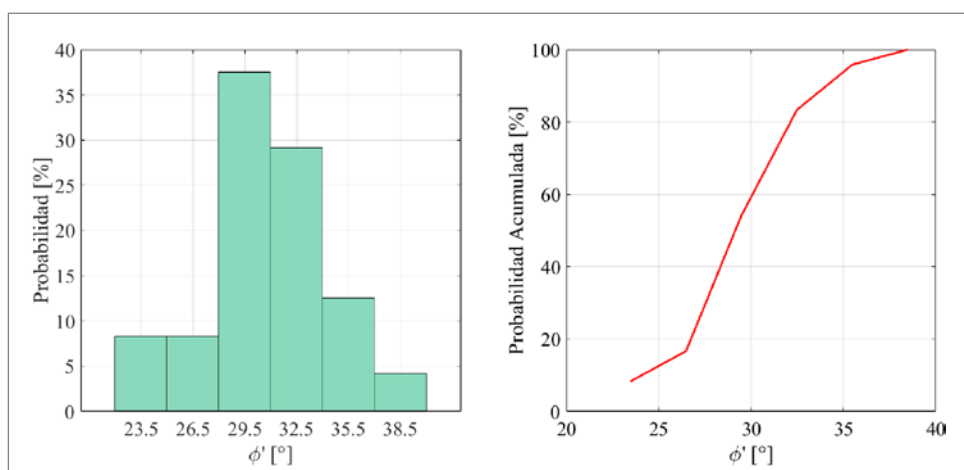


Figura 2. Histograma y curva de probabilidad acumulada para el ángulo de fricción interna

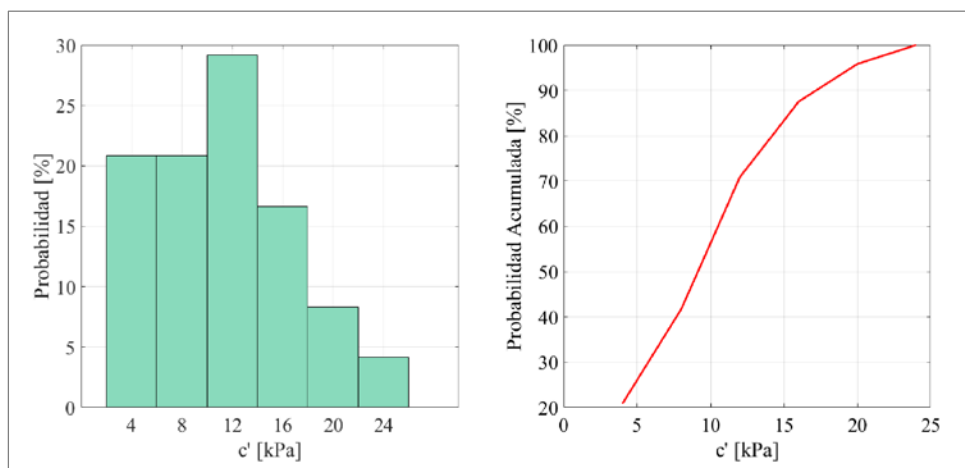


Figura 3. Histograma y curva de probabilidad acumulada para la cohesión efectiva

Las distribuciones de probabilidad estimadas para el ángulo de fricción y la cohesión, basadas en la base de datos del sitio de Concepción, parecen una representación razonable de la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte típicos de suelos residuales de granito meteorizado. Sin embargo, los valores medios y las variaciones de los parámetros de resistencia al corte en un sitio específico pueden diferir de las distribuciones regionales. La variabilidad dentro del sitio (en este caso la ciudad de Concepción) suele ser menor que la variabilidad de los datos regionales (Zhang et al., 2005). Cuando no se dispone de información específica del sitio, la incertidumbre en la resistencia al corte se puede representar mediante las distribuciones regionales (El-Ramly et al., 2005).

3. Evaluación probabilística de la estabilidad de taludes

El concepto de seguridad y su evaluación ha experimentado una notable evolución en los últimos años. Sin embargo, la determinación de un factor de seguridad global sigue siendo ampliamente utilizada en el diseño de estructuras geotécnicas (fundaciones, muros de contención, taludes, túneles, etc.), lo que crea dificultades adicionales para comprender la influencia en el diseño como resultado de las incertidumbres en las diferentes propiedades geotécnicas. Por lo tanto, después de la renovación impuesta por normativas europeas y norteamericanas, las metodologías determinísticas están siendo reemplazadas por enfoques más racionales, como los métodos semi-probabilísticos (por ejemplo, el método de coeficientes parciales) y los métodos probabilísticos basados en la teoría de la confiabilidad (Pinheiro et al., 2014).

