

ESTUDIO DEL EFECTO DE VEGETACIÓN EN TALUDES PARA SU ESTABILIZACIÓN

R. Sandoval Zavala¹, R. King St-Onge² y J. Montenegro Cooper³

RESUMEN:

El uso de vegetación, además de ser favorable para el medioambiente, resulta beneficioso en la estabilidad de taludes debido a las propiedades mecánicas e hidrológicas de las raíces de las especies vegetales.

En Chile aún es común la observación taludes desprovistos de protección o mitigación. Frente a los problemas asociados a los Procesos de Remoción en Masa, el material desplazado puede ocasionar daños a las personas, pérdidas económicas y afectar a las redes viales.

Hong Kong ha hecho extensa la aplicación de vegetación frente al problema de inestabilidad de taludes superficiales de granito completamente descompuesto. Rocas graníticas descompuestas similares son conocidas en Chile como "maicillo" y en la ciudad de Concepción es bastante común encontrar taludes compuestos de este material.

Considerando los beneficios y la utilidad de la vegetación, a partir de una revisión de antecedentes analíticos y empíricos, además de su fácil adaptación a condiciones climáticas, se sugiere la aplicación de especies vegetales como alternativa de mitigación para el problema de inestabilidad de taludes en la Región de Concepción. Se recomienda también especies en particular, favorables para su utilización.

PALABRAS CLAVES: Estabilidad de Taludes, Vegetación, Remoción en Masa, maicillo.

ABSTRACT:

The use of vegetation, apart from being favorable for the environment, is also beneficial in the stability of slopes due to the mechanical and hydrological properties of the roots of plant species.

In Chile it is still common to observe slopes devoid of protection or mitigation. Faced with the growing problems associated with Mass Movements, the displaced material can cause damage to people, economic losses and affect road networks.

Hong Kong has extensively used the application of vegetation to the problem of superficial slopes instability within completely decomposed granites. Similar decomposed granitic rocks is known in Chile as "maicillo" and in the city of Concepción it is quite common to find slopes composed of this material.

Considering the benefits and usefulness of vegetation, from a review of analytical and empirical antecedents, in addition to its easy adaptation to climatic conditions, the application of plant species as an alternative mitigation for the slope stability problems in the Concepcion Region is suggested. Recommendations regarding particular favorable species are also made.

KEYWORDS: Slopes Stability, Vegetation, Mass Movement, maicillo.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rsandoval@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jmontenegro@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de remoción en masa (PRM) son fenómenos gravitacionales de velocidades variables, desde muy lento a rápido, de un determinado volumen de suelo, roca o ambos, a lo largo de una pendiente por el efecto de la gravedad (Highland y Bobrowsky, 2008). Son las manifestaciones morfodinámicas más frecuentes (Varnes, 1978; Cruden, 1991; Hauser, 2000).

Los factores detonantes más frecuentes de PRM corresponden a variaciones en el contenido de agua, vibraciones (naturales/sísmicas o antropogénicas), aplicaciones de cargas estáticas o dinámicas y modificaciones en la geometría de las pendientes (Varnes, 1978; Cruden, 1991; Hauser, 2000).

Los suelos residuales se originan cuando los productos de la meteorización de rocas no son transportados como sedimentos, sino que se acumulan *in-situ*. La formación de suelos residuales se debe directamente a la meteorización física y química del material parental (Wesley, 2009).

El maicillo (concepto utilizado en Chile) es un tipo de suelo residual que se forma a partir de unidades de roca granítica intrusiva del Batolito de la Costa, cuya edad se estima en 320 millones de años, entre el paleozoico superior y el triásico inferior (Toro, 2007).

En suelos residuales, la falla de PRM ocurre especialmente cuando están involucradas pendientes empinadas y se propician deslizamientos rotacionales. En el caso de que el material sea más superficial, la superficie de falla tiende a ser más bien planar (Wesley, 2009).

Los deslizamientos ocurren a lo largo del mundo, bajo todas las condiciones climáticas y de terreno, los cuales resultan en grandes pérdidas de daños, dinero y muertes cada año. A menudo, causan trastornos económicos a largo plazo, desplazamiento de la población y efectos negativos en el entorno natural (Highland y Bobrowsky, 2008). Según el informe del World Meteorological Organization (2014), durante el período de 1970 al 2012 se registran 544,92 eventos corresponden a remociones en masa, con 43.687 víctimas fatales y una pérdida económica de US\$31 billones de dólares (WMO, 2014).

En la Provincia de Concepción, región del Bío Bío, el escenario se repite aún en menor escala con damnificados y víctimas fatales. Como consecuencias directas e indirectas de PRM se tienen el potencial riesgo de la población, las pérdidas económicas y la interrupción de la rutina de los habitantes de las distintas comunas.

Al igual que la región del Bío Bío con su afloramiento de Batolito de la Costa, la ciudad de Hong Kong cuenta con una unidad de roca ígnea intrusiva altamente meteorizada (Strange, 1990).

Hong Kong ha sufrido consecuencias de PRM regularmente a lo largo del último siglo, las que incluyen grandes daños socio-económicos y pérdidas de vidas (Choy y Cheung, 2013). Es por esto también, considerando el efecto mecánico de la vegetación sobre la estabilidad de pendientes y su favorable beneficio hacia el medio ambiente, que la ciudad Hong Kong ha comenzado a utilizar especies vegetales para estabilizar taludes. Las políticas de dicho país indican que es necesario utilizar vegetación para cubrir superficies de taludes cuyo ángulo de pendiente sea menor a 55° (Choy y Cheung, 2013).

Debido a su refuerzo mecánico e influencia hidrológica, la vegetación en los taludes no solo mejora la estética del paisaje sino también afecta de forma positiva la estabilidad del material de las pendientes (Coppin y Richards, 1990); favoreciendo la disminución de la humedad del suelo gracias su propio consumo de agua y evapotranspiración, y siendo así favorable para temporadas lluviosas (Keim y Skaugset, 2003).

Este estudio se enfoca en una investigación teórica acerca del uso de especies vegetales como alternativa de mitigación frente al problema de inestabilidad de taludes en la región de Concepción. Para alcanzar este objetivo se considerarán antecedentes analíticos y empíricos que dan sustento al beneficio y potencial de aplicación de vegetación en taludes poco profundos de maicillo. Se discute sobre posibles especies de plantas adaptables al clima de la región de Concepción que potencialmente se pueden utilizar.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Procesos de Remoción en masa

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) son fenómenos gravitacionales de movilización lenta o rápida de un determinado volumen de suelo y/o roca o ambos, con velocidades variables, a lo largo de una pendiente. Los factores que contribuyen a generar estos fenómenos, son: 1) las características litológicas (variaciones de meteorización y permeabilidad de la roca), 2) las características morfológicas del relieve (erosión basal, depósitos de sobrecarga de laderas, presencia de cizallas), 3) la estructura y propiedades físicas del suelo, 4) factores tenso-deformativos, 5) la densidad de la cobertura vegetal (deforestación, incendios forestales), etc. Los desencadenantes más comunes de PRM corresponden a la lluvia (que genera variaciones en el contenido de agua en el suelo), vibraciones relacionadas a actividades sísmicas, aplicación de cargas (estáticas o dinámicas) y alteraciones de la geometría de las pendientes (Varnes, 1978; Cruden, 1991; Hauser, 2000).

Los PRM pueden ser clasificados en diferentes formas dependiendo del tipo de movimiento y del tipo de material involucrados (Highland y Bobrowsky, 2008). Si el material se compone principalmente de partículas de grano tamaño arena o más fino, se describe como *tierra*, mientras que si los fragmentos son más gruesos se conoce como *detritos*. El tipo de movimiento describe la mecánica interna real acerca de cómo la masa de material es desplazada; *caída, volcamiento, deslizamiento, propagación o flujo* (Cruden y Varnes, 1996).

2.2 Suelos residuales

Los suelos se originan por procesos de alteración y disgregación de las rocas sedimentarias, ígneas o metamórficas dados por procesos geológicos externos y fenómenos climáticos (González de Vallejo et al., 2002). Se habla de suelos residuales cuando el producto de la descomposición de la roca permanece en el lugar de origen (Wesley, 2009). En ocasiones el límite entre suelo y roca es difícil de definir. Así, el grado de meteorización del material rocoso juega un rol muy importante en las propiedades físicas y mecánicas, ya que es la única manera de determinar el límite entre roca y suelo (Wesley, 2009). Según la "Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso" de la ISRM (1981), suelo residual se define cuando "todo el macizo rocoso se ha transformado en suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material", mientras que para un macizo rocoso completamente meteorizado "todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso".

