

2017-6

Effects of Vegetation on Slope Stability: a Review


Roberto José Marín Sánchez

Universidad de Antioquia, rjose.marin@udea.edu.co

Juan Pablo Osorio

Technological University Dublin, juan.osorio@tudublin.ie

Follow this and additional works at: <https://arrow.tudublin.ie/engschcivart>

 Part of the [Civil Engineering Commons](#), [Geological Engineering Commons](#), and the [Geotechnical Engineering Commons](#)

Recommended Citation

Marín-Sánchez, R.J., Osorio, J.P. (2017) Efectos de la vegetación en la estabilidad de laderas: una revisión. *Revista Politécnica*, vol. 13, no. 24, pp. 113-126. <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1095>

This Article is brought to you for free and open access by the School of Civil and Structural Engineering at ARROW@TU Dublin. It has been accepted for inclusion in Articles by an authorized administrator of ARROW@TU Dublin. For more information, please contact arrow.admin@tudublin.ie, aisling.coyne@tudublin.ie.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike 4.0 License](#)

EFECTOS DE LA VEGETACIÓN EN LA ESTABILIDAD DE LADERAS: UNA REVISIÓN

Roberto José Marín Sánchez¹, Juan Pablo Osorio²

¹Ingeniero Civil. Correo electrónico: rjose.marin@udea.edu.co

²Ingeniero Civil, PGDip, MBA, MEng, PhD. Correo electrónico: juan.osorio@udea.edu.co

^{1,2}Grupo GeoR – GeoResearch International, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia – UdeA; Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia.

RESUMEN

A la ocurrencia de movimientos en masa se le asocian tanto factores condicionantes, que reducen la resistencia del suelo, como factores desencadenantes, que incrementan ciertas fuerzas que generan inestabilidad en el terreno. Entre estos factores, la presencia de vegetación tiene un papel importante asociado principalmente a mecanismos hidrológicos, como evapotranspiración e infiltración de lluvia, y a mecanismos mecánicos, como el refuerzo que aportan las raíces de los árboles y el peso de los mismos. En esta revisión se identifica la influencia de la vegetación en la estabilidad de laderas, describiendo los mecanismos que intervienen en la ocurrencia de movimientos en masa, señalando la forma en que afectan o benefician la estabilidad según las propiedades del terreno, condiciones climáticas y características del medio ambiente.

Palabras clave: Vegetación, estabilidad de laderas, movimientos en masa, árboles, infiltración.

Recibido 27 de junio de 2016
Received: June 27th, 2016

Aceptado 17 de marzo de 2017
Accepted: March 17th, 2017

EFFECTS OF VEGETATION ON SLOPE STABILITY: A REVIEW

ABSTRACT

Slope stability is usually affected by factors that reduce soil strength and increase driving forces acting on the slope material, sometimes generating mass movements. Among these factors, vegetation has an important role related to hydrological (e.g. evapotranspiration and infiltration) and mechanical (e.g. tree surcharge and root reinforcement provided by trees) mechanisms. In this review, vegetation influences associated to slope stability are identified, describing the mechanisms involved in the occurrence of mass movements. Finally, the way these factors affect slope stability is explained according to soil properties, climatic conditions and environmental characteristics.

Keywords: *Vegetation, slope stability, landslides, trees, infiltration.*

Cómo citar este artículo: R. J. Marín-Sánchez, J. P. Osorio, "Efectos de la vegetación en la estabilidad de laderas: una revisión," *Revista Politécnica*, vol. 13, no. 24, pp. 113-126, 2017.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han realizado numerosos estudios que demuestran que la morfología y los procesos de ladera son influenciados significativamente por la distribución de la vegetación en el terreno. Generalmente, la vegetación tiene un impacto positivo en la estabilidad del suelo en terrenos inclinados [1], pudiendo actuar como una barrera protectora entre el suelo y los elementos que provocan la ocurrencia de movimientos en masa [2].

Se denomina movimientos en masa a todos los procesos desarrollados en laderas en los cuales la acción de la gravedad, por sí sola, se constituye en el agente de transporte dominante de masas de suelo o roca [3]. La estabilidad de una ladera depende del equilibrio entre unas fuerzas resistentes y unas fuerzas desestabilizadoras, las cuales se desarrollan sobre una masa de suelo potencialmente inestable. Las fuerzas desestabilizadoras generan un esfuerzo cortante que debe ser contrarrestado por la resistencia cortante disponible. Basado en esto, las causas de inestabilidad de un terreno inclinado pueden subdividirse en factores internos y factores externos. Los factores internos reducen la resistencia disponible del suelo, mientras que los factores externos incrementan las fuerzas desestabilizadoras que actúan sobre la masa de terreno [4].

Uno de los factores internos que tienen mayor influencia en el desencadenamiento de diferentes tipos de movimientos en masa son las propiedades forestales [5]. La influencia de los árboles en la estabilidad se puede dividir en dos tipos de mecanismos: hidrológicos y mecánicos. Así mismo, la forma en que la presencia vegetal incide en la estabilidad contiene tanto elementos que contribuyen a la estabilidad como otros que favorecen la inestabilidad del terreno.

Desde el punto de vista hidrológico, la vegetación reduce el agua disponible para infiltración y los niveles de humedad del suelo mediante la interceptación, evaporación de lluvia en el dosel arbóreo y el proceso de transpiración. Sin embargo, puede aumentar la capacidad de infiltración del suelo al aumentar la rugosidad y propiciar la generación de grietas de desecación. Mecánicamente, la vegetación aporta a la

estabilidad mediante anclaje de las raíces en estratos de suelo más estables, atando lateralmente superficies susceptibles a falla y proporcionando una membrana de refuerzo a la capa del suelo, de tal manera que se aumenta la resistencia cortante del terreno. No obstante, el peso de los árboles aumenta los componentes de fuerza normales y paralelos a la ladera, lo que en determinados casos favorece la inestabilidad, así como sucede con las fuerzas dinámicas transmitidas por el viento a través del tronco de los árboles [6].

En este sentido, la importancia de los diferentes mecanismos asociados a la presencia vegetal y que intervienen en la estabilidad de laderas ha sido considerada por diferentes investigadores alrededor del mundo, por lo que en las últimas décadas se ha progresado en su estudio hasta el punto de que se han podido incluir algunos parámetros que representan los efectos de los árboles en modelaciones de susceptibilidad a ocurrencia de movimientos en masa de laderas o en grandes áreas de terreno (por ejemplo [7] [5]). Sin embargo, debido a que muchos de estos parámetros no han sido estudiados detalladamente y no se cuenta con herramientas que puedan cuantificar o incluir su aporte en estudios de estabilidad, las modelaciones actuales de estos mecanismos tienen un largo camino por recorrer para poder determinar la contribución de la vegetación en la estabilidad con aproximaciones más precisas, detalladas y confiables.