Cabe señalar que la evaluación probabilística de la estabilidad de taludes ofrece la principal ventaja de considerar de manera lógica la confiabilidad y riesgo del sistema. Por lo tanto, los modelos probabilísticos pueden facilitar el desarrollo de nuevas perspectivas relativas al riesgo y la confiabilidad que están fuera del alcance de los modelos determinísticos convencionales.

En este estudio, se presenta un procedimiento para evaluar probabilísticamente la estabilidad de taludes en suelos residuales de granito. El procedimiento se basa en usar como

herramienta la simulación de Monte Carlo para generar datos aleatorios de los parámetros de resistencia al corte del suelo considerando la variabilidad de estos. Posteriormente es usado un software de análisis de equilibrio límite, obtenido las distribuciones de probabilidad del factor de seguridad, probabilidad de falla e índice de confiabilidad para distintas geometrías de talud.

3.1 Simulación de Monte Carlo

Un medio alternativo para evaluar el problema de estabilidad de taludes de forma probabilística es la simulación Monte Carlo, donde los valores discretos de las variables aleatorias son generados de manera consistente con su distribución de probabilidad, y la función de desempeño se calcula para cada conjunto de datos generados. El proceso se repite muchas veces para obtener una función de densidad de probabilidad discreta y aproximada de la función de desempeño.

La simulación de Monte Carlo permite generar una gran cantidad de datos aleatorios, conociendo la distribución de probabilidad de las variables de ingreso, siendo en este caso el ángulo de fricción y la cohesión efectiva, así como sus medias y distribuciones estándar. A medida que son generados los datos, se evalúa mediante métodos determinísticos la estabilidad del talud, con lo cual es posible, además, determinar las medidas de tendencia central correspondientes al factor de seguridad, así como la correspondiente probabilidad de falla (Cho, 2007; Hidalgo y Pacheco, 2011). La simulación de Monte Carlo es una técnica cuantitativa que hace uso de la estadística, para simular mediante procesos matemáticos, el comportamiento aleatorio de sistemas reales (Sandoval, 1987). La principal ventaja de este método es que es relativamente fácil de implementar mediante computadoras, además de manejar una amplia gama de funciones. La principal desventaja que posee es que, según el tipo de problema analizado, puede converger lentamente (Baecher y Christian, 2003).

Para generar los datos aleatorios de los parámetros de resistencia al corte del suelo se usa la simulación de Monte Carlo mediante software MATLAB para 100.000 iteraciones. Las Figuras 4 y 5 muestran los histogramas de probabilidad y las funciones de distribución de probabilidad acumulada para los datos aleatorios generados mediante la simulación de Monte Carlo para el ángulo de fricción y la cohesión efectiva, respectivamente. Una distribución paramétrica normal

representada en el mismo gráfico coincide muy de cerca con la función de distribución experimental simulada, tanto para el ángulo de fricción como para la cohesión.

Para generar variables aleatorias con cualquier distribución, primero es necesario generar números aleatorios que estén uniformemente distribuidos entre 0 y 1. La base de esta generación de números consiste en generar números aleatorios enteros y uniformemente distribuidos. La generación de números aleatorios es realizada mediante el método de Park y Miller (1988), el cual corresponde a un método de congruencia lineal multiplicativo.

3.2 Método de equilibrio límite

Los problemas de estabilidad de taludes se analizan comúnmente usando métodos de equilibrio límite de rebanadas. La masa del suelo que falla se divide en varias secciones verticales para calcular el factor de seguridad, que se define como la relación entre resistencia al corte disponible y la tensión de corte movilizada para mantener el equilibrio estático. El equilibrio estático de las rebanadas y la masa de suelo en su conjunto se utilizan para resolver el problema

(Cho, 2007). El método de equilibrio límite usado en este trabajo corresponde al método elaborado por Morgenstern y Price (1965), el cual es uno de los primeros en satisfacer todas las ecuaciones de equilibrio. El análisis desarrollando muestra la evaluación probabilística de la superficie de deslizamiento crítica para taludes en suelos residuales de granito.

