

2016-10

Evaluation of Slope Stability Quantifying the Effect of Vegetation

Roberto José Marín

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/engschcivcon>



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

Recommended Citation

Roberto, J.M., Osorio, J.P. (2016). Evaluation of slope stability quantifying the effect of vegetation. *XV Congreso Colombiano de Geotecnia, held on Octubre 2016 by the Sociedad Colombiana de Geotecnia*

This Conference Paper 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 Conference papers by an authorized administrator of ARROW@TU Dublin. For more information, please contact yvonne.desmond@tudublin.ie, arrow.admin@tudublin.ie, brian.widdis@tudublin.ie.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike 3.0 License](#)

Evaluación de la estabilidad de taludes cuantificando el efecto de la vegetación

Evaluation of slope stability quantifying the effect of vegetation

Roberto J. Marín¹; Juan P. Osorio¹

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

rjose.marin@udea.edu.co

Resumen

En este estudio se realizan múltiples simulaciones de la susceptibilidad a deslizamientos superficiales detonados por lluvia integrando un modelo de infiltración de lluvia transitoria y un modelo de estabilidad de talud infinito, desarrollados para condiciones no saturadas del suelo, a escala de cuenca hidrográfica. Se emplea el modelo de infiltración de TRIGRS para el cálculo de presión de poros. El modelo geotécnico incluye la evaluación de dos variables asociadas a la presencia vegetal en el terreno: el refuerzo de las raíces y la sobrecarga debida al peso de la vegetación. Las simulaciones se realizan usando múltiples valores de estas variables, de tal modo que se analiza el comportamiento de las mismas para las condiciones topográficas de la subcuenca del Valle de Aburrá estudiada. Los resultados indican que el refuerzo de las raíces influencia positivamente la estabilidad, mientras que el peso de la vegetación representa un efecto adverso, para las condiciones de suelo y topografía simuladas.

Abstract

The present study evaluates the shallow landslides susceptibility triggered by rainfall by means of multiple numerical simulations. The simulations integrate a transient rainfall infiltration model with an infinite slope stability model, both of them developed for unsaturated soils in a basin scale. TRIGRS' infiltration model is used to calculate pore water pressure. The geotechnical model includes the evaluation of two parameters related to vegetation: root reinforcement and tree surcharge due to the weight of the vegetation. These simulations were carried out using multiple values of these parameters so that their behavior is analyzed for the topographic conditions of the watershed located in Valle de Aburrá. The results indicate that root reinforcement benefits slope stability, while tree surcharge represents an adverse effect for the simulated soil and topographic conditions.

1 INTRODUCCIÓN

Es común emplear la vegetación, como una solución eco-ingenieril a largo plazo, para mitigar la ocurrencia de deslizamientos superficiales (Bourrier et al., 2013). La mayoría de la literatura científica coincide en que el refuerzo aportado por las raíces es el efecto de las plantas de mayor importancia en la estabilidad de taludes (Chiaradia et al., 2016). Las raíces de la vegetación interactúan con el suelo para producir un material compuesto en el cual actúan como fibras de relativamente alta resistencia a la tensión y

adhesión incrustada en una matriz de baja resistencia a la tensión. Por lo tanto, la resistencia cortante del suelo es mejorada por la matriz de raíces (Morgan y Rickson, 2003). Igualmente, se desarrollan otros efectos mecánicos asociados a la presencia vegetal, como la sobrecarga debida al peso de la vegetación, y diferentes procesos hidrológicos, como la interceptación y la evapotranspiración, los cuales tienen incidencia en la estabilidad de taludes.

Los mecanismos del refuerzo de las raíces han sido cuantificados tanto para una raíz individual (Burroughs y Thomas, 1977; Ziemer, 1978; O'Loughlin y Watson, 1979; Abe y Ziemer,

1991a) como para múltiples raíces (Abe e Iwamoto, 1986; Waldron y Dakessian, 1981; Terwilliger y Waldron, 1990) pasando sobre planos potenciales de falla. Así mismo, dichos mecanismos han sido descritos satisfactoriamente mediante modelos (Abe y Ziemer, 1991b; Wu, 1995) que han sido corroborados por mediciones de campo y de laboratorio. Sin embargo, se han realizado pocas aproximaciones para emplear estos modelos a una escala que se pueda relacionar con la ocurrencia de deslizamientos superficiales, como la de cuenca hidrográfica. Esto se puede deber al reducido tamaño en el cual se pueden realizar ensayos de refuerzo de las raíces y a las propiedades del suelo y la vegetación que se requieren conocer para modelaciones a esta escala (van Beek et al., 2005).