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 variabilidad de las propiedades de resistencia, humedad y permeabilidad, a través del perfil de un suelo residual (Figura 1) dificulta la utilización de los modelos tradicionales de la mecánica de los suelos "homogéneos e isotrópicos" (Suárez, 1998).

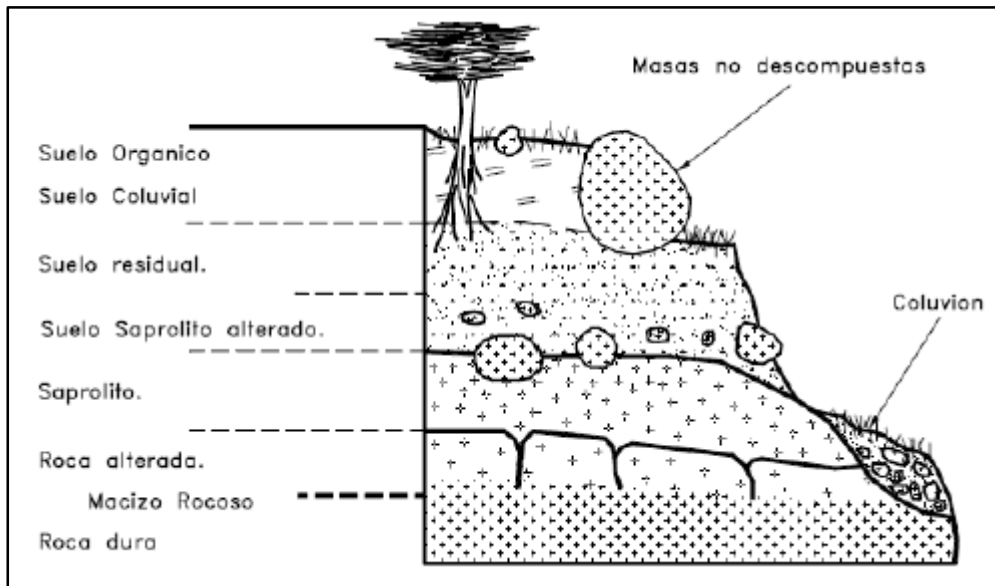


Figura 1: Perfil general de una ladera en suelo residual de granito (Suárez, 1998).

En suelos residuales en ambientes de fuertes pendientes ocurren movimientos en masa superficiales, después de fuertes o prolongadas lluvias. El agua empieza a infiltrarse en el suelo, la succión en los horizontes superficiales se reduce lentamente y así, la succión se reduce a cero cuando el suelo alcanza la condición saturada (Huat et al., 2006).

2.2.1 Maicillo

En Chile es común utilizar el término maicillo para referirse a bloques desintegrados de suelo residual, producto de la destrucción de las uniones entre cristales minerales de rocas graníticas por efecto de la meteorización (Rodríguez, 2015). De acuerdo a Rodríguez, el maicillo se extiende a lo largo de la Cordillera de la Costa, desde Valparaíso hasta la Cordillera de Nahuelbuta. Sin embargo, según la clasificación de la FAO (1981), el término maicillo corresponde a un Arenosols, el cual comprende a los suelos arenosos, incluyendo los suelos desarrollados en arenas residuales después de la meteorización *in situ* de sedimentos ricos en cuarzo o roca, y suelos desarrollados en depósitos de arenas desarrolladas recientemente como las dunas y playas.

En la literatura, es posible encontrar al maicillo con el nombre de saprolito granítico, como por ejemplo lo utiliza González de Vallejo en *Ingeniería Geológica*. El maicillo es generado por la meteorización creciente en profundidad de la roca “madre” y clasifica como arena arcillosa en superficie, para transformarse en arena limosa en profundidad (Toro, 2007). Este tipo de suelo puede mantener los planos de clivaje o diaclasas de la roca granítica que le dio origen, los que en ocasiones se encuentran arcillizados, constituyendo planos de debilidad. Según la frecuencia y orientación de estos planos con respecto al talud del corte se generan deslizamientos a través de ellos, dando origen a fallas de talud que van desde desprendimientos locales a fallas masivas (Rodríguez, 2015). Las diaclasas heredadas de la roca granítica madre poseen resistencia al corte muy baja producto de las pátinas arcillizadas (plano espejo) en condiciones normales que disminuyen drásticamente ésta resistencia por la acción del agua (Toro, 2007).

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).

2.3 Antecedente geológico de Concepción

La geología de la cuenca de Concepción posee diversas formaciones rocosas que comprende el basamento metamórfico, los intrusivos graníticos de edad Paleozoica, rocas sedimentarias Terciarias de las formaciones Quiriquina (Cretácica) y Curanilahue (Eoceno inferior) y depósitos fluviales-aluviales no consolidados recientes. Es posible encontrar relieves de erosión como cordones y plataformas, además de relieves de acumulación como valles, terrazas fluviales, llanuras hidromorfas, cordones litorales, marismas y dunas (Jaque, 2008).

En la Figura 2 se observa parte del Batolito Costero (Pzg), que corresponde a una roca ígnea intrusiva altamente meteorizada, de edad paleozoica (entre 250 y 570 ma) y es el resultado de la actividad tectónica causada por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa suramericana (Poblete y Dobry, 1968).

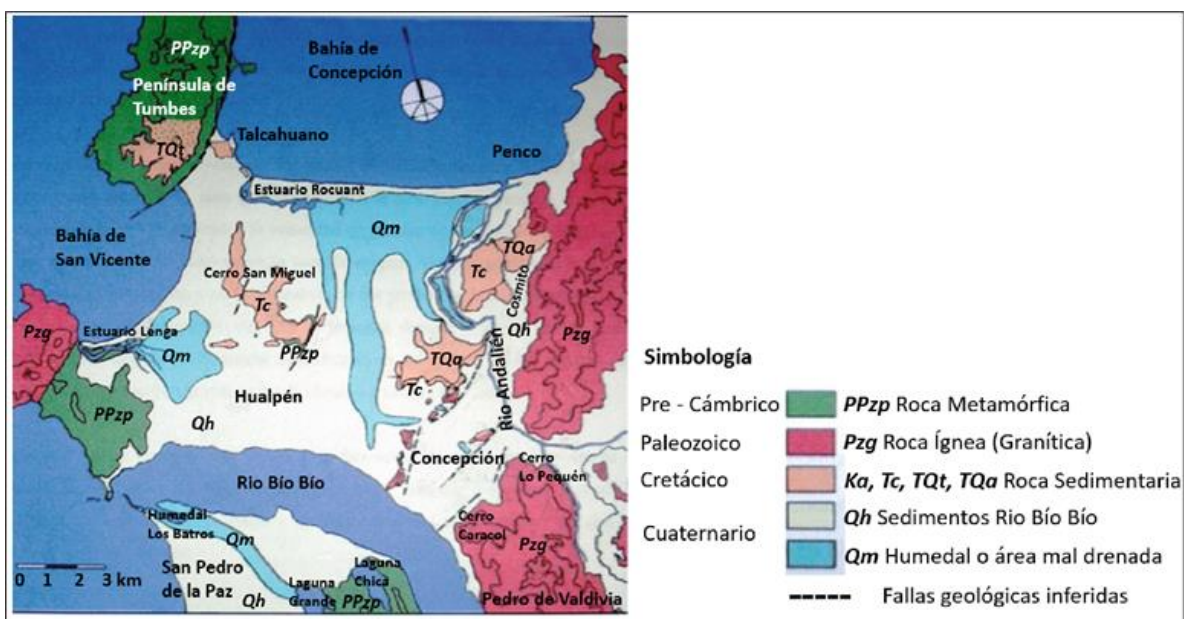


Figura 2. Mapa geológico general de Concepción (Poblete y Dobry, 1968).

En el litoral de Concepción (Chile) son recurrentes los PRM. Alarcón (1995) contabiliza 88 eventos para el periodo 1960-90 a través de la información registrada en el *Diario El Sur*; registro tres veces superior al intervalo 1885-1920 (Essman, 1997). Se reconoce como detonante principal la intensidad de lluvia diaria y entre los factores que han facilitado su desarrollo se mencionan: taludes deforestados, taludes intervenidos para construcción de casas o carreteras (sin estabilizar), pendientes topográficas $> 20^\circ$, taludes enmantados por gruesas capas de regolita conteniendo arcillas del tipo montmorillonita, etc (Mardones *et al.*, 2006). Básicamente, el poblamiento de los cerros que rodean el área metropolitana de Concepción, ha incrementado la actividad morfogenética de las laderas durante los inviernos pluviosos (Mardones *et al.*, 2006).