3.3 Caso evaluado

La evaluación probabilística de la estabilidad de taludes considera que estos están homogéneamente conformados por suelo residual. La geometría de talud es mostrada en la Figura 6. La simulación de Monte Carlo fue realizada para taludes con alturas de 2m hasta 10m, e inclinación entre 45° y 85°.

El análisis de equilibrio límite mediante el método de Morgenstern y Price (1965) es realizado usando el software SLIDE 6.0, y posteriormente los resultados son procesados en MATLAB. Los parámetros de resistencia al corte del suelo residual usados para el análisis de equilibrio límite son los indicados en la Figura 4 y la Figura 5.

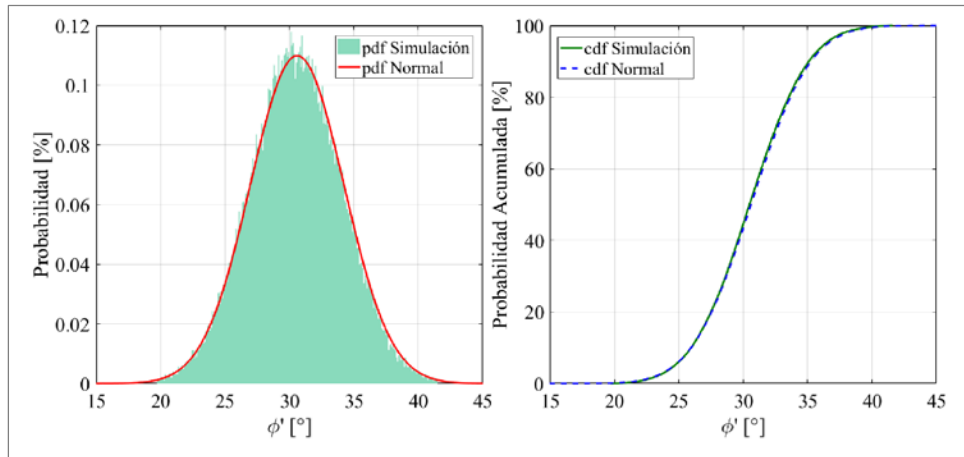


Figura 4. Histograma y curva de probabilidad acumulada de los datos generados por la simulación de Monte Carlo para el ángulo de fricción interna

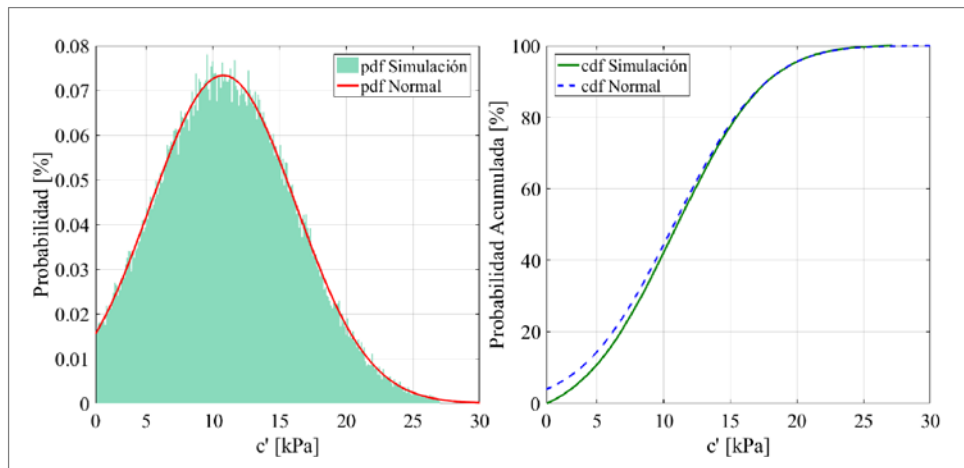


Figura 5. Histograma y curva de probabilidad acumulada de los datos generados por la simulación de Monte Carlo para la cohesión efectiva