Para poder avanzar en los métodos de evaluación de la estabilidad de laderas, cuantificando la contribución de la vegetación, es necesario ampliar el conocimiento sobre dichos mecanismos y las técnicas utilizadas actualmente para su estudio. En este sentido, en la presente revisión se busca contribuir a la comprensión de los mecanismos asociados a la presencia de cobertura vegetal con relación a la estabilidad de laderas. Estos mecanismos son descritos y profundizados conceptualmente, enunciando las relaciones existentes entre sí, así como su comportamiento por la intervención de otras variables como las características climáticas, del suelo, profundidad del nivel freático, entre otros factores del medio ambiente.

De esta manera, para llevar a cabo esta revisión se identificó cada uno de estos mecanismos y se realizó una búsqueda de información en bases de

datos bibliográficas para ilustrarse en el estado actual del conocimiento de los mismos, evaluar el material encontrado y seleccionar las fuentes de información para el desarrollo de la revisión bibliográfica. Para esto, se tomó como punto de partida la descripción de los mecanismos hidrológicos y mecánicos agrupados en la **Tabla 1**, que es una adaptación de la presentada por Sidle y Ochiai [6], la cual es un resumen de las influencias relativas de la vegetación en la estabilidad de laderas. Dicho resumen es basado en el presentado por Greenway [8], aunque ampliamente modificado.

2. EFECTOS DE LA VEGETACIÓN EN LA ESTABILIDAD DE LADERAS

Los efectos de la vegetación arbórea en la ocurrencia de movimientos en masa se pueden agrupar en dos grandes grupos: mecanismos hidrológicos y mecanismos mecánicos. Las aproximaciones actuales sobre la relación de las variables asociadas a la vegetación que influyen en el desencadenamiento de movimientos de tierra se basan en numerosas investigaciones que se han llevado a cabo alrededor del mundo.

Tabla 1. Resumen de las influencias de la vegetación en la estabilidad de laderas. 'A' denota mecanismos adversos para la estabilidad, 'MA' denota mecanismos marginalmente adversos, 'MB' denota mecanismos marginalmente beneficiosos y 'B' indica mecanismos beneficiosos.

Mecanismos	Influencias sobre tipos de deslizamiento	
	Superficial, rápido	Profundo
Mecanismos hidrológicos		
1. Interceptación de la precipitación por el dosel arbóreo, favoreciendo la evaporación y reduciendo el agua disponible para infiltración.	B	B
2. Sistema de raíces extraen agua del suelo para efectos fisiológicos (a través de la transpiración), lo que lleva a reducir los niveles de humedad del suelo.	B	B
3. Raíces, tallos y camada orgánica aumentan la rugosidad de la superficie del terreno y la capacidad de infiltración del suelo.	MA	MA
4. El agotamiento de la humedad del suelo puede causar grietas de desecación, lo que resulta en una mayor capacidad de infiltración y facilita la infiltración del agua a un plano de falla más profundo.	MA	MA
Mecanismos mecánicos		
5. Raíces individuales anclan el manto inferior del suelo a un estrato de suelo más estable.	B	MB
6. Raíces resistentes atan a través de planos de debilidad a lo largo de flancos de posibles deslizamientos.	B	B
7. Raíces proporcionan una membrana de refuerzo a la capa del suelo, aumentando la resistencia cortante del suelo.	B	B
8. Las raíces de vegetación leñosa se anclan en estratos firmes, prestando apoyo a capas de suelo en partes superiores de la ladera, mediante apuntalamiento y arqueado.	B	MB
9. El peso de los árboles aumenta los componentes de fuerza normales y paralelos a la ladera (sobrecarga).	MA/MB	MA/MB
10. El viento transmite fuerzas dinámicas a la capa del suelo a través del tronco de los árboles.	A	MA

2.1 Mecanismos hidrológicos

La vegetación tiene una influencia importante en la hidrología de la ladera pero también existe esta dependencia en el sentido contrario, de tal manera que las características de la vegetación tienen implicaciones directas en la actividad de erosión y de movimientos en masa [2]. Esta influencia de la vegetación se evidencia en la reducción del agua disponible para infiltración debido a los procesos de interceptación de lluvia por parte del dosel arbóreo y su posterior evaporación, la disminución de niveles de humedad del suelo debido al proceso fisiológico que experimentan las plantas extrayendo agua del suelo mediante transpiración, el aumento de la rugosidad en la superficie del terreno debido a la presencia de componentes de las plantas como tallos y raíces y la generación de grietas de desecación debido al agotamiento de humedad.

2.1.1 Evapotranspiración: La evapotranspiración es un componente importante para sostener el balance hídrico y energético de los bosques [9]. Está compuesta de diferentes procesos de flujo de vapor de agua, entre los cuales está la evaporación de la superficie del suelo, transpiración de las plantas y evaporación del agua interceptada por el dosel arbóreo [10]. Así mismo, éstos son controlados por determinados procesos bióticos y físicos [11] [12].

De acuerdo a las características del suelo, la vegetación tiene cierto potencial de evapotranspiración que, de acuerdo a la disponibilidad de agua lluvia y agua subterránea, se puede conseguir una humedad de equilibrio [13]. Las diferentes coberturas vegetales tienen diferentes balances de los principales flujos de vapor de agua mencionados anteriormente, los cuales representan pérdidas de agua en términos de su relación con la estabilidad de laderas. De estos procesos, la transpiración y la evaporación del agua interceptada por la vegetación se consideran los de mayor importancia para la estabilidad. Por su parte, la evaporación desde la superficie del suelo está controlada por la profundidad del nivel freático, la distribución de la presión de poros y balances térmicos a niveles locales, teniendo que en terrenos con amplia cobertura vegetal las variaciones son pequeñas en comparación con los otros componentes que afectan la evapotranspiración [14] [15] [16] [6].

La tasa de evapotranspiración depende de la turbulencia, la cual es resultado de la distribución

del viento y la rugosidad superficial, permitiendo la disipación del vapor de agua en el aire. Por esto, la evapotranspiración no es constante en el tiempo, sino que varía significativamente con las condiciones de contorno atmosféricas y el estado de la superficie del suelo y vegetación, influyendo de manera directa en las tasas de evaporación y transpiración [2].

Se conoce como potencial de evapotranspiración a la máxima cantidad de agua que puede ser evaporada, bajo las condiciones atmosféricas actuales, en un suelo o en una superficie de agua uniforme cuando no hay ninguna limitación en la disponibilidad de agua [17] [18]. Debido a la dificultad para medir de forma separada los flujos de interceptación, transpiración y evaporación, es muy común que se agrupen bajo el concepto de evapotranspiración en la evaluación de la estabilidad de laderas. En general, las tasas de evapotranspiración en regiones templadas son muy bajas en suelos desprovistos de cobertura vegetal, varias veces superior en pastizales y de 5 a 10 veces mayor en bosques [15] [6].