2.3 Antecedente geológico de Hong Kong

Granitos, granodioritas y rocas volcánicas asociadas que corresponden a edades Jurásico Superior a Cretácico Inferior subyacen gran parte del territorio de Hong Kong (Irfan, 1996) (Figura 3). Las rocas han sido fuertemente meteorizadas in situ formando un perfil de suelos residuales. La profundidad de meteorización de los granitos puede alcanzar los 60 m (Au, 1998).

Granitos y granodioritas se presentan como una serie de plutones de cuerpos elípticos y circulares, generalmente de 5 a 20 km de diámetro (Strange 1990) (Figura 3).

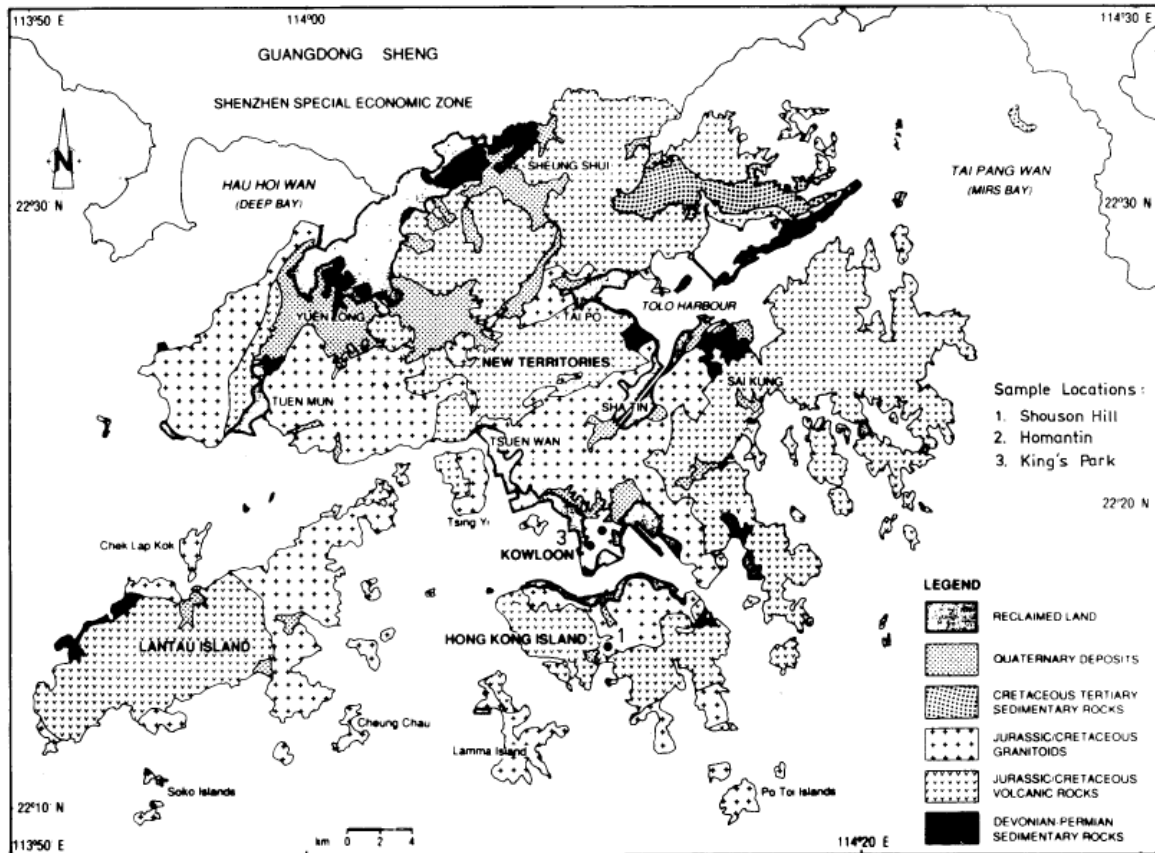


Figura 3. Mapa geológico de Hong Kong (Irfan, 1996).

En el territorio de Hong Kong, la gran mayoría de fallas en taludes son superficiales y pequeñas (Au, 1998). El espesor de la masa de material fallado rara vez supera los 3 m. Para muchas fallas el espesor es incluso menor a 1 m y la relación entre el espesor y el escarpe puede ser menor a 0.1 (Au, 1998). En pendientes de material coluvial, la zona más débil corresponde inevitablemente a la capa subyacente a la superficie, dado que la succión del agua en los poros disminuye a medida que el nivel freático desciende. Es por esto y en conjunto con que las componentes cohesivas y friccionales de la resistencia del suelo aumentan con la profundidad, para suelos saprolíticos la zona más débil es también más cercana a la superficie del talud, siendo más propensos a fallar (Au, 1998). Por lo tanto, en Hong Kong los deslizamientos de detritos debido a infiltración de agua en subsuelos superficiales son generalmente traslacionales y superficiales (Figura 4).

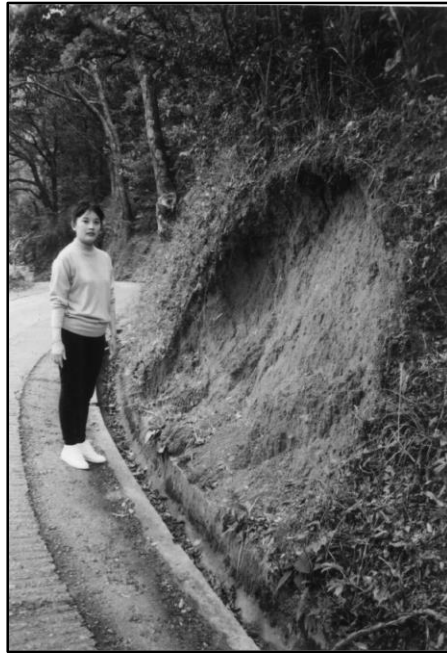


Figura 4. Remanente de una superficie de falla del terreno en Tai Po Kau, Hong Kong, año 1992 (Au, 1998).

2.5 Métodos de estabilización y mitigación

Frente al problema de PRM en taludes en suelos residuales, varias técnicas de estabilización y mitigación han sido desarrolladas e implementadas (Highland y Bobrowsky, 2008):

- Excavación
 - o Relleno de material ligero (Fig 5.A)
 - o Reducción de la altura del talud
 - o Bancos escalonados
- Refuerzos
 - o Refuerzo de mallas plásticas
 - o Contrafuertes de roca (Fig 5.B)
- Técnicas de drenaje
 - o Drenes (Fig 5.C)
 - o Zanjas de drenaje
- Muros de contención
 - o Gaviones (Fig 5.D)
 - o Muros de acero o concreto



Figura 5.A. Relleno de material ligero. (Highland y Bobrowsky, 2008).

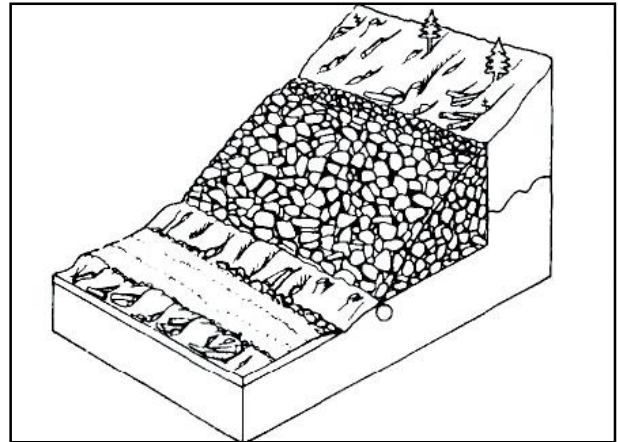


Figura 5.B. Esquema de contrafuerte de roca. (Highland y Bobrowsky, 2008).



Figura 5.C. Drenes instalados en un talud. (Highland y Bobrowsky, 2008).



Figura 5.D. Gaviones instalados al costado de una carretera. (Highland y Bobrowsky, 2008).

3. ANTECEDENTES

3.1 Antecedentes analíticos

3.1.1 Estabilidad de un talud superficial infinito

Según Zhu et al, 2017, para llevar a cabo el análisis del efecto de vegetación en la estabilidad de pendientes, es posible idealizar un perfil (Figura 6) compuesto de una capa de granito completamente descompuesto, en el que están posicionadas las raíces de árboles, sobre una capa de suelo muy rígido.