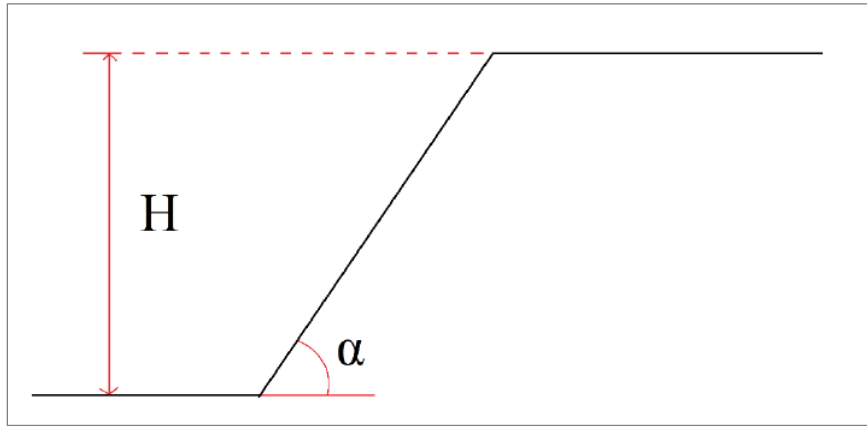


Figura 6. Geometría de talud, H y α son la altura e inclinación del talud, respectivamente

4. Resultados

Los resultados de la evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en suelo residual de granito son presentados en términos de la probabilidad de falla, el factor de seguridad y el índice de confiabilidad.

4.1. Probabilidad de falla

La Tabla 1 muestra los valores obtenidos de la probabilidad de falla para cada caso analizado, mientras que

de igual forma la Figura 7 muestra la probabilidad de falla en escala logarítmica en función del ángulo de inclinación del talud. Se observa que, para todas las alturas analizadas, con inclinación una inclinación de talud igual a 45°, la probabilidad de falla es inferior al 5%, mientras que, para alturas mayores que 5 m e inclinaciones mayores, la probabilidad de falla supera el 80%, siendo claramente inestables. También es posible notar que la altura crítica más estable corresponde a 2 m, con probabilidad de falla menor al 2% para todas las inclinaciones de talud

Tabla 1. Probabilidad de falla (%)

	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m
45°	0	0.007	0.078	0.244	0.543	0.977	1.732	2.312	3.87
50°	0.01	0.105	0.368	1.146	2.612	3.929	4.822	7.334	10.332
55°	0.007	0.193	2.892	3.234	6.804	9.385	13.579	17.776	22.655
60°	0.01	0.274	5.455	11.454	19.505	22.296	31.161	39.459	42.149
65°	0.01	0.57	3.668	11.94	20.843	46.776	57.676	71.431	72.862
70°	0.435	0.792	5.001	16.952	34.626	54.838	71.343	84.786	92.142
75°	1.227	7.363	22.793	39.257	47.184	64.351	75.509	96.721	98.928
80°	0.769	9.605	29.787	65.159	87.279	96.416	98.597	99.456	99.861
85°	0.469	21.842	34.61	70.853	89.368	99.512	99.956	99.912	99.961

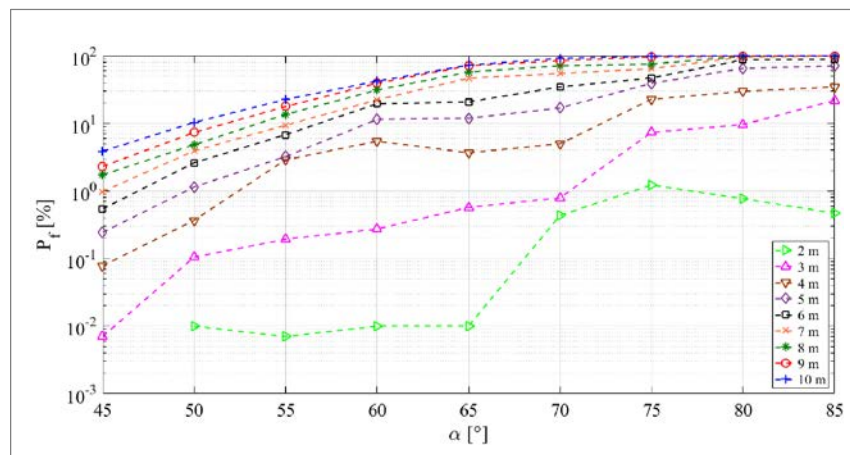


Figura 7. Probabilidad de falla para distintas inclinaciones y alturas de talud

4.2 Factor de seguridad

La Tabla 2 y la Tabla 3 indican los valores del factor de seguridad para los casos probabilístico y determinístico, respectivamente. La Figura 8 muestra la relación existente entre ambos factores de seguridad.