En regiones templadas y secas, el balance de evapotranspiración se ve influenciado por las estaciones. En climas templados, durante la temporada de lluvias de invierno, es probable que la evapotranspiración tenga poco efecto sobre la humedad del suelo antecedente, debido a que los suelos ya están cerca de la saturación y la transpiración es baja [19] [20] [21], haciendo que el efecto de la evapotranspiración no sea significativo en la iniciación de deslizamientos. Sin embargo, debido a que en este clima la mayoría de movimientos en masa ocurren durante períodos prolongados de lluvias invernales, la evapotranspiración puede tener efecto en la ocurrencia de deslizamientos si se produce una tormenta cerca del principio o del final de la temporada de lluvias [22] [23], así como en los ocurridos en condiciones secas y desencadenados por eventos de lluvia de alta intensidad [6].

Por su parte, en climas tropicales la evapotranspiración tiene un papel más importante en la alteración de la humedad del suelo, debido a que la evapotranspiración es alta en bosques tropicales durante todo el año [6] [8] [23].

Aunque es difícil de evaluar en estudios experimentales la evaporación en la superficie del suelo bajo el dosel arbóreo, en terrenos con buena cobertura vegetal puede comprender un poco más

del 10% de la evapotranspiración total; a su vez, en zonas secas con escasa vegetación podrían presentarse mayores tasas de evaporación en la superficie del suelo [24] [6]. Por su parte, la interceptación y posterior evaporación del agua de la cubierta vegetal es particularmente significativa en los bosques de coníferas, donde pérdidas tanto de nieve y de lluvia de estos densos follajes pueden representar entre el 30% y el 50% de la precipitación anual bruta [25] [6].

2.1.1.1 Interceptación de la lluvia: En términos de los efectos de la vegetación en la estabilidad de laderas, se define interceptación del dosel como la cantidad de lluvia interceptada, almacenada y perdida por evaporación desde la capa superior de las hojas de los árboles [26]. Esta agua capturada por la vegetación representa una disminución en la cantidad de agua disponible para ser infiltrada. Igualmente, la presencia vegetal tiene cierta influencia en el tiempo en el cual el agua llega a la superficie del terreno [6].

Durante un evento de lluvia, algunas gotas caen directamente al terreno, mientras otras son interceptadas por árboles, hierbas y arbustos. El proceso en el cual el agua fluye a través del dosel o gotea desde las hojas se denomina escurrimiento libre. Así mismo, el proceso en el que el agua es canalizada por los tallos y el tronco, y alcanza la superficie del suelo, se conoce como escurrimiento cortical. El agua interceptada es la que se recolecta en las hojas y ramas; y el agua evaporada desde la vegetación hacia la atmósfera representa las pérdidas por evapotranspiración [27] [28]. Las pérdidas por interceptación son generalmente cuantificadas como la diferencia entre la precipitación total y la precipitación efectiva, la cual es la suma del escurrimiento libre y el escurrimiento cortical [29].

Las pérdidas por interceptación dependen principalmente de la capacidad que tienen las especies vegetales para retener la precipitación. Además, la interceptación de lluvia puede ocurrir en todos los tipos y niveles de vegetación, incluyendo, por ejemplo, la maleza y hojarasca [2]. Sin embargo, es menor la cantidad de agua que puede ser evaporada por parte de hierbas y arbustos debido a que es menor la precipitación que alcanza el sotobosque (cuando hay presencia de dosel arbóreo), a que tienen una baja rugosidad superficial y a que son protegidos del sol y el viento por los árboles [6]. Estas pérdidas dependen en

gran medida de la estructura del bosque, las características de la precipitación y las variables climáticas que rigen la tasa de evaporación durante y después de los eventos de lluvia [30].

Los árboles con mayor densidad de follaje suelen retener las gotas de lluvia por mayor tiempo. Así mismo, de acuerdo a la intensidad de la lluvia se retiene una mayor o menor cantidad de agua, siendo menor en eventos de precipitación muy intensos [13]. En términos de estabilidad, el aporte de la interceptación no es muy significativo en el desarrollo de deslizamientos superficiales que ocurren en temporadas extensas de lluvias, excepto en trópicos y subtropicos, donde la evapotranspiración es alta a lo largo de todo el año [6] [23].

2.1.1.2 Transpiración: La transpiración vegetal es un fenómeno ocurrido en las plantas, las cuales experimentan un proceso físico y biológico en el cual transforman agua líquida a estado gaseoso a través de su metabolismo [31]. Dicho fenómeno consiste en una adsorción del agua del suelo por parte de las raíces, transporte a través de la planta de los compuestos orgánicos obtenidos del suelo y liberación del vapor de agua por medio de las aberturas o estomas del follaje [6].

La capacidad que tienen las plantas para consumir humedad del suelo, valorada en sus tasas de transpiración, dependen de la disponibilidad de energía solar, humedad del suelo, tipo, tamaño y edad de las especies, profundidad que alcanzan sus raíces, densidad de vegetación, índice de área foliar en las especies, conductancia de las hojas, albedo del follaje, estructura del dosel, características del suelo y otros factores climáticos y ambientales [32] [6] [8] [13] [25]. A pesar de esto, se ha observado que cuando se dispone de agua de manera libre, generalmente se presentan tasas de transpiración similares [33] [34] [35] [6].

La reducción en la humedad, aportada principalmente por el sistema de raíces, representa una influencia beneficiosa en la estabilidad de laderas en relación al desarrollo de deslizamientos tanto superficiales como profundos. En terrenos con densa presencia vegetal la transpiración es el proceso dominante en la conversión de agua a vapor, siendo más importante que el efecto de evaporación del agua interceptada por el dosel arbóreo y el agua evaporada desde la capa superficial del suelo [6]. La acción del sotobosque

en la variación de la transpiración es de mayor importancia cuando los árboles están enraizados profundamente y tienen acceso a aguas subterráneas [16].

A pesar de que conceptualmente se ha logrado un gran avance identificando las variables de mayor y menor incidencia en el estudio de la transpiración en las plantas, actualmente resulta ser muy complicada su medición y es difícil llevar a cabo una separación de los flujos de transpiración e interceptación [6] [15].

La tasa de transpiración puede deducirse a partir de mediciones del flujo de savia. Sin embargo, estas medidas son factibles solamente para árboles grandes y en terrenos poco densos, por lo que es difícil captar la heterogeneidad espacial y temporal de parámetros relacionados con la acción de la transpiración en terrenos con amplia cobertura vegetal [2].

2.1.2 Infiltración: Se define infiltración como movimiento de agua desde el nivel superficial del terreno hasta estratos inferiores del suelo a través de los poros, intersticios y discontinuidades existentes en la masa del terreno [13]. En general, el impacto de la infiltración de la lluvia en la estabilidad se evidencia en los cambios en succión y presión de poros positivas, variación de la profundidad del nivel freático, aumento del peso unitario del suelo y reducción del efecto de resistencia cortante aportado por las rocas y el suelo [35] [37].

Como se describe a continuación, la presencia de cobertura vegetal en un talud puede favorecer la infiltración debido a un aumento en la rugosidad del terreno y a generación de grietas de desecación en el mismo.