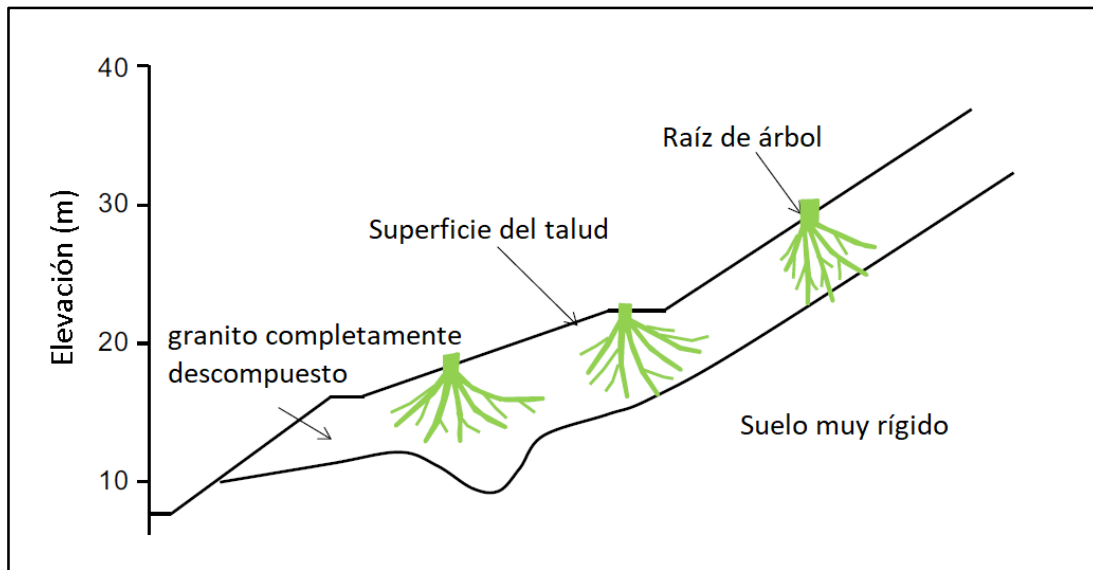


Figura 6. Representación de un talud que incorpora vegetación. Elevación en metros. (modificado de Zhu et al., 2017).

La Figura 7 muestra un diagrama esquemático relacionado al refuerzo de un talud por raíces de una especie vegetal.

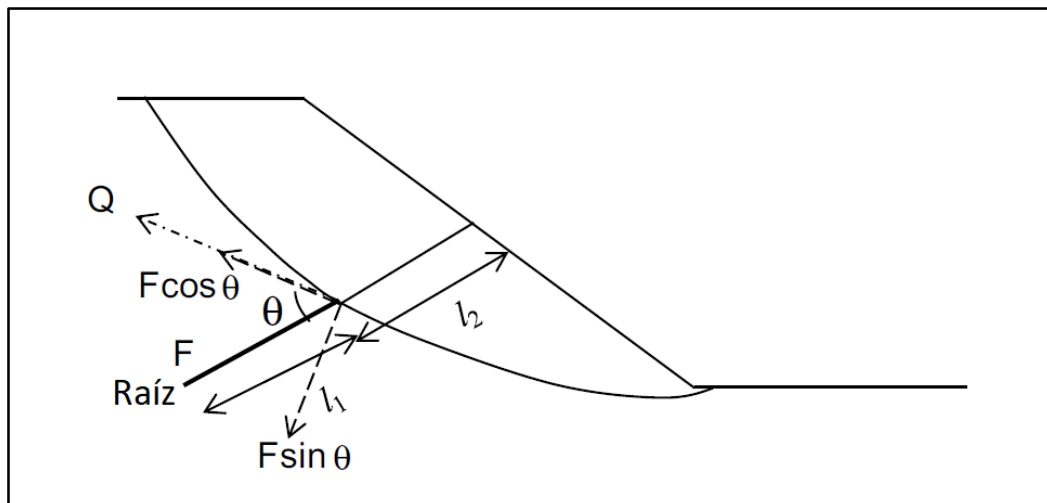


Figura 7. Representación de las fuerzas que actúan en la superficie de falla de un talud debido a la incorporación de una raíz (modificado de Zhu et al., 2017).

La porción de raíces bajo la superficie de deslizamiento se denota l_1 , la cual provee una tensión efectiva para resistir una falla por esfuerzos de corte al aumentar los esfuerzos normales.

Dado que las raíces de vegetación proveen suficiente refuerzo mecánico a la masa de suelo, la superficie crítica de falla puede ser llevada bajo la profundidad efectiva del sistema de raíces (Irfan, 1996).

Se considera la capacidad tensorial (T en kN) como parámetro de resistencia de las raíces (Zhu et al., 2017). De acuerdo a pruebas en terreno y laboratorio Zhu et al. (2017) han observado una fuerte correlación entre el esfuerzo tensorial de la raíz y su diámetro como:

$$t = 70d^{-0.7} \quad (1)$$

donde t es el esfuerzo tensorial de la raíz en MPa y d es el diámetro en mm. La capacidad tensorial de la raíz (T) está dado por

$$T = \frac{\pi d^2 t}{4} \quad (2)$$

Despreciando las ramificaciones secundarias de las raíces, el estudio de Zhu et al. (2017) considera raíces individuales principales de 67 mm de diámetro para plantas leñosas, siendo un valor razonable para las plantas encontradas en Hong Kong de acuerdo al estudio de Yeung et al. (2016). Aplicando la Ecuación (2), la capacidad tensorial es considerada como 12.5 kN, idéntica para todas las raíces. Cuando l_1 es menor a 5 m, la fuerza axial es controlada por la resistencia a la tracción; cuando l_1 es mayor a 5 m, la fuerza axial depende de la capacidad tensorial. Una fuerza de corte (denotada Q) desarrollada en relación al esfuerzo lateral por flexión es ubicada en el punto de intersección de la raíz con la superficie potencial de falla (Zhu et al., 2017) (Ver Figura 7). El esfuerzo lateral por flexión de las raíces fue investigado en primera instancia por Stokes y Mattheck (1996), quienes reportaron, que el esfuerzo lateral de flexión corresponde a la mitad a un tercio del esfuerzo tensorial. Un valor de 6.25 kN es entonces considerado para proveer un esfuerzo de resistencia al corte paralelo a la superficie de falla. La siguiente ecuación describe el aporte de la fuerza axial de la raíz a la fuerza de resistencia al corte (ΔS), la cual se desarrolla en el deslizamiento:

$$\Delta S = F \sin \theta \tan \varphi + F \cos \theta + Q \quad (3)$$

Donde θ es el ángulo entre la raíz y la superficie de falla, F la fuerza axial ejercida por la raíz y Q la fuerza de corte ejercida por la raíz.

La Figura 8 muestra un perfil típico de una pendiente superficial vegetada que considera la zona de influencia de las raíces. En las soluciones analíticas reportadas por Ng et al. (2015), se asume que el nivel freático está ubicado al fondo del material de la pendiente.

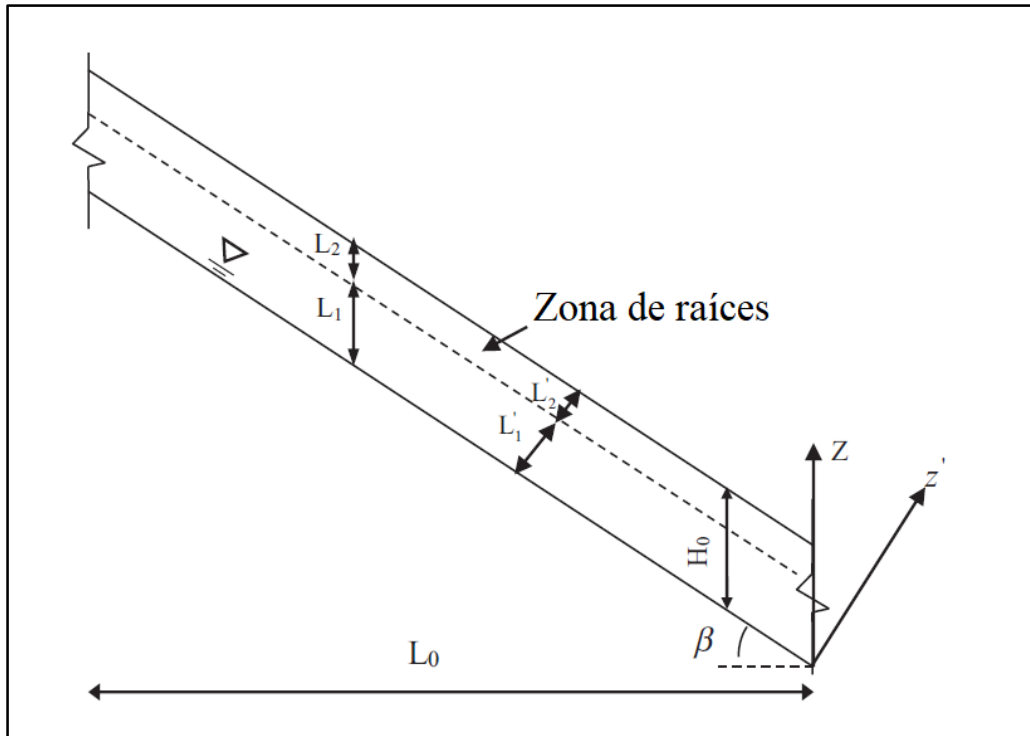


Figura 8. Perfil transversal de una pendiente superficial vegetada (modificado de Liu et al., 2016).