La Figura 8 da cuenta de una relación aparentemente lineal entre el factor de seguridad determinístico y la media del factor de seguridad probabilístico, donde los primeros presentan valores mayores a los obtenidos mediante la simulación de Monte Carlo. Los resultados muestran que a

medida que la probabilidad va disminuyendo, ambos factores de seguridad tienden a asemejarse entre sí; mientras que cuando aumenta la probabilidad, no solo los valores determinísticos son mayores, sino que, además, aumenta la dispersión entre cada caso. A pesar de ello, los resultados obtenidos por métodos probabilísticos son mucho más conservadores que los obtenidos mediante el promedio de los parámetros resistentes.

Tabla 2. Valor medio del factor de seguridad

	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m
45°	3.19	2.593	2.2	1.952	1.779	1.672	1.555	1.496	1.415
50°	2.437	2.19	1.972	1.783	1.51	1.463	1.424	1.35	1.29
55°	2.441	1.857	1.57	1.522	1.416	1.351	1.28	1.225	1.177
60°	2.297	1.804	1.448	1.296	1.181	1.172	1.106	1.053	1.042
65°	2.211	1.679	1.415	1.247	1.152	1.015	0.971	0.915	0.906
70°	2.025	1.615	1.365	1.185	1.07	0.985	0.922	0.865	0.825
75°	1.818	1.464	1.193	1.062	1.015	0.93	0.88	0.787	0.748
80°	1.758	1.337	1.11	0.939	0.837	0.768	0.73	0.702	0.669
85°	1.722	1.229	1.073	0.925	0.844	0.716	0.653	0.596	0.55

Tabla 3. Factor de seguridad

	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m
45°	3.304	2.521	2.141	1.901	1.762	1.634	1.521	1.459	1.383
50°	3.058	2.35	1.986	1.751	1.624	1.506	1.391	1.317	1.261
55°	2.941	2.239	1.844	1.627	1.474	1.365	1.277	1.212	1.156
60°	2.785	2.107	1.746	1.514	1.372	1.262	1.177	1.113	1.059
65°	2.673	1.976	1.642	1.431	1.3	1.174	1.095	1.025	0.975
70°	2.558	1.879	1.548	1.345	1.204	1.096	1.02	0.954	0.911
75°	2.271	1.681	1.386	1.214	1.092	0.999	0.936	0.876	0.833
80°	2.128	1.551	1.274	1.096	0.97	0.893	0.829	0.777	0.738
85°	2.039	1.489	1.208	1.038	0.927	0.844	0.764	0.696	0.653

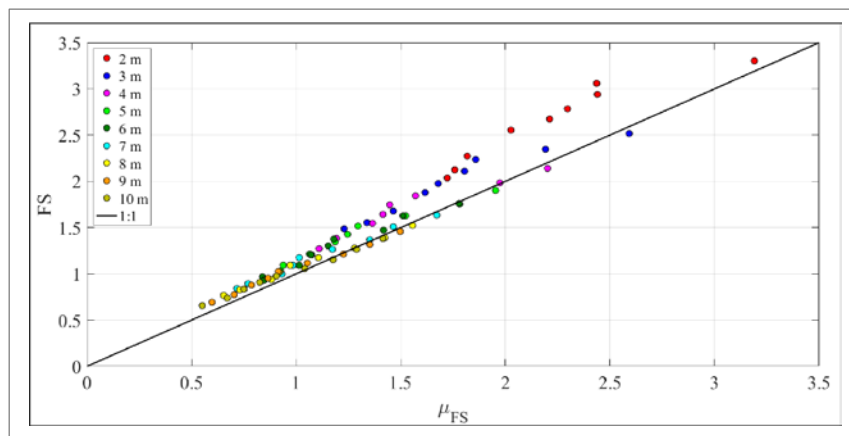


Figura 8. Media del factor de seguridad (caso probabilístico) contra el factor de seguridad determinístico

4.3 Índice de confiabilidad

Un análisis probabilístico complementario, corresponde a la obtención del índice de confiabilidad, el cual se define como la capacidad de un sistema para realizar para realizar las funciones requeridas, en condiciones establecidas durante un periodo de tiempo determinado (Wang y Constantino, 2009); en otras palabras, este índice describe la

seguridad del sistema, según el número de desviaciones estándar que separan la mejor estimación de la variable en cuestión, de su valor de falla (Christian et al., 1994), es decir, un factor de seguridad igual a 1,0. La ventaja que presenta el índice de confiabilidad es que no se requiere conocer la distribución del parámetro analizado. Sin embargo, hay una



suposición tácita de su distribución pues se puede aproximar mediante los valores de media y desviación estándar.