La utilización de modelos distribuidos espacialmente, basados en los procesos físicos, para determinar las áreas más propensas a la ocurrencia de deslizamientos superficiales inducidos por lluvia, pueden ser utilizados para realización de pruebas y/o selección de estrategias para reforestación de zonas específicas señaladas como críticas para la ocurrencia de este fenómeno. Por esto, la cuantificación de diferentes tipos de cobertura vegetal, así como la inclusión de las variables de la vegetación en estos modelos, pueden aportar de manera directa para avanzar en la formulación de soluciones asociadas al control y prevención de movimientos en masa (Bathurst et al. 2010).

Los beneficios de protección o estabilización aportados por las plantas dependen del tipo de vegetación y del proceso de degradación del talud. La correcta selección de las plantas a emplear es crítico. Por ejemplo, para protección superficial contra erosión causada por lluvia y viento, la mejor elección sería una densa cobertura de césped o vegetación herbácea; en cambio, para prevenir deslizamientos superficiales es más efectiva la vegetación maderera arraigada profundamente (Gray y Sotir, 1996).

El presente artículo emplea un modelo de estabilidad de talud infinito que considera los efectos geo-mecánicos de la vegetación, bajo condiciones no saturadas, en la ocurrencia de deslizamientos superficiales detonados por lluvia, a una escala de cuenca hidrográfica.

2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Se evalúa la estabilidad de una cuenca asociada a la ocurrencia de deslizamientos en masa

desencadenados por lluvia, con base en las herramientas de un sistema de información geográfica que divide y estudia el terreno en pequeñas áreas cuadrículas. Se emplea el software TRIGRS (Baum et al., 2008) para determinar la variación de la presión de poros, en una superficie de falla asimilada, en respuesta a un evento de lluvia simulado. Asimismo, se evalúa la estabilidad en esta profundidad mediante un modelo de estabilidad de talud infinito para condiciones no saturadas (Chirico et al., 2013), en el cual se consideran los términos de refuerzo aportado por las raíces de los árboles y el peso adicional (por unidad de superficie) debido a la vegetación.

2.1 Modelo hidrológico

TRIGRS combina modelos para infiltración y flujo subterráneo de agua de lluvia, enrutamiento de la escorrentía y estabilidad de taludes para calcular los efectos de tormentas sobre la estabilidad, en grandes áreas de terreno (Baum et al., 2008). Es aplicable a un amplio rango de condiciones iniciales, entre las cuales se encuentran frontera basal a profundidad finita e infinita, así como condiciones saturadas y no saturadas del suelo. El presente estudio emplea la solución analítica para flujo no saturado y un suelo de profundidad finita, suponiendo un cambio significativo de las propiedades hidráulicas en esta frontera (disminución de la conductividad hidráulica, como en el caso de depósitos aluviales o coluviales que limitan con la roca madre), para determinar la presión de poros y su variación espacial y temporal durante el evento de lluvia simulado. La modelación en TRIGRS permite obtener un mapa de presión de poros, en la profundidad del suelo en la que se supone la ocurrencia de deslizamientos superficiales (la frontera entre los depósitos superficiales y el lecho rocoso), en cualquier momento de la tormenta.

2.2 Modelo geotécnico

El análisis de estabilidad de taludes se lleva a cabo mediante un método de equilibrio límite, el cual expresa la estabilidad con un indicador denominado factor de seguridad (*FS*), definido por la relación entre una resistencia cortante disponible con los esfuerzos cortantes desarrollados a lo largo de la superficie de falla. Mediante un modelo de estabilidad de talud infinito generalizado para condiciones de suelo no saturado, presentado por Chirico et al. (2013), el factor de seguridad de un talud con presencia vegetal, a una profundidad *z* medida hacia la

dirección vertical (con $z = 0$ en la superficie y valores positivos hacia abajo), se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$FS = \frac{c' + c_r + (\gamma z \cos^2 \beta + \gamma_w h S_e) \tan \varphi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta}, \quad (1)$$

donde c' es la cohesión efectiva del suelo, c_r la cohesión aparente debido al refuerzo provisto por raíces de plantas, γ el peso unitario promediado de la columna de suelo en la profundidad z , β el ángulo del talud, γ_w el peso unitario del agua, h la altura de succión, S_e la saturación efectiva y φ' el ángulo de fricción efectivo del suelo.

S_e puede ser estimado como función de la succión (h), como se muestra a continuación:

$$S_e(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad (2)$$

donde $\theta(h)$ es el contenido de agua del suelo en la succión h , θ_r el contenido de agua residual del suelo y θ_s el contenido de agua del suelo en saturación.