También, la distribución de isobaras de presión de agua son paralelas a la superficie del talud y así, a la superficie de falla. Así, la presión de agua puede ser tratada como un flujo unidimensional perpendicular a la superficie del talud, tanto para estados estables y transientes. Basado en el balance de masa de agua, la ecuación que rige el flujo de agua se obtiene al incorporar el consumo de agua de las raíces como término de drenaje, expresada en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial z'} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z'} \right) + \frac{\partial k}{\partial z'} \cos \beta - S(z') H(z' - L'_1) = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (4)$$

Donde ψ corresponde a la altura de presión, k es la permeabilidad no saturada del suelo, θ_w corresponde al contenido volumétrico de agua, t es el tiempo, z' es la coordenada perpendicular a la superficie del talud, L'_1 es la profundidad perpendicular fuera de la zona de raíces, β es el ángulo de inclinación del talud, $S(z')$ es el término de drenaje que representa el consumo de agua de las raíces y que considera tanto la tasa de evapotranspiración y arquitectura de las raíces, y $H(z' - L'_1)$ es la función Escalón Heaviside definida como:

$$H(z' - L'_1) = \begin{cases} 1, & L'_1 \leq z' \leq (L'_1 + L'_2); \text{ dentro de la zona enraizada} \\ 0, & 0 \leq z' \leq L'_1; \text{ fuera de la zona enraizada} \end{cases} \quad (5)$$

Donde L'_2 es la profundidad perpendicular de la raíz.

En las soluciones analíticas, la permeabilidad del suelo (Ecuación 6) y el contenido volumétrico de agua (Ecuación 7) se expresan en términos de la altura de presión de la presión de poros ψ , como:

$$k = k_s \exp(\alpha \psi) \quad (6)$$

$$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp(\alpha \psi) \quad (7)$$

Donde k_s corresponde a la permeabilidad saturada del suelo, α es el coeficiente de desaturación del suelo, y θ_s y θ_r corresponden al contenido de agua saturado y residual, respectivamente. Aunque las ecuaciones (6) y (7)

describen aproximaciones del comportamiento del suelo cerca de su saturación, debido a conveniencia matemática, han sido utilizadas en otros estudios para obtener soluciones analíticas. Además, en las soluciones analíticas obtenidas por Ng et al. (2016), los efectos de las raíces sobre la permeabilidad del suelo (Ecuación (6)) y la curva característica del agua en el suelo (Ecuación (7)) no son consideradas. También, el efecto de la histéresis es despreciado, lo que implica que α corresponde a un valor constante para ciclos de humedecimiento y secado.

El criterio Extendido de Mohr-Coulomb (Fredlund y Rahardjo, 1993) es utilizado para describir el esfuerzo de corte del suelo no saturado (Ecuación 8):

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (8)$$

Donde c' es la cohesión efectiva, φ' es el ángulo de fricción interna, φ_b es el ángulo que indica la tasa de aumento en el esfuerzo de corte relativo a la presión de poros negativa; σ_n es el esfuerzo normal total; u_a y u_w representan la presión de poros de aire y de agua respectivamente. Téngase en cuenta que la resistencia al corte varía con la presión de poros negativa de agua describiendo una función no-lineal (Gan et al., 1988). Sin embargo, al considerar pequeñas presiones de poros negativas (es decir, menores a 100 kPa) encontradas en el análisis de estabilidad de taludes y por simplicidad, se considera φ_b como un valor constante.

De acuerdo al equilibrio de fuerzas paralelo a la superficie del talud, el Factor de Seguridad (FS) puede ser calculado mediante la siguiente expresión (Ecuación 9):

$$FS = \frac{(c' - u_w \tan \varphi_b)}{[\gamma_d(H_0 - Z) + \gamma_w \int_Z^{H_0} \theta_w dZ] \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta} \quad (9)$$

Donde γ_d corresponde a al peso unitario seco el suelo, γ_w es el peso unitario del agua, u_w es la presión de poros del agua, la cual es calculada utilizando soluciones analíticas obtenidas por Ng et al. (2016); θ_w es el contenido volumétrico de agua; Z es la coordenada vertical, positiva hacia arriba como se muestra en la Figura 8; H_0 corresponde al espesor vertical de la pendiente.

3.1.2 Efecto de árboles sobre la superficie de taludes

Ali et al. (2012) analizaron el factor de seguridad (FS) para un talud con tres posiciones distintas de un árbol sobre él (Figura 9). En la Tabla 1 se indica que el factor de seguridad general aumenta debido al efecto de un árbol situado sobre la pendiente, especialmente cuando el árbol está ubicado al pie del talud, en comparación al caso en que se ubica en la corona del talud.

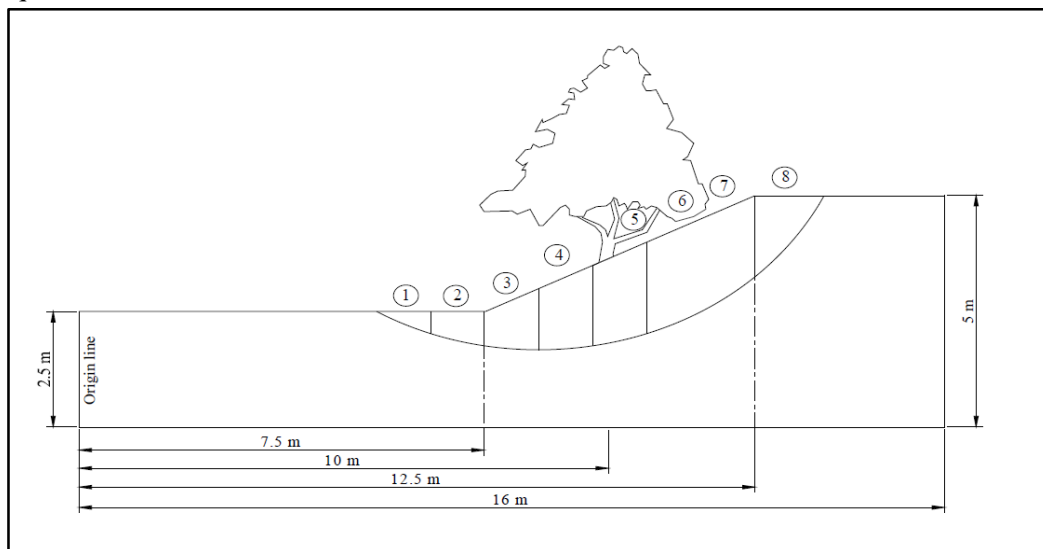


Figura 9. Perfil de un talud mostrando las diferentes posiciones de un árbol a 7.5, 10, 12.5 y 16 m de la línea de origen (Ali et al., 2012).

Tabla 1. FS con y sin consideración del efecto del árbol y su diferencia porcentual (Ali et al., 2012).

Posición del árbol	FS sin el efecto de un árbol	FS con el efecto de un árbol	Diferencia porcentual (%)
Pie del talud	1.6	1.74	8.75
Mitad del talud	1.6	1.66	3.75
Corona del talud	1.6	1.54	-2.5

Los resultados indican que hay más de un 8% de diferencia en el factor de seguridad (FS) cuando el árbol se ubica al pie del talud, en comparación al caso en que no se incluyen árboles (Ali et al., 2012).

De los resultados obtenidos, Ali et al. (2012) concluyen que los árboles contribuyen a la estabilidad de taludes mecánicamente y los mejores resultados se obtienen al ubicar la vegetación al pie de la pendiente.