2.1.2.1 Aumento en rugosidad de la superficie del terreno: La presencia de vegetación ocasiona un aumento de la rugosidad en la superficie generado por la disposición y forma de la cobertura vegetal, así como por la presencia de raíces, tallos y materia orgánica al nivel de la superficie del suelo. Una mayor rugosidad en la superficie del suelo permite un aumento en la capacidad de infiltración de agua en el terreno [6].

Como se ha mencionado anteriormente, la rugosidad superficial está relacionada con la turbulencia, la cual permite que el vapor de agua se

disipe en el aire. Por esto, la rugosidad superficial tiene incidencia en el proceso de evaporación. Dicho efecto tiene mayor importancia en el caso de árboles aislados, de tal manera que un incremento en la turbulencia conduce a un aumento en las tasas de evapotranspiración [2]. En cambio, no sucede lo mismo con las coberturas vegetales de baja altura como hierbas y arbustos, puesto que tienen una menor rugosidad superficial y experimentan un menor intercambio turbulento de aire suprayacente [6].

Por otra parte, la rugosidad de la superficie del suelo afecta la velocidad de escorrentía, que si bien también depende de otros factores como la pendiente, la intensidad de la lluvia y la humedad [13], se puede afirmar que una mayor rugosidad del terreno hace que disminuya la velocidad de escorrentía y que, de acuerdo a las condiciones de la lluvia y capacidad de infiltración del terreno, puede permitir una mayor infiltración de agua en el suelo.

2.1.2.2 Generación de grietas de desecación en el terreno: Las grietas de desecación se forman en el suelo debido a la pérdida de agua, siendo comunes en sedimentos ricos en arcilla que al secarse se contraen y desarrollan fracturas en intersección [38]. La presencia de cobertura vegetal con raíces profundas puede favorecer la formación de grietas de desecación debido al agotamiento de humedad del suelo, principalmente en regolitos con alto contenido de arcillas, de manera que permite la creación de rutas preferenciales para una infiltración rápida y en profundidad [6].

Dicho agotamiento de la humedad del suelo ocurre generalmente en la estación o temporada con condiciones climáticas secas, debido a la acción de la evaporación y la transpiración de las plantas. Estas grietas se desarrollan en forma vertical, pudiendo tener anchos de 20 cm y profundidades de 1 m. Las acciones repetidas de humedecimiento y secado producen cambios volumétricos en los suelos que conducen a que se generen superficies irregulares [39] [2].

2.2 Mecanismos mecánicos

Las propiedades mecánicas de la vegetación tienen efectos beneficiosos y adversos en la estabilidad del terreno. Por un lado, la presencia de raíces fuertes permite que se refuerce el suelo al anclarse en estratos de suelo más estables; por su parte, raíces laterales atan el terreno al desarrollarse a través de

posibles planos de falla. Así mismo, los sistemas de raíces pueden proveer una membrana de refuerzo en el manto del suelo, lo que incrementa la resistencia cortante del mismo. Igualmente, las raíces y troncos de los árboles pueden proveer soporte a la capa de suelo de la parte superior de la ladera mediante apuntalamiento y arqueado. Por otra parte, el peso de los árboles representa una sobrecarga que aumenta los componentes de fuerza normales y paralelos a la ladera, y las fuerzas dinámicas del viento transmitidas al suelo a través del tronco y raíces de los árboles actúan como fuerzas que pueden afectar la estabilidad de una ladera.

2.2.1 Anclaje en manto de suelo más profundo:

Durante la falla de un talud, las raíces de los árboles permiten proporcionar un efecto de anclaje de la masa deslizante a la parte estable del suelo, logrando prevenir un movimiento adicional [40] [41]. Adicional al refuerzo que provee, el papel de la vegetación en el anclaje del suelo se refleja como una contribución a su estabilidad, la cual depende de factores tales como la morfología del sistema de raíces, resistencia, distribución e interacción del suelo con las raíces [42].

El anclaje que pueden proveer tocones o troncos de árboles se ha estudiado debido a su frecuente uso como ancla en sistemas de extracción de madera por cables, de tal manera que ha sido estudiada la resistencia al arrancamiento de los mismos [43] [44].

Igualmente, el anclaje de las raíces de los árboles ha sido estudiado desde el punto de vista de la resistencia a las fuerzas inducidas por el viento que causan caída de árboles en los bosques [45] [46] [47] [6]. En general, existen numerosos reportes de los beneficios de las raíces penetrando a través de mantos de suelo relativamente superficiales y anclándose en estratos más estables [48] [49] [50] [6].

Estudios sobre los efectos de la acción del viento en el crecimiento de la raíz mostraron que cambios en la morfología y topología del sistema de raíces de árboles jóvenes sometidos a cargas de viento presentaron un incremento de su anclaje [51] [52] [2].

Desde el punto de vista geomecánico, las raíces atraviesan las superficies cortantes, actuando como anclajes individuales que salen a través de la matriz

del suelo sin fallar, movilizándolo una fuerza de fricción en la interfaz suelo-raíz. Este es el segundo mecanismo de mayor importancia asociado al efecto del sistema de raíces. Por su parte, el otro mecanismo es el aumento de la resistencia cortante del suelo debido a la transferencia de los esfuerzos cortantes a través de las fibras de las raíces [53]. Generalmente, estos efectos geomecánicos son representados en modelos de estabilidad de taludes como un incremento al término de cohesión del suelo en la ecuación de criterio de falla de Mohr-Coulomb [54].

2.2.2 Unión a través de planos de debilidad a lo largo de los flancos de posibles fallas:

En taludes, la presencia de raíces laterales puede proporcionar un refuerzo al terreno en esta dirección [55] [2]. La unión lateral de capas inestables a través de los planos de debilidad es un caso especial de refuerzo de raíces laterales, las cuales atan a través de los flancos de la masa deslizante en potencia [6].

La presencia de raíces a lo largo de la zona de corte, donde se concentran los esfuerzos, tiende a coser los elementos que son separados con el desplazamiento sobre la superficie de falla. Así, hay dos efectos que se desarrollan en la falla: el directo, que tiende a oponerse al movimiento relativo de los dos bloques fuera de la zona de corte, y un segundo, el cual es normal al plano de corte, que tiende a aumentar la resistencia asociada a la fricción en la superficie de falla [54].

En una investigación realizada en las cordilleras de Oregón, Schmidt et al. [56] concluyeron que la cohesión lateral de las raíces representaba el mecanismo dominante de refuerzo en los suelos superficiales de esta zona. Así mismo, numerosos estudios han notado los efectos estabilizadores de raíces grandes, tanto a lo largo de los flancos como en las superficies deslizantes de movimientos de tierra potenciales [57] [58] [59] [6] [48] [50]. Por otro lado, otros autores han descrito los beneficios del refuerzo de las raíces laterales [60] [61] [20] con la consideración ampliamente extendida de que las raíces laterales imparten una mayor protección contra la ocurrencia de deslizamientos superficiales en comparación con fallas profundas [62]. De esta manera, aunque las raíces de los árboles pueden dar estabilidad en suelos más profundos mediante refuerzo lateral que atraviesa planos de debilidad [63] [57], dicho efecto beneficioso disminuiría con el

incremento del área y la profundidad de la falla en potencia [6].