Una de las principales dificultades a la hora de hacer un análisis de confiabilidad, es definir los niveles de seguridad aceptables. En este sentido, el problema es definir la probabilidad de falla máxima que se puede tolerar para una estructura. Actualmente, no existe un consenso en este tema,

siendo la propuesta más conocida la presentada por USACE (1999), para definir los límites de índice de confiabilidad y, por lo tanto, la probabilidad de falla máxima de una estructura (ver Tabla 4). De la misma forma, Dell'Avanzi y Sayão (1998) definen la probabilidad de falla aceptable en distintos tipos de estructuras geotécnicas (ver Tabla 5).

Tabla 4. - Índice de Confiabilidad y Probabilidad de Falla (USACE, 1999)

Desempeño esperado	Índice de confiabilidad	Probabilidad de falla (%)
Alto	5	3×10^{-5}
Bueno	4	3×10^{-3}
Sobre el promedio	3	10^{-1}
Bajo el promedio	2.5	6×10^{-1}
Pobre	2	2.3
Insatisfactorio	1.5	7
Peligroso	1	16

Tabla 5. Índice de Confiabilidad y Probabilidades de falla (Dell'Avanzi y Sayão, 1998)

Caso	Índice de confiabilidad	Probabilidad de falla (%)
Fundaciones	2.3 – 3.0	$1 - 10^{-1}$
Taludes mineros	1.0 – 2.3	$10 - 10^{-1}$
Presas	3.5 – 5.0	$10^{-1} - 10^{-3}$
Estructura de contención	2.0 – 3.0	$10^{-1} - 10^{-1}$

La Tabla 6 indica los valores del índice de confiabilidad calculados para cada caso analizado, mientras que la Figura 9 muestra gráficamente estos resultados. Como se observa, el índice de confiabilidad se encuentra relacionado teóricamente, mediante una distribución normal estándar, con la probabilidad de falla (Christian et al., 1994); lo cual coincide con los resultados experimentales obtenidos. En la Figura 9 se muestra que para valores del índice de confiabilidad menores a 1,5, se tiene un buen ajuste con los resultados obtenidos para cada configuración de talud, lo cual coincide con los comentarios realizados por Christian et al. (1994), quienes menciona que a partir de valores del índice de confiabilidad

mayores a 1,5 a 2,0, la probabilidad de falla difiere sustancialmente del valor teórico. Sobre estos resultados, también es posible comentar que a partir de un valor del índice de confiabilidad igual a 1,5, la tendencia del índice de confiabilidad no sólo deja de seguir una distribución normal estándar, sino que además aumenta la dispersión a medida que la probabilidad de falla se va haciendo más pequeña, a pesar de no existir una gran variación del índice de confiabilidad. Esto puede generar problemas a la hora de diseñar acorde a algún criterio, pues como se observa para el caso de un talud altura igual a 3 m, el índice de confiabilidad no varía para probabilidades de falla entre 0.1% y 0.04%.

Tabla 6. Índice de confiabilidad

	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m
45°	2.863	2.381	2.280	2.199	2.149	2.008	1.880	1.811	1.654
50°	2.568	2.403	2.203	1.964	1.864	1.720	1.573	1.412	1.251
55°	2.765	2.421	1.851	1.805	1.525	1.351	1.144	0.973	0.805
60°	2.736	2.368	1.637	1.270	0.909	0.815	0.531	0.298	0.220
65°	2.751	2.251	1.745	1.212	0.847	0.091	-0.188	-0.572	-0.610
70°	2.196	2.185	1.624	0.993	0.428	-0.098	-0.560	-1.043	-1.444
75°	2.057	1.514	0.811	0.297	0.078	-0.388	-0.716	-1.887	-2.355
80°	2.163	1.364	0.571	-0.384	-1.155	-1.804	-2.186	-2.503	-2.884
85°	2.252	0.864	0.435	-0.536	-1.262	-2.710	-3.467	-4.290	-5.142