3.2 Antecedente empírico

3.2.1 Adhesión de vegetación para taludes rocosos

Los suelos superficiales se pueden mejorar mezclando aglutinante de adhesión, fertilizante y absorbentes de agua con suelo base para así propiciar la siembra y adhesión de vegetación a un talud rocoso (Figura 10) (Gao et al., 2007). En el estudio de Xu et al. (2017), se incorporaron al suelo base (suelo limoso) poliacrilamida (PAM), carboximetilo de celulosa (CMC) y cenizas volantes, junto a agua adicional.

El PAM es un polímero de cadena larga con características floculantes (Vysotskaya et al., 1990), utilizada ampliamente para mejorar la estabilidad y resistencia a la erosión de suelos arcillosos y arenosos. Algunos indican que las PAM podrían mejorar la curva de humedad del suelo sobre el talud y mantener una alta conductividad hidráulica saturada al formar agregados estables (Trout y Ajwa, 2001).

El CMC es un gel no-iónico soluble en agua que puede ser degradado biológicamente (Avera, 1989). Además, CMC tiene buena absorción de agua y adhesión (Xu et al., 2017) y por lo mismo ha sido utilizado ampliamente en agricultura como agente de retención de agua para la mejora del suelo (Avera, 1989).

Las cenizas volantes son un sub-producto del proceso de combustión de carbón (Xu et al., 2017) y contienen los nutrientes esenciales (Si, Al, Fe, K y elementos traza) para el crecimiento de vegetación y así pueden mejorar efectivamente la fertilidad del suelo y promover el crecimiento de las plantas (Ramesh and Chhonkar, 2001).



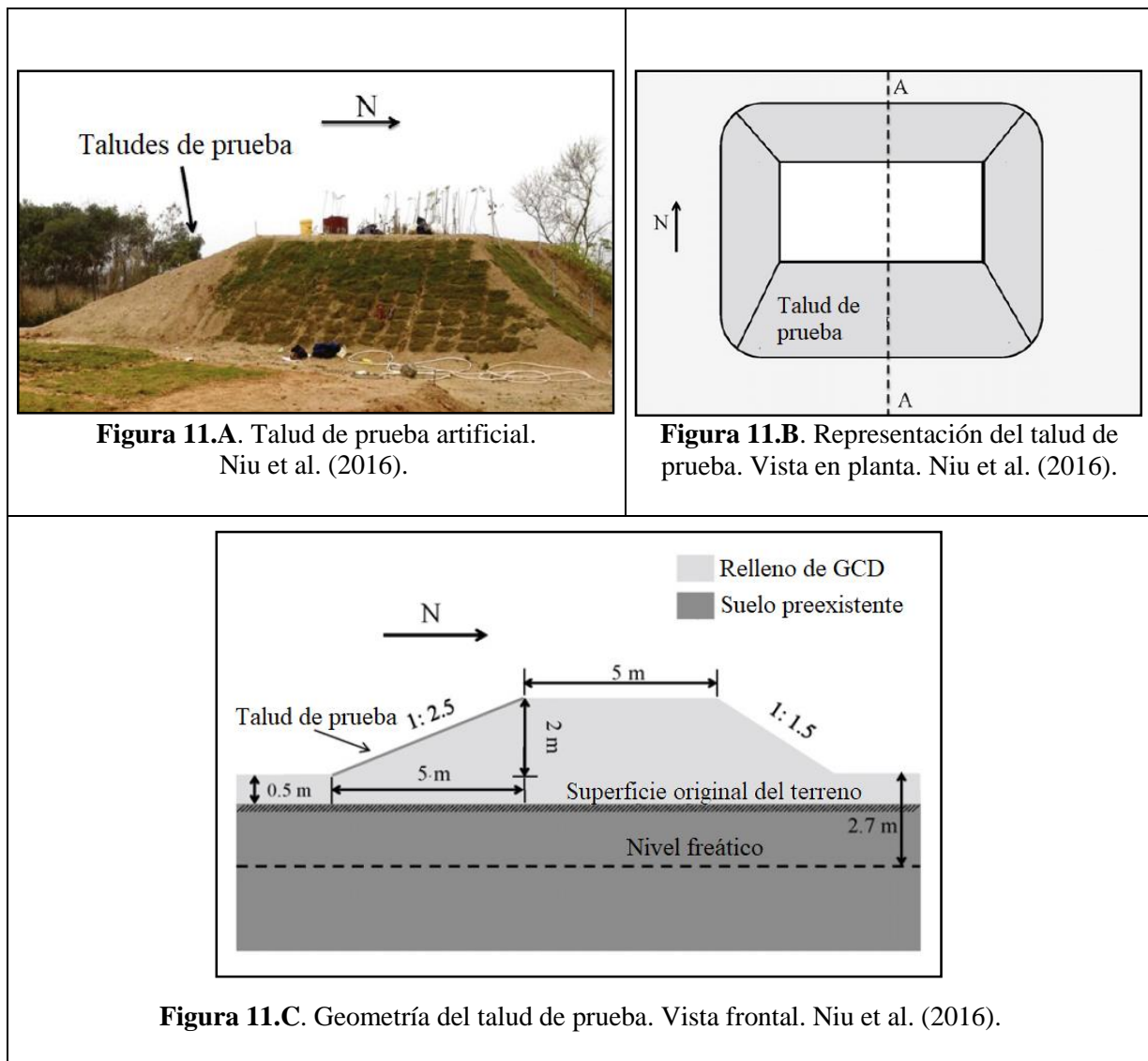
Figura 10. Penetración de raíces en grietas de roca en un talud rocoso, después tras 360 días de su siembra (Xu et al., 2017).

3.2.2 Ensayo de resistividad capacitiva

Niu et al. (2016) llevaron a cabo un estudio en el que utilizaron el método de resistividad capacitiva para medir la resistividad eléctrica en distintos puntos del terreno, utilizando un medidor (OhmMapper) conformado por un transmisor y varios receptores de corriente alterna.

Los autores monitorearon un sistema de taludes artificial, de 2 m de altura y 22° de ángulo de pendiente, compuesto de Granito Completamente Descompuesto (GCD)⁽¹⁾, emplazado sobre un terreno altamente heterogéneo, cuyo nivel freático fue determinado a 2.2 m bajo la superficie natural del terreno. Para minimizar la influencia del suelo natural, el talud fue emplazado sobre una capa de GCD de 0.5 m de espesor, sobre el terreno natural. Se aprecia en la Figura 11 A,B,C la geometría del sistema de taludes.

Nota: El GCD es equivalente al denominado maicillo en la Región de Concepción, Chile.



La resistividad eléctrica (ρ) de un medio poroso a diferentes grados de saturación puede ser modelado mediante la Ley de Archie:

$$\rho = \rho_s S^{-n}$$

Donde ρ_s corresponde a la resistividad eléctrica a un 100% de saturación, S es el grado de saturación de agua y n el exponente de saturación. Los parámetros determinados para el estudio de Niu et al. (2016) son $\rho_s = 28.84$ ohm-m y $n=2.285$.

Se escogió la planta Hedera, particularmente *Schefflera heptaphylla* (Figura 12.A), especie nativa común en Hong Kong. Un talud fue cubierto por hederas jóvenes transplantadas, espaciadas entre 0.3 y 0.4 m a lo largo y entre 0.5 a 0.75 a lo alto, mientras que el otro talud del sistema fue dejado descubierto (Figura 12.B).

Las especies vegetales fueron transplantadas a los 3 meses de vida. Tras 6 meses de ser transplantadas, se determinó que la profundidad de sus raíces, era de aproximadamente 0.2 m a 0.3 m. También, Niu et al. (2016) determinaron que el diámetro del sistema de raíces era de aproximadamente 0.2 m a 0.3 m. Cabe mencionar que tras algunos meses de transplantar las hederas, creció pasto adicional entre las especies.

Schefflera heptaphylla no es una especie de cultivo, por lo que no necesita crecer en suelos ricos en contenido orgánico o en concentración de nutrientes (Vetterlein et al., 1993).



Figura 12.A. Hedera (*schefflera heptaphylla*) (Niu et al., 2016).