$\theta(h)$ se puede obtener de acuerdo a la relación analítica de van-Genuchten/Mualem:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_0 - \theta_r) [1 + (\alpha_{VG} h)^{n_{VG}}]^{-m_{VG}} \quad (3)$$

donde θ_0 es el valor del contenido de agua del suelo para $h = 0$; α_{VG} , n_{VG} y m_{VG} son parámetros empíricos de escala y forma.

Finalmente, γ se estima de esta manera:

$$\gamma = \gamma_d + \frac{1}{z} [W_v + \gamma_w \int_0^z \theta ds], \quad (4)$$

donde γ_d es el peso unitario del suelo seco y W_v es el peso por unidad de superficie debido a la vegetación sobre el suelo. Por simplicidad, la presente investigación desprecia el último término dentro de los corchetes de la Ec. (4) y considera este contenido de agua reemplazando el término de γ_d por el peso unitario natural del suelo γ_s .

3 CASO DE ESTUDIO

3.1 Sitio de estudio

El sitio de estudio corresponde a una subcuenca del Valle de Aburrá (Colombia), que hace parte de la quebrada La Miel, la cual es también afluente de la quebrada La Ayurá. Está ubicada en el municipio de Envigado, en el departamento de Antioquia, y cuenta con un área aproximada de 6,9 km². El área de estudio tiene un rango de elevación entre 1802 m y 2896 m, y una precipitación anual promedio de 1959 mm (Alcaldía de Envigado, 2011).

3.2 Elaboración de mapas digitales

La subcuenca se analizó en mapas digitales del terreno por medio de ArcGIS 10.2, a partir de un modelo digital de elevación obtenido de ASTER GDEM, el cual es un producto de METI y NASA. Mediante una interpolación se elaboró un mapa de elevaciones de una resolución espacial de 10 m x 10 m, en el cual se delimitó la cuenca (Fig. 1) para la posterior evaluación de la susceptibilidad a ocurrencia de deslizamientos superficiales. Asimismo, por medio de este se generaron un mapa de direcciones de flujo y de pendientes, los cuales son requeridos para la modelación de la infiltración en suelo no saturado, con TRIGRS.

3.3 Variables hidrológicas

Para calcular la variación de la presión de poros mediante TRIGRS, se estimó la conductividad hidráulica de acuerdo a rangos de valores encontrados en la literatura para el tipo de suelo que hay en la zona. Así, se determina un valor de $1,0 \times 10^{-5}$ m/s para la conductividad hidráulica saturada del suelo (K_s). Por su parte, se determinan la difusividad hidráulica del suelo (D_0)

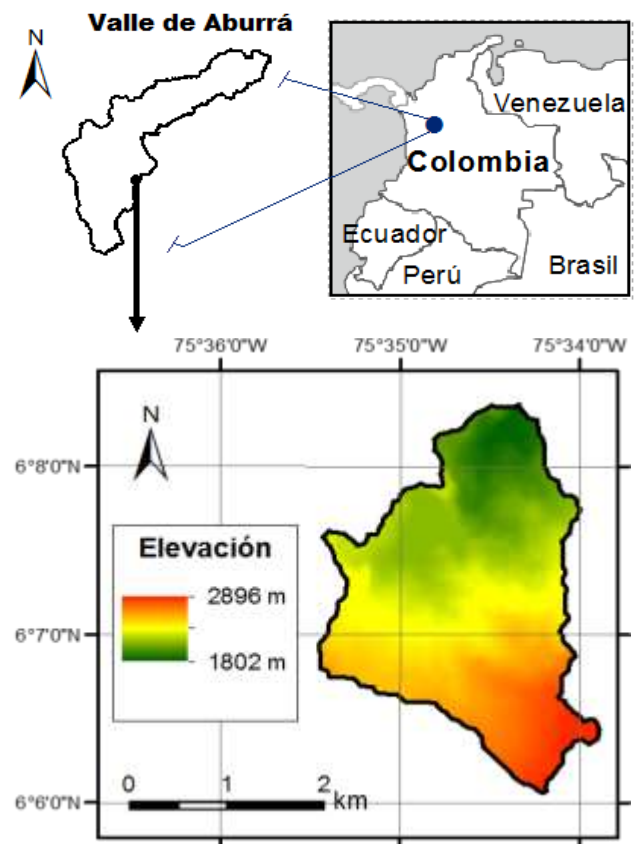


Figura 1: Modelo digital de elevación de la subcuenca del Valle de Aburrá.

y la tasa de infiltración previa a la tormenta (I_z) como múltiplos de la conductividad hidráulica, adoptando las relaciones empleadas por Park, Nikhil y Lee (2013) y Liu y Wu (2008). De esta manera, D_0 toma del valor de $2,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (200 veces el valor de K_s) e I_z toma el de $1,0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (K_s dividido en 100). Del mismo modo, se define el contenido de agua del suelo saturado (θ_s) y el contenido de agua residual (θ_r) con valores de 0,45 y 0,1, respectivamente. La inversa de la altura de la franja capilar por encima del nivel freático (parámetro α) se incluye en la modelación con un valor de 2 m^{-1} . La tormenta simulada corresponde a un evento de lluvia de intensidad constante de 90 mm/h, de 5 horas de duración.