2.2.3 Incremento de la resistencia cortante del suelo: Generalmente, la contribución de las raíces de la cobertura vegetal a la resistencia cortante del suelo se reconoce como de mayor aporte a la estabilidad de laderas que las pérdidas por evapotranspiración [64] [65] [6] [8] [48].

La rigidez y la deformación de las fibras de las raíces de los árboles pueden reforzar significativamente la resistencia al corte del suelo [66] [67] [6]. El suelo con presencia de raíces de árboles actúa como un material compuesto, en el cual las raíces se incrustan en la matriz del suelo y contribuyen al aumento de la resistencia cortante debido a la alta resistencia a la tracción que desarrollan las raíces. En cambio, la matriz del suelo es altamente resistente a la compresión pero es débil a la tracción. Por lo tanto, el efecto combinado de suelo y raíces da como resultado un suelo reforzado [54].

Mecánicamente, en condiciones de carga cortante, uno de los efectos de este material compuesto es la transferencia de los esfuerzos cortantes desarrollados en la matriz de suelo, los cuales se transfieren a las fibras de las raíces a través de la resistencia a la tracción movilizada, generando un aumento de la resistencia del suelo enraizado [53] [54]. Este mecanismo representa uno de los aspectos geomecánicos más significativos asociados al efecto del sistema de raíces en el suelo.

En términos generales, la influencia que representan las raíces en la resistencia al corte del suelo es más significativa en el momento en que ha fallado y posterior a la fase crítica, haciendo más deformable al material compuesto de suelo y raíces. En cambio, en la fase previa a la falla, la presencia de raíces no es significativa desde el punto de vista de aporte a la rigidez inicial del sistema [54].

2.2.4 Anclaje en estrato firme mediante apuntalamiento y arqueo: El apuntalamiento se puede describir como un fenómeno en el que la presencia del sistema de raíces y el tronco de los árboles, o el tallo para la vegetación en general, bloquean el movimiento del suelo. La acción de estos elementos de la cobertura vegetal, en aporte a la estabilidad del terreno mediante

apuntalamiento, es más significativa cuando tanto los tallos como las raíces presentan suficiente diámetro para que actúen de manera rígida en su anclaje [2].

En este fenómeno, el tronco proporciona estabilidad a un cilindro de suelo ubicado arriba del mismo, en el sentido de la pendiente, debido a que el anclaje del tronco actúa como contrafuerte en la ladera, ejerciendo resistencia a los esfuerzos cortantes y restringiendo lateralmente el movimiento superficial del talud [68] [2]. La magnitud de la contribución del apuntalamiento a la estabilidad de la masa del suelo depende tanto de la profundidad del manto del suelo y el nivel freático como del grado de penetración que desarrollan las raíces en el manto rocoso [69] [70].

Se define como arqueo a un fenómeno similar que se desarrolla debido a la presencia de múltiples árboles y/o elementos de la vegetación. Cuando hay dos árboles ubicados a corta distancia en el sentido horizontal del talud (en una misma cota, separados lateralmente) y generan el fenómeno de apuntalamiento en el terreno, se puede lograr determinada estabilidad en el suelo que se encuentra entre ambos contrafuertes, el cual no está apuntalado pero puede ganar resistencia al deformarse en forma de arco [70]. Cuando una zona de una ladera experimenta una condición de arqueo, se puede afirmar que los árboles en crecimiento actúan como pilas ancladas en un estrato firme del subsuelo [2] [64].

La combinación de las fuerzas ejercidas sobre las raíces y el tronco de los árboles, como resultado del apuntalamiento y el arqueo, son consideradas como fuerzas estáticas debido a la forma paulatina en que aumentan su magnitud [2].

2.2.5 Sobrecarga de los árboles: En términos del efecto de la vegetación en la estabilidad de taludes, sobrecarga puede hacer referencia tanto al peso individual de un árbol en un terreno inclinado como al peso combinado de toda la vegetación, desde el punto de vista de un análisis global de la estabilidad del talud [2]. En este contexto, se puede incluir al término sobrecarga cualquier carga externa adicional al peso del suelo, que repose sobre la superficie del suelo, tal como la carga generada por todo tipo de vegetación creciente o ya existente en el terreno, material depositado por la acción de movimientos de tierra o actividad volcánica, o incluso carga aportada por agua como en el caso

de precipitación, flujo superficial y flujo subterráneo [71].

El peso de los árboles en un talud, y por lo tanto la sobrecarga arbórea, dependen del tipo de especie, el diámetro del tallo, la altura y la densidad de árboles madereros y su espaciamiento en el terreno. Sin embargo, un bosque relativamente denso no representa más que una pequeña sobrecarga [7] [71].

Generalmente, la sobrecarga arbórea no se considera como una carga importante en el análisis de la estabilidad de taludes, representando un componente mecánico de inestabilidad no muy significativo [6] [13]. De hecho, para la mayoría de bosques maduros el peso total del suelo sobre un plano de falla potencial suele superar ampliamente el peso de todos sus árboles, de manera que cualquier recargo adicional aportado por éstos no será de mucho efecto en la estabilidad de taludes [72] [73] [74] [75] [76].

Sidle [77], en un estudio sobre la importancia relativa de algunos factores en el cálculo del factor de seguridad (FS) en suelos propensos a sufrir deslizamientos en la costa de Alaska, determinó que en suelos no cohesivos el peso de la vegetación tiene una influencia menor que la cohesión adicional aportada por las raíces. [78], en un análisis de estabilidad geotécnica para fallas planas en riberas, incorporando los efectos del refuerzo de las raíces y la sobrecarga, sugieren que cambios negativos en FS inducidos por la vegetación, es decir, que su presencia genera un decrecimiento neto de la estabilidad, se presentaron en los casos de estudio cuando las raíces de los árboles no interceptan el plano de falla, siendo la sobrecarga el único factor vegetativo de influencia en la estabilidad.

Más allá de esto, su efecto consiste en incrementar los componentes de fuerza normal y paralelo al talud sobre una superficie de deslizamiento potencial [2] [6]. En suelos no cohesivos, si el ángulo del terreno es mayor que el ángulo de fricción interno del suelo, se considera que la sobrecarga genera un pequeño efecto desestabilizador; por el contrario, si el ángulo del talud es menor que el ángulo de fricción del suelo, el peso de los árboles debería proporcionar un efecto estabilizador neto sobre la ladera [6]. En este último caso, cuando se tiene un valor alto de ángulo de fricción, el efecto beneficioso de un incremento

en la sobrecarga es ligeramente mayor en taludes de pendiente pronunciada, profundidades del nivel freático elevadas y suelos profundos [77]. Por su parte, Gray y Megahan [64], señalaron que la sobrecarga representa un factor beneficioso en taludes infinitos cuando se presentan valores de cohesión pequeños, agua subterránea en niveles profundos, valores altos del ángulo de fricción y pendientes relativamente suaves [71].