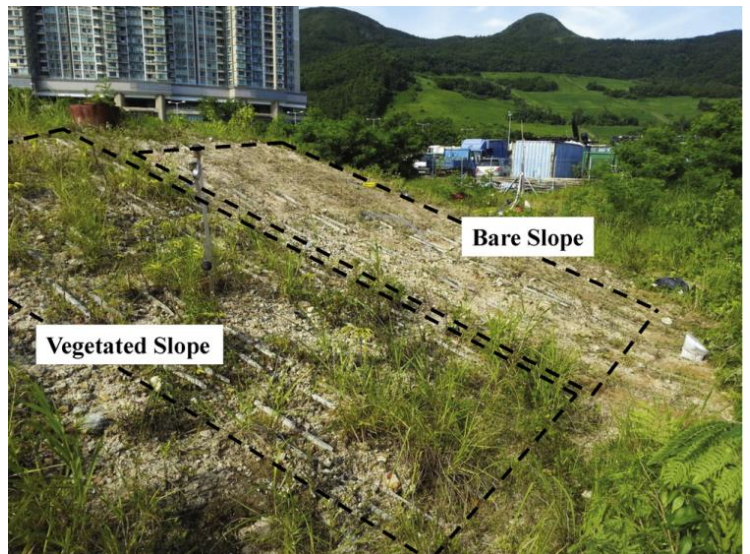


Figura 12.B. Talud de prueba vegetado (izquierda) y descubierto (derecha) (Niu et al., 2016).

3.2.2.1 Tendencia general del ensayo

Las Figuras. 13a y 13b presentan las medidas de la resistividad del suelo a los largo del período de monitoreo para el talud descubierto y el talud vegetado, respectivamente. Para ambas pendientes, se encontró que la humedad del suelo a mayor profundidad es menos variable que a profundidad más superficial a lo largo del año. La etapa 1 corresponde al verano; la etapa 2 corresponde al otoño; la etapa 3 corresponde a la primavera y la etapa 4 corresponde al invierno. En la pendiente descubierta (Figura 13a), la resistividad del suelo a profundidad superficial varía entre $\sim 30 \Omega\text{-m}$ y $\sim 350 \Omega\text{-m}$, mientras que la resistividad en profundidad mayor se mantiene cercana a $50 \Omega\text{-m}$. Esto se debe a que el suelo más superficial está más cercano a la atmósfera y así, es más susceptible a cambios climáticos.

Una comparación de los resultados en las Figuras 13a y 13b revelan que la resistividad del suelo varía más significativamente en el talud descubierto que en el talud vegetado. A mayores profundidades, el rango de variación en la resistividad del suelo es de aproximadamente $300 \Omega\text{-m}$ para el talud descubierto (Figura 13a) pero solo de aproximadamente $100 \Omega\text{-m}$ para el talud vegetado (Figura 13b).

Como la profundidad más superficial es consistente con la profundidad de las raíces de las hederas (0.2 m a 0.3 m), los resultados muestran que la vegetación tiene una influencia sobre la hidrología del talud. Sin embargo, tal influencia se ve aminorada para el suelo más profundo dado que a 0.7 m de profundidad ya no tienen influencia las raíces al superar su largo y así estar fuera de la zona de vegetación.

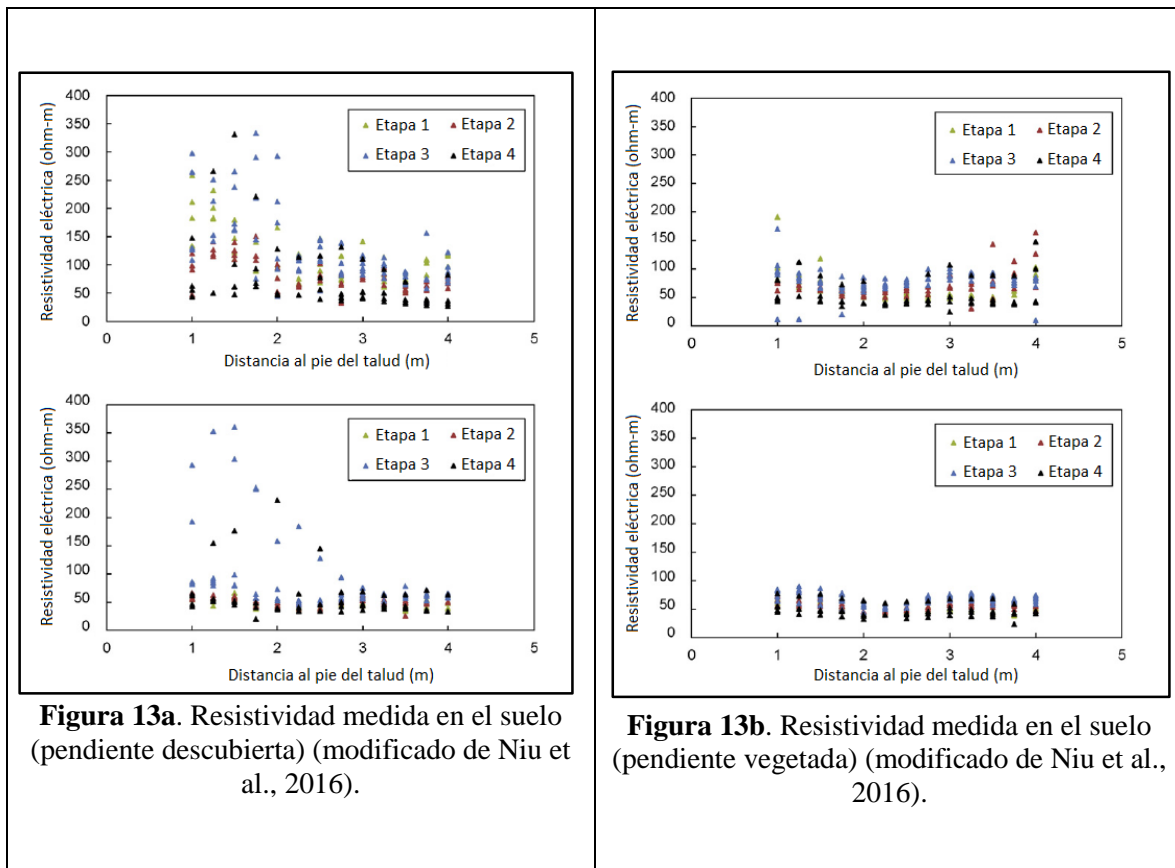


Figura 13a. Resistividad medida en el suelo (pendiente descubierta) (modificado de Niu et al., 2016).

Figura 13b. Resistividad medida en el suelo (pendiente vegetada) (modificado de Niu et al., 2016).

Los resultados muestran que la humedad del suelo a mayor profundidad (0.7 m) es más estable que a profundidad superficial (0.4 m) a lo largo del año dado que a menor profundidad, el material es más susceptible a los cambios meteorológicos (Niu et al., 2016). También se observa que la resistividad del suelo varía de forma más significativa en el talud descubierto que en el vegetado, indicando una fuerte influencia hidrológica de la vegetación (Niu et al., 2016).

4. POTENCIAL USO EN TALUDES DE MAICILLO EN LA REGIÓN DE CONCEPCIÓN

Tal como se aprecia en la Figura 4, los taludes superficiales de maicillo son propensos a sufrir deslizamientos rotacionales. En la región de Concepción, especialmente a lo largo de carreteras (Figura 14) ha habido y existe potencial ocurrencia de falla en taludes de maicillo. Si bien estos deslizamientos no conllevan pérdidas de vidas, ocasionan problemas logísticos en las redes viales (cierres de caminos).



Figura 14. Deslizamiento rotacional en talud de maicillo. Ruta O-390.

La especie *Carpobrotus chilensis*, conocida como doca (Figura 15.A), germina fácilmente en condiciones húmedas y es capaz de adaptarse a ambientes pobres en nutrientes y salinos (Weber y d'Antonio, 1999), además de ser una especie nativa chilena y crecer como maleza.

Al igual que la hiedra (Figura 12.A), la doca puede utilizarse para la estabilización de taludes superficiales (Figura 15.B) y dada su adaptabilidad, es posible utilizar estas especies en la estabilización de pendientes de Maicillo en el territorio de Concepción.



Figura 15.A. *Carpobrotus chilensis*.



Figura 15.B. Talud vegetado con *Carpobrotus chilensis* en San Rosendo, Chile.

Implementar especies vegetales no solo previene la erosión y el refuerzo del material en taludes, sino también permite mejorar la estética del paisaje (Coppin y Richards, 1990).

En temporadas de escasas precipitaciones se ve necesario el riego de la vegetación en los taludes. El costo de esta acción se ve minimizado frente al beneficio de las especies en el refuerzo y estética de las pendientes.