3.4 Variables geotécnicas

Debido a las limitaciones para representar de forma precisa las condiciones reales del terreno, diferentes autores han simulado la profundidad del suelo, la cual representa la superficie deslizante, con un valor constante en toda la cuenca, así como el nivel freático inicial a esta misma profundidad (Montrasio et al., 2011; Park et al., 2013; Vieira y Fernandes, 2010). En este caso, se le asigna un valor constante de 1,5 m a la profundidad del suelo y al nivel freático previo a la tormenta.

Para definir las variables geotécnicas, se revisaron valores encontrados en la literatura para el tipo de suelo en cuestión y se realizó un análisis de sensibilidad de las variables geotécnicas efectuando diferentes modelaciones en TRIGRS 2.0, lo cual permitió ajustar estos parámetros a valores propicios para la simulación. Principalmente, se buscaron obtener valores iniciales (en $t = 0$, es decir, previo a la tormenta) de FS mayores a 1,0, de tal manera que ninguna de las celdas presenta falla antes de la ocurrencia del evento de lluvia. Así, se definieron la cohesión efectiva (c'), el ángulo de fricción efectivo (ϕ') y el

Tabla 1: Variables empleadas en las modelaciones

Variable	Valor
Prof. del suelo (m)	1,5
Prof. del nivel freático (m)	1,5
K_s (m/s)	$1,0 \times 10^{-5}$
D_0 (m^2/s)	$2,0 \times 10^{-3}$
I_z (m/s)	$1,0 \times 10^{-7}$
θ_s	0,45
θ_r	0,10
α (m^{-1})	2,0

c' (kN/m²)

8,0

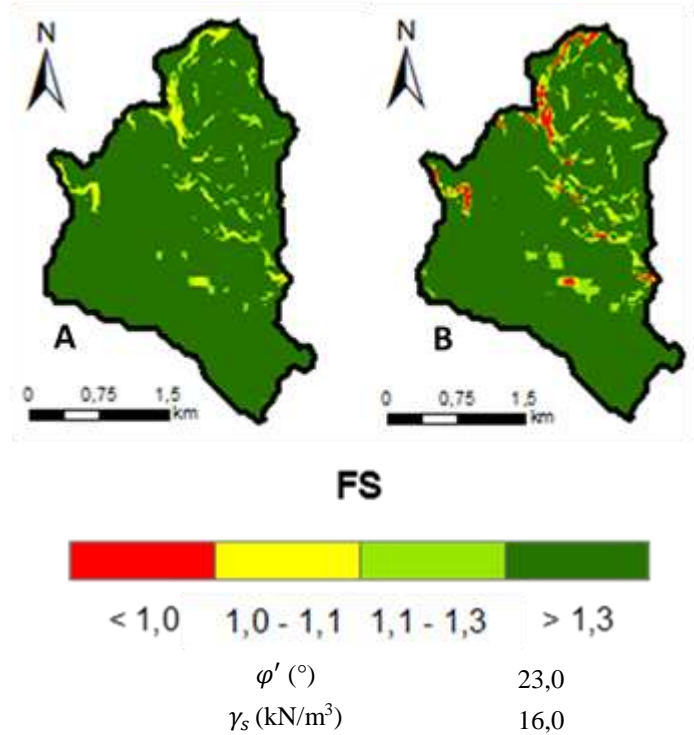


Figura 2: Factor de seguridad al inicio (A) y al término (B) de la tormenta. Simulación con TRIGRS, sin incluir los efectos de la vegetación.

c_r (kN/m²)

0 – 3,0

W_v (kN/m²)

0 – 3,0

peso unitario del suelo (γ_s), con los valores de 8 kN/m², 23° y 16 kN/m², respectivamente.

Es importante anotar que los valores de presión de poros obtenidos mediante la simulación en el modelo de infiltración en suelo no saturado con TRIGRS, representan el valor negativo de altura de succión encontrados en las Ec. (1) y (3). Dicha variable se presenta en un mapa con valores específicos para cada una de las celdas que constituyen la subcuenca y se incluye en la Ec (1) para el cálculo del factor de seguridad previo a la tormenta y al final de la misma. Si bien fueron definidos valores de contenido de agua del suelo saturado (θ_s) y contenido de agua residual