2.2.6 Fuerzas del viento: La acción del viento y los esfuerzos causados por cargas dinámicas reducen la resistencia al corte del terreno e incrementan los esfuerzos cortantes, pudiendo desencadenar eventos de movimientos de masa, los cuales son favorecidos cuando se presentan niveles altos de humedad del suelo [79] [80].

El viento representa una fuerza de carga externa que es transferida hacia abajo del tallo del árbol y hasta las raíces, por donde se transfiere eficientemente al interior del suelo en los casos en que se previene la falla mecánica del árbol. Si el sistema de raíces no está constituido de un anclaje adecuado, el árbol puede derribarse mediante un doblez o una rotura en la raíz o en la base del tallo, o incluso puede ser arrancado desde su raíz [81]. Cuando el suelo es poco profundo, los árboles altos son más susceptibles a caerse durante vendavales, causando una reducción en la estabilidad del talud [2].

El modo de falla de un árbol que es desarraigado durante un vendaval depende principalmente de la morfología de la interfaz suelo-raíz (es decir, raíces y suelo adherido a ellas) y del tipo de suelo. Durante la primera etapa de arrancamiento del árbol el peso de las raíces y el suelo adherido proporcionan la resistencia inicial al volcamiento. Si la fuerza en el tallo es mayor que la resistencia de la interfaz suelo-raíz, el árbol es arrancado de raíz y el suelo que se encuentra alrededor sufre una ruptura [2]. La resistencia a la tracción de las raíces en el lado que viene el viento proporciona una alta resistencia al arrancamiento, mientras que la resistencia a la flexión de las raíces en el lado opuesto brinda una resistencia menor [82] [83] [2].

En algunos casos, y principalmente en ciertas zonas geográficas, la ocurrencia de avalanchas y flujos de escombros ocurridos en suelos han sido directamente relacionados con la acción del viento, el cual llega a causar arrancamiento del tronco de los árboles o la rotura del mismo. Dichos efectos

pueden incrementar sustancialmente la susceptibilidad de los taludes a la ocurrencia de deslizamientos [79]. Así mismo, se desarrollan flujos de escombros rápidos y canalizados, desplegados sobre las paredes laterales y frontales de barrancos, como resultado de deslizamientos desencadenados por la acción del viento [80].

Los árboles pueden imponer una pequeña inestabilidad en los taludes debido a los efectos del viento [6], considerando las cargas del viento relevantes cuando se analiza la estabilidad de árboles individuales. Sin embargo, la acción del viento no representa la misma importancia para el análisis de la estabilidad del talud a nivel general, debido a que las fuerzas del viento constituyen una menor proporción de las posibles fuerzas perturbadoras. Además, los árboles en el interior del terreno están en cierta medida protegidos por los ubicados en los bordes, siendo estos últimos los que estarían mayormente afectados por la acción del viento [84]. Aun así, la ocurrencia de movimientos en masa desencadenados por vendavales se asocia de forma directa con la alta exposición de árboles que se encuentran en fronteras, como la generada debido a la tala de árboles [80].

3. CONCLUSIONES

La presencia de la vegetación en laderas incide de diferentes formas y mediante diversos mecanismos en la estabilidad del terreno. Estos mecanismos se pueden agrupar en mecanismos hidrológicos y mecanismos mecánicos, los cuales pueden constituir tanto efectos adversos como beneficiosos en la estabilidad asociada a la ocurrencia de movimientos en masa.

Los mecanismos hidrológicos se relacionan principalmente con la infiltración del agua de la lluvia en el suelo, en términos de la cantidad de agua y facilidad de la misma para alcanzar estratos más profundos y causar variaciones en las presiones de poros, lo cual afecta la estabilidad en el terreno. Entre estos mecanismos se encuentran la interceptación de la lluvia, evaporación, transpiración, aumento de la rugosidad del terreno y generación de grietas de desecación. Por su parte, los mecanismos mecánicos están principalmente asociados con el refuerzo mecánico aportado por las raíces de los árboles, aunque en este grupo se han incluido otros efectos como las fuerzas del viento y la masa de la vegetación.

Los mecanismos descritos evidencian que en términos generales los efectos de la vegetación en laderas tienden favorecer la estabilidad. Así mismo, numerosas investigaciones demuestran cómo los diferentes efectos de la presencia vegetal, principalmente de los árboles, contribuyen a la estabilidad de laderas. Sin embargo, cabe destacar que la complejidad de las variables asociadas y la variabilidad en las condiciones en las que se encuentra cada ladera hacen que las condiciones de estabilidad varíen para cada caso de estudio.

Existen pocos estudios que apunten a la descripción del mecanismo exacto en el cual los árboles con diferentes tipos de sistemas de raíces fallan durante un movimiento en masa. Se deberían realizar estudios de campo después de la ocurrencia de estos eventos e involucrar la cuantificación de la presencia vegetal en la evaluación del tipo de falla. Así mismo, se considera importante incluir en futuras investigaciones comparaciones directas entre predicciones de los modelos que cuantifican el aporte de los árboles a la estabilidad (tales como modelos del refuerzo aportado por las raíces de los árboles, modelos de evapotranspiración, entre otros) y datos obtenidos mediante estudios de campo eficientes [85]. En este sentido, se debe avanzar en el estudio de la morfología de las plantas y sus sistemas de raíces para la selección de la vegetación apropiada para estabilización de diversos terrenos, la forma en que la diversidad de la vegetación influencia la estabilidad, métodos para incrementar el refuerzo del suelo a partir de combinaciones de especies de plantas, considerar las edades de la vegetación en estos estudios y desarrollar diferentes estrategias en el establecimiento de especies en áreas donde ocurre erosión del suelo [86] [87].

4. AGRADECIMIENTOS

Para el ingeniero civil Juan David Castro y el grupo de investigación GeoResearch International – GeoR, de la Universidad de Antioquia.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Chirico, G. B., Borga, M., Tarolli, P., Rigon, R. y Preti, F. Role of vegetation on slope stability under transient unsaturated conditions. *Procedia Environ. Sci.*, 19, 932–941, 2013.