5. SUGERENCIA DE APLICACIÓN COMO ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN

Dado que el uso de plantas permite estabilizar el suelo frente a la excesiva erosión y debido a sus propiedades mecánicas e hidrológicas (Highland y Bobrowsky, 2008), se sugiere como alternativa de mitigación para taludes poco profundos de maicillo en Concepción en obras de menor envergadura, tales como pendientes en caminos y carreteras. Cabe mencionar el bajo costo de ejecución de la obra así como su beneficio ambiental y estético.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda un monitoreo de la humedad del suelo para cerciorar la hidratación de las raíces de las especies plantadas, principalmente en períodos secos o de bajas precipitaciones.

Por otro lado, en pos de la comparación de resultados, se recomienda llevar a cabo futuras investigaciones que contemplen la construcción de un talud sintético con sensores, que permita evaluar el efecto de especies distintas sobre él. De lo comentado en esta investigación, sería producente comparar el efecto de las especies doca y hedera.

Para ángulos mayores a 60° no se recomienda utilizar vegetación por sí sola como alternativa de mitigación sino ser acompañada por otras técnicas (Veticon Consulting, 2014).

7. REFERENCIAS

- Alarcón, F. 1995. Los riesgos naturales en el área metropolitana de Concepción a través de la información del Diario El Sur, 1960-1990. Concepción: Memoria para optar al título de Profesor de Historia y Geografía. Departamento de Historia, Universidad de Concepción.
- Ali, N., Farshchi, I., Mu'azu, M.A., Rees, S.W. 2012. Soil-Root Interaction and Effects on Slope Stability Analysis. *Electron. J. Geotech. Eng.* 17, 319-328.
- Au, S.W.C. 1998. Rain-induced slope instability in Hong Kong, *Engineering Geology*, Volume 51, Issue 1, Pages 1-36
- Avera, F.L., 1989. Moisturizing Agent (Google Patents).
- Cheung, R., Choi, K. 2013. Landslide disaster prevention and mitigation through works in Hong Kong. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5, 5, 354 - 365
- Coppin, N., Richards, I.G., 1990. Use of Vegetation in Civil Engineering. CIRIA-Butterworths.
- Cruden, D.M. A simple definition of a landslide. *Bulletin International Association. Engineering Geology*, 1991, N° 43, p. 27-29.
- Cruden D.M., Varnes, D.J. 1996. Landslides investigation and mitigation, transportation research board. National Academy Press, Special Report, 247, 36-75
- 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.
- Espinoza, C. 2004. Curso Hidráulica de Aguas Subterráneas y Su Aprovechamiento. Apuntes de clase, semestre Otoño 2004. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Essman, C. 1997. *Zonificación, análisis y evaluación de los desastres naturales en el Área Metropolitana de Concepción, entre los años 1885-1920. Diario El Sur.* Concepción: Memoria para optar al título de Profesor de Historia y Geografía, Departamento de Historia, Universidad de Concepción.
- Food and Agriculture Organization – UNESCO. 1981. Clave para la descripción de suelos Vol. I. Legend. Madrid. 169 p.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: Wiley
- Gan, J.K-M., D.G. Fredlund and H. Rahardjo, 1988. Determination of the Shear Strength Parameters of an Unsaturated Soil Using the Direct Shear Test. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, No. 8, pp. 500- 510.
- Gao, G., Yuan, J., Han, R., Xin, G., Yang, Z., 2007. Characteristics of the optimum combination of synthetic soils by plant and soil properties used for rock slope restoration. *Ecol. Eng.* 30, 303-311.
- González de Vallejo LI, Ferrer M, Ortuño L, Oteo C. 2002. Ingeniería geológica. Prentice Hall. Madrid. 715p.
- Hauser, A. 2000. *Remociones en masa en Chile*. Santiago de Chile: SERNAGEOMIN, Boletín N° 59, 2000.
- Highland, L.M., Bobrowsky, P. 2008. The landslide handbook—A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- Huat B.B.K., Ali F.H.J., Low T.H. 2006. Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical and Geological Engineering* 24. Pág. 1293-1306.
- International Society for Rock Mechanics. 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring. In Brown, E.T. (Ed.), ISRM Suggested Methods. Pergamon, Oxford.

- Irfan, T.Y. 1996. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 29, 5-35
- Jaque, E. (2008). "Geomorfología de la cuenca del río Andalién, Chile". *Revista geográfica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, N° 143. Enero 2008, pp. 97 – 116.
- Keim, R.F., Skaugset, A.E. 2003. Modelling effects of forest canopies on slope stability. *Hydrol. Process.* 17, 1457–1467.
- Mardones, M.; Echeverría, F. y Jara, C. 2006. Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción. *Revista Investigaciones Geográficas*, 2006, Vol. 38, p. 1-25.
- Liu, H.W., Feng, S., Ng, C.W.W. 2016. Analytical analysis of hydraulic effect of vegetation on shallow slope stability with different root architectures. *Computers and Geotechnics* 80 (2016) 115–120.
- Ng, C. W. W., Liu, H. W. & Feng, S. (2015). Analytical solutions for calculating pore water pressure in an infinite unsaturated slope with different root architectures. *Can. Geotech. J.* 52, No.12, 1981–1992.
- Niu, Q., Zhao, K., Wang, Y., Wu, Y. 2016. Examining the influence of vegetation on slope hydrology in Hong Kong using the capacitive resistivity technique. *Journal of Applied Geophysics*, Volume 129.
- Poblete, M., Dobry, R. (1968), Modelo dinámico del suelo de Concepción. *Revista IDIEM* 7, 6: 12-18.
- Ramesh, V., Chhonkar, P.K., 2001. Growth and uptake of nutrients by rice and lettuce grown on an acid sulphate soil amended with fly ash and lime. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 49, 222–225.
- 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.
- Stokes, A., Mattheck, C. 1996. Variation of wood strength in tree roots. *Journal of Experimental Botany*, 47: 693–699.
- Strange, P. J. 1990. The classification of granitic rocks in Hong Kong and their sequence of emplacement in Sha Tin, Kowloon and Hong Kong Island. *Geological Society of Hong Kong Newsletter*, g, 1, 18-27.
- Suárez, J. 1998. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Toro, K. 2007. Influencia de las características geológicas en las propiedades geotécnicas de granitoides jurásicos y suelos asociados en la Ruta 68. Memoria de título para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile.
- Trout, T.J., Ajwa, H., 2001. Polyacrylamide effects on infiltration in San Joaquin valley sandy loam soils. *J. Soil Water Conserv.*
- Varnes, D. J. 1978. Slope movement types and processes, in *Landslides--Analysis and Control*, edited by R. L. Schuster and R. J. Krizek, Spec. Rep. Natl. Res. Council. Transp. Res. Board, 176, pp. 11-33, Natl. Acad. of Sci., Washington, D.C.
- Veticon Consulting. 2014. VETIVER SYSTEM TECHNOLOGY FOR INFRASTRUCTURE STABILISATION. http://www.vetiver.org/AUS_slope_Truong_SA.pdf
- Vetterlein, D., Marschner, H., Horn, R. 1993. Microtensiometer technique for in situ measurement of soil matric potential and root water extraction from a sandy soil. *Plant Soil* 149 (2), 263–273.
- 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,

- Vysotskaya, N.A., Shevchuk, L.G., Russakovskii, V.M., 1990. Change of Physical-Chemical Properties of Hydrogels Based on Polyacrylamide Under Ionizing Emissions. Vol. 56. Academy Science Ukraine, Ukraine, pp. 1228–1230 Prospect Science 46, Msp, Kiev 22. 252650.
- Weber, E., d'Antonio, C. 1999. Germination and growth responses of hybridising *Carpobrotus* species (Aizoaceae) from coastal California to soil salinity. *Am. J. Bot.* 86, 1257–1263
- Wesley, L. 2009. Behaviour and geotechnical properties of residual soils and allophane clays. *Obras y Proyectos* 6, 5-10.
- World Meteorological Organization. 2004. Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970-2012).
- Xu, H., Li, T.B., Chen, J.N., Liu, C.N., Zhou, X.H., Xia, L., 2017. Characteristics and applications of ecological soil substrate for rocky slope vegetation in cold and highaltitude areas. *Sci. Total Environ.* 609, 446.
- Yeung, S.W., Yan W.M., Hau, C.H.B. 2016. Performance of ground penetrating radar in root detection and its application in root diameter estimation under controlled conditions. *Sci. China Earth Sci.*, 59, 145-155.
- Zhu, H., Zhang, L.M., Xiao, T., Li, X.Y. 2017. Enhancement of slope stability by vegetation considering uncertainties in root distribution, *Computers and Geotechnics*, Volume 85, Pages 84-89