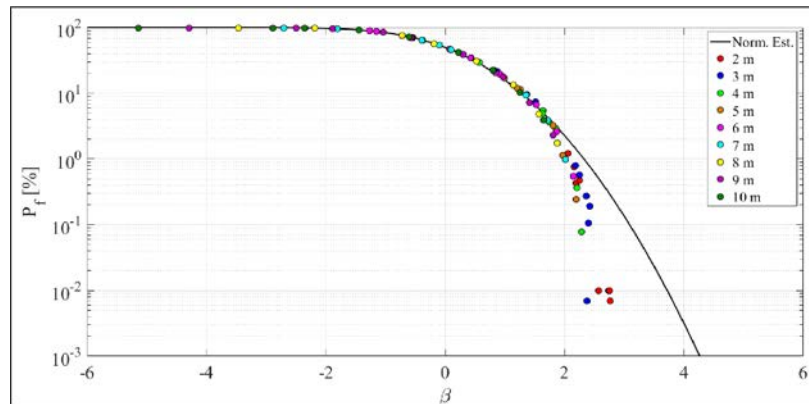


Figura 9. Relación entre el índice de confiabilidad y la probabilidad de falla

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante la evaluación probabilística corroboran la relación existente entre la altura y la inclinación de un talud con la inestabilidad global de un talud. Mientras más inclinado sea el talud, existirá una mayor inestabilidad y a la vez mayor probabilidad de falla. Esta misma analogía es aplicable respecto a la altura del talud.

En Chile, el valor del factor de seguridad mínimo utilizado para el diseño de taludes está en un rango de 1,40 y 1,50. Dentro de los casos analizados, para las configuraciones que cumplían con este requisito, se observa que su probabilidad de falla era inferior al 3%, cumpliendo con la probabilidad de falla aceptable propuestos por Dell'Avanzi y Sayão (1998).

De la curva de probabilidad e índice de confiabilidad, se observa que la relación entre ambos parámetros sigue perfectamente una distribución normal estándar hasta un índice de confiabilidad cercano a 2,0. Por lo tanto, para casos de estudio en que la probabilidad de falla máxima sea inferior

a 5% se debe tener en consideración que, para valores bajos de probabilidad de falla, la variación del índice de confiabilidad será pequeña.

El análisis probabilístico es una buena herramienta aplicable en la actualidad gracias al avance de la tecnología, y con la ventaja de incluir la incertidumbre de la naturaleza en problemas determinísticos. El uso de ambas metodologías será beneficioso para la ingeniería geológica y geotécnica no solo para la elección de un adecuado factor de seguridad, sino que también se ampliará la visión para abordar estos problemas, aumentando la cantidad de factores implicados en el análisis, mejorando la toma de decisiones. Sin embargo, se debe tener cuidado con las simplificaciones utilizadas en el análisis probabilístico, que puede llegar a subestimar la probabilidad de falla de un talud. El nuevo desafío en esta materia radica en la determinación del riesgo aceptable; es decir, definir cuál es la probabilidad de falla aceptable para evaluar la estabilidad de un talud o estructura, y qué criterios se deben usar para definirla.

6. Referencias

- Alonso E. (1976), Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays. *Geotechnique*, 26: 453–472.
- Baecher G., Christian J. (2003), *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley and Sons Ltd. England. 605 p.
- Bhattacharya G., Jana D., Ojha S., Chakraborty S. (2003), Direct search for minimum reliability index of earth slopes. *Comp and Geotech Journal* 30:455–462.
- Brady N., Weil R. (1996), *The nature and properties of soils*. Upper Saddle River. Prentice Hall, NJ.
- Cabrera T. (2007), *Características Geotécnicas de los suelos residuales del batolito de la costa de la cordillera de la Costa*. Tesis de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Cho S. (2007), Effects of spatial variability of soil properties on slope stability. *Engineering Geology Journal* 92: 97–109.
- Christian J., Ladd C., Baecher G. (1994), Reliability applied to slope stability analysis. *Journal of Geotechnical Engineering* 120 (12): 2180–2207.
- Dell'Avanzi E., Sayão A. (1998), Avaliação da probabilidade de ruptura de taludes. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 11, Vol. 2: 1289–1295.
- Elkateb T., Chalaturnyk R., Robertson P. (2003), An overview of soil heterogeneity: quantification and implications on geotechnical field problems. *Canadian Geotechnical Journal* 40 (1): 1–15.
- El-Ramly H., Morgenstern N., Cruden D. (2005), Probabilistic assessment of stability of a cut slope in residual soil. *Geotechnique* 55, No. 1: 77–84.
- Flandes N. (2017), *Estudio de la relación entre meteorización y características geo-mecánicas de la roca granítica de Concepción*. Tesis de Ingeniería Civil Geológica y Magister en Ingeniería Geotécnica, Departamento de Ingeniería Civil Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Griffiths D., Fenton G. (2004), Probabilistic slope stability analysis by finite elements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130 (5): 507–518.