- [2] Stokes, A., Norris, J. E., van Beek, L. P. H., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, S. B., ... Fourcaud, T. How Vegetation Reinforces Soil on Slopes. En: *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions SE – 4*, (Eds. J. Norris, A. Stokes, S. Mickovski, E. Cammeraat, R. van Beek, B. Nicoll, y A. Achim), Springer Netherlands, 65–118, 2008.
- [3] Brunsden, D. Mudslides. *Slope Instab*, 363–418, 1984.
- [4] van Beek, R., Cammeraat, E., Andreu, V., Mickovski, S. B. y Dorren, L. Hillslope processes: Mass wasting, slope stability and erosion. En: *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions SE – 4*, (Eds. J. Norris, A. Stokes, S. Mickovski, E. Cammeraat, R. van Beek, B. Nicoll, y A. Achim), Springer Netherlands, 65–118, 17–64, 2008.
- [5] Kim, D., Im, S., Lee, C. y Woo, C. Modeling the contribution of trees to shallow landslide development in a steep, forested watershed. *Ecol. Eng.* 61, 658–668, 2013.
- [6] Sidle, R. C. y Ochiai, H., *Landslides: Processes, Prediction, and Land Use*. Wiley, University of Michigan, 2006.
- [7] Hammond, C., Hall, D., Miller, S. y Swetic, P. Level I Stability Analysis (LISA) documentation for version 2.0, Level I Stability Analysis (LISA) documentation for version 2.0. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, 1992.
- [8] Greenway, D. R. Vegetation and slope stability. *Slope Stab. Geotech. Eng. Geomorphol.*, 187–230, 1987.
- [9] Falge, E., Reth, S., Brüggemann, N., Butterbach-Bahl, K., Goldberg, V., Oltchev, A., ... Bernhofer, C. Comparison of surface energy exchange models with eddy flux data in forest and grassland ecosystems of Germany. *Ecol. Modell.*, 188, 174–216, 2005.
- [10] Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J. L., Sauer, T. J., & Ben-Gal, A. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 56–70, 2014.
- [11] Scanlon, T. M. y Kustas, W. P. Partitioning evapotranspiration using an eddy covariance-based technique: Improved assessment of soil moisture and land–atmosphere exchange dynamics. *Vadose Zone Journal*, 11, 2012.
- [12] Zhu, X.-J., Yu, G.-R., Hu, Z.-M., Wang, Q.-F., He, H.-L., Yan, J.-H., Zhang, J.-H. Spatiotemporal variations of T/ET (the ratio of transpiration to evapotranspiration) in three forests of Eastern China. *Ecological Indicators*, 52, 411–421, 2015.
- [13] Suárez, J., *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, Ingeniería de Suelos Ltda, 1998.
- [14] Calder, I. R., Wright, I. R. y Murdiyarso, D. A study of evaporation from tropical rain forest — West Java. *J. Hydrol.*, 89, 13–31, 1986.
- [15] Jones, J. A., *Global hydrology: Processes, resources and environmental management*, Longman, 2014.
- [16] Scott, R. The understory and overstory partitioning of energy and water fluxes in an open canopy, semiarid woodland. *Agric. For. Meteorol.*, 114, 127–139, 2003.
- [17] Doorenbos, J. y Pruitt, W. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrig. Drain. Pap.*, 24, 144, 1977.
- [18] Brutsaert, W., *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications*, Springer Netherlands, 2013.
- [19] Harr, R. D. Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope. *J. Hydrol.*, 33, 37–58, 1977.
- [20] Sidle, R. C., Pearce, A. J. y O'Loughlin, C. L., *Hillslope Stability and Land Use*, Wiley, Washington, 1985.
- [21] Hetherington, E. D. The importance of forests in the hydrological regime. M.C. Heal. R.R. Wallace, 215, 179–211, 1987.
- [22] Megahan, W. F. Hydrologic effects of clearcutting and wildfire on steep granitic slopes in Idaho. *Water Resour. Res.*, 19, 811–819, 1983.
- [23] Sidle, R. C. et al. Erosion processes in steep terrain—truths, myths, and uncertainties related to

forest management in Southeast Asia. *For. Ecol. Manage.*, 224, 199–225, 2006.

[24] Campbell, G. S., *Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil-Plant Systems*, Elsevier Science, 1985.

[25] Dingman, S. L., *Physical Hydrology: Third Edition*, Waveland press, 2015.

[26] Savenije, H. H. G. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *Hydrol. Process.*, 18, 1507–1511, 2004.

[27] Crockford, R. H. y Richardson, D. P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrol. Process.*, 14, 2903–2920, 2000.

[28] Brauman, K. A., Freyberg, D. L. y Daily, G. C. Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawai'i. *Agric. For. Meteorol.*, 150, 265–275, 2010.

[29] Fan, J., Oestergaard, K. T., Guyot, A. y Lockington, D. Measuring and modeling rainfall interception losses by a native *Banksia* woodland and an exotic pine plantation in subtropical coastal Australia. *J. Hydrol.*, 515, 156–165, 2014.

[30] Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J. J., Domingo, F., & Gash, J. H. C. A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*, 370, 191–206, 2009.

[31] Campos, D. F., *Procesos del ciclo hidrológico*, Universitaria Potosina, 1984.

[32] Reifsnyder, W. E. y Lull, H. W., *Radiant Energy in Relation to Forests*, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1965.

[33] Monteith, J. L., *Vegetation and the Atmosphere: Principles*. Academic Press, 1975.

[34] Whitehead, D. y Jarvis, P. G. *Coniferous forests and plantations. Water deficits plant growth*, Ed. by Kozłowski, TT, Acad. Press. New York, NY, VI, 49–152, 1981.

[35] McNaughton, K. G. y Jarvis, P. G. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and

evaporation. *Water deficits and plant growth*, 7, 1–47, 1983.

[36] Yalcin, A. A geotechnical study on the landslides in the Trabzon Province, NE, Turkey. *Appl. Clay Sci.*, 52, 11–19, 2011.

[37] Alimohammadlou, Y., Najafi, A. y Gokceoglu, C. Estimation of rainfall-induced landslides using ANN and fuzzy clustering methods: A case study in Saen Slope, Azerbaijan province, Iran. *CATENA*, 120, 149–162, 2014.

[38] Carenas, B., Giner, J. L., González, J. y Pozo, M., *Geología*, Paraninfo, 2014.

[39] Cammeraat, L. H. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. *Earth Surf. Process. Landforms*, 27, 1201–1222, 2002.

[40] Stokes, A. Biomechanics of tree root anchorage, *Plant roots: The hidden half*, 175–186, 2002.

[41] Abdi, E., Majnounian, B., Genet, M. y Rahimi, H. Quantifying the effects of root reinforcement of Persian Ironwood (*Parrotia persica*) on slope stability; a case study: Hillslope of Hyrcanian forests, northern Iran. *Ecol. Eng.*, 36, 1409–1416, 2010.

[42] Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G. y Muys, B. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees*, 21, 385–402, 2007.

[43] Peters, P. A. y C. J. Biller. Preliminary evaluation of the effect of vertical angle of pull on stump uprooting failure. *Proc. Improv. Product. through For. Eng.*, 90–93, 1986.

[44] Pyles, M. R. y Stoupa, J. Load-carrying capacity of second-growth Douglas-fir stump anchors. *West. J. Appl. For.*, 2, 77–80, 1987.

[45] Somerville, A. Root anchorage and root morphology of *pinus radiata* on a range of ripping treatments. *New Zeal. J. For. Sci.*, 9, 294–315, 1979.

[46] Cannell, M. y Courts, M. *Growing in the wind*. *New Sci.*, 777, 42–43, 1988.