- Hidalgo C., Pacheco A. (2011)**, Herramientas para el análisis por confiabilidad en geotecnia: Aplicación. Revista Ingenierías, Universidad de Medellín 10, 8: 79–86.
- Lacasse S., Nadim F. (1998)**, Risk and Reliability in Geotechnical Engineering. 4th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Paper No. SOA-5: 1172 –1192.
- Li K., Lumb P. (1987)**, Probabilistic design of slopes. Canadian Geotechnical Journal 24: 520–531.
- Morgenstern N., Price V. (1965)**, The Analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique 15, 1: 79–93.
- Park S., Miller K. (1988)**, Random number generators: good ones are hard to find. Communications of the ACM 31 (10): 1192–1201.
- Pinheiro R., Ramos L., Teixeira J., Alfonso M., Chaminé H. (2014)**, MGC – RocDesign|CALC: a geomechanical calculator tool for rock design. In: Alejano, L., Perucho, A., Olalla, C., Jiménez, R. (eds) Proceedings of Eurock2014, Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses (ISRM European Regional Symposium, Vigo, Spain). CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London. Pp 655 – 660.
- Poblete M., Dobry R. (1968)**, Modelo dinámico del suelo de Concepción. Revista IDIEM 7, 6: 12-18.
- Reale C., Xue J., Pan Z., Gavin K. (2015)**, Deterministic and probabilistic multi-modal analysis of slope stability. Comp and Geotech Journal 66: 172–179.
- Rodríguez P. (2015)**, Caracterización geomecánica y mineralógica del maicillo en la Cordillera de Nahuelbuta. Tesis de Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Ruiz C. (2002)**, Determinación de los parámetros CIU en muestras inalteradas de Maicillos graníticos residuales de Concepción. Tesis de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.
- Sandoval M. (1987)**, Dinámica de los procesos hidrológicos en la Cuenca del río Ñuble en San Fabian. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.
- Suchomel R., Masín D. (2010)**, Comparison of different probabilistic methods for predicting stability of a slope in spatially variable $c-\phi$ soil. Comp and Geotech Journal 37: 132–140.
- Tang W., Yucemen M., Ang A. (1976)**, Probability-based short-term design of soil slope. Can Geotech Journal 13:201-215.
- Toro, K. (2007)** Influencia de las características geológicas en las propiedades geotécnicas de graminoides jurásicos y suelos asociados en la Ruta 68. Tesis de Geología, Universidad de Chile.
- USACE (1999)**, Risk – based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies. ETL 1110–2–556.
- Villalobos S. (2011)**, Análisis y diseño de una excavación apertada en un suelo residual de Concepción. Tesis de Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Villalobos S., Oróstegui P., Villalobos F. (2013)**, Re-assessing a soil nailing design in heavily weathered granite after a strong earthquake. Bull Eng Geol Environ 72:203–212, DOI 10.1007/s10064-013-0466-7
- Wang W., Constantino C. (2009)**, Reliability analysis of slope stability at nuclear power plant site. 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. SMiRT 20 – Division 7, Paper 1982: 1–10.
- Wang Y., Cao Z., Au S. (2010)**, Efficient Monte Carlo Simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis. Comp and Geotech Journal 37: 1015–1022.
- Zhai Q., Rahardjo H., Satyanaga A. (2016)**, Variability in unsaturated hydraulic properties of residual soil in Singapore. Engineering Geology Journal 209: 21–29.
- Zhang L., Zhang L., Tang W. (2005)**, Rainfall-induced slope failure considering variability of soil properties. Geotechnique 55, No. 2: 183–188.