- [47] Watson, A. Wind-induced forces in the near-surface lateral roots of radiata pine. *For. Ecol. Manage.*, 135, 133–142, 2000.
- [48] Wu, T. H., McKinnell III, W. P. y Swanston, D. N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Can. Geotech. J.*, 16, 19–33, 1979.
- [49] O'Loughlin, C. y Ziemer, R. R. The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steepland forests. *Carbon Uptake Alloc. Subalp. Ecosyst. as a Key to Manag.*, 70–78, 1982.
- [50] Riestenberg, M. M. y Sovonick-Dunford, S. The role of woody vegetation in stabilizing slopes in the Cincinnati area, Ohio. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94, 506–518, 1983.
- [51] Stokes, A., Fitter, A. H. y Courts, M. P. Responses of young trees to wind and shading: effects on root architecture. *J. Exp. Bot.*, 46, 1139–1146, 1995.
- [52] Stokes, A., Nicoll, B. C., Coutts, M. P. y Fitter, A. H. Responses of young Sitka spruce clones to mechanical perturbation and nutrition: effects on biomass allocation, root development, and resistance to bending. *Can. J. For. Res.*, 27, 1049–1057, 1997.
- [53] Waldron, L. J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 843–849, 1977.
- [54] Cazzuffi, D., Cardile, G. y Giofrè, D. Geosynthetic engineering and vegetation growth in soil reinforcement applications. *Transp. Infrastruct. Geotechnol.*, 1, 262–300, 2014.
- [55] Zhou, Y. et al. The traction effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on soil reinforcement: a direct in situ test. *Plant Soil*, 190, 77–86, 1997.
- [56] Schmidt, K. M. et al. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Can. Geotech. J.*, 38, 995–1024, 2001.
- [57] Swanson, F. J. y Swanston, D. N. Complex mass-movement terrains in the western Cascade Range, Oregon. *Rev. Eng. Geol.*, 3, 113–124, 1977.
- [58] Ziemer, R. R. y Swanston, D. N., Root strength changes after logging in southeast Alaska. 306, Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, 1977.
- [59] Abe, K. y Iwamoto, M. Simulation model for the distribution of tree roots-application to a slope stability model. *J. Japanese For. Soc.*, 72, 375–387, 1990.
- [60] Tsukamoto, Y. y Minematsu, H. Evaluation of the effect of lateral roots on slope stability. *Proc. 18th IUFRO World Congr.*, 1986.
- [61] Tsukamoto, Y. Evaluation of the effect of tree roots on slope stability. *Bull. Exp. For.*, 23, 65–124, 1987.
- [62] Swanston, D. N. y Swanson, F. J. Timber harvesting, mass erosion, and steepland forest geomorphology in the Pacific Northwest. *Geomorphol. Eng.*, 199–221, 1976.
- [63] Schroeder, W. L. The engineering approach to landslide risk analysis. *Gen. Tech. Rep. PNW-180*, 43–50, 1985.
- [64] Gray, D. H. y Megahan, W. F., Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho batholith. 271, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1981.
- [65] Phillips, C. J. y Watson, A. J. *Structural Tree Root Research in New Zealand: A Review*. Manaaki Whenua Press, 1994.
- [66] O'Loughlin, C. L., Rowe, L. K. y Pearce, A. J. Exceptional Storm Influences on Slope Erosion and Sediment Yield in Small Forest Catchments, North Westland, New Zealand. *First Natl. Symp. For. Hydrol.*, 84–91, 1982.
- [67] Gray, D. H. y Ohashi, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. *J. Geotech. Eng.*, 109, 335–353, 1983.
- [68] John, J. R., *Protección y estabilización de taludes para evitar deslizamientos*, Universidad Austral de Chile, 2011.
- [69] Tsukamoto, Y. y Kusakabe, O. Vegetative influences on debris slide occurrences on steep

slopes in Japan. Proc. symp. Eff. For. L. use Eros. slope stability, Honolulu, Hawaii, 63–72, 1984.

[70] Morgan, R. P. C. y Rickson, R. J., Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach: A Bioengineering Approach, Taylor y Francis, 2003.

[71] Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J. y Hervás, J. Mass-Movement Causes: Overloading. Treatise Geomorphol., 7, 2013.

[72] Kawaguchi, T., A Study of Landslides on Mt. Akagi, Bull. of the Government For. Exp. Sta., Rept, 1951.

[73] Gray, D. H. Effects of forest clear-cutting on the stability of natural slopes: results of field studies: interim report, 1973

[74] Swanston, D. N., Mechanics of debris avalanching in shallow till soils of southeast Alaska, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Institute of Northern Forestry, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture, 1970.

[75] O'Loughlin, C. L. The effect of timber removal on the stability of forest soils. J. Hydrol., 13, 121–134, 1974.

[76] Ziemer, R. R. The role of vegetation in the stability of forested slopes. Memorias, Proc. First Union of For. Res. Org., Div. I, XVII World Congress, Kyoto, Japan 297–308, 1981.

[77] Sidle, R. C. Relative importance of factors influencing landsliding in coastal Alaska. Memorias, 21st Annual engineering geology and soils engineering symposium. University of Idaho, Moscow, 311–325, 1984.

[78] Wiel, M. J. y Darby, S. E. A new model to analyse the impact of woody riparian vegetation on the geotechnical stability of riverbanks. Earth Surf. Process. Landforms, 32, 2185–2198, 2007.

[79] Swanston, D. N. Mass wasting in coastal Alaska. U.S.D.A. For. Serv. Res. Pap. PNW-83, 15, 1969.

[80] Wilford, D. J. y Schwab, J. W. Soil mass movements in the Rennell Sound area, Queen Charlotte Islands, British Columbia. Memorias, Proceedings of the Canadian Hydrology

Symposium-Associate Committee on Hydrology, 1982.

[81] Stokes, A. y Mattheck, C. Variation of wood strength in tree roots. J. Exp. Bot., 47, 693–699, 1996.

[82] Coutts, M. P. Root architecture and tree stability. Plant Soil, 71, 171–188, 1983.

[83] Coutts, M. P. Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil. Forestry, 59, 173–197, 1986.

[84] Norris, J. E., Greenwood, J. R., Achim, A., Gardiner, B. A., Nicoll, B. C., Cammeraat, E. y Mickovski, S. B. Hazard assessment of vegetated slopes. En: Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions SE – 4, (Eds. J. Norris, A. Stokes, S. Mickovski, E. Cammeraat, R. van Beek, B. Nicoll, y A. Achim), Springer Netherlands, 119–166, 2008.

[85] Schwarz, M., Preti, F., Giadrossich, F., Lehmann, P. y Or, D. Quantifying the role of vegetation in slope stability: a case study in Tuscany (Italy). Ecological Engineering, 36, 285–291, 2010.

[86] Genet, M., Stokes, A., Fourcaud, T. y Norris, J. E. The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest. Ecological engineering, 36, 265–275, 2010.

[87] Norris, J. E., Di Iorio, A., Stokes, A., Nicoll, B. C. y Achim, A. Species selection for soil reinforcement and protection. En: Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions SE – 4, (Eds. J. Norris, A. Stokes, S. Mickovski, E. Cammeraat, R. van Beek, B. Nicoll, y A. Achim), Springer Netherlands, 167–210, 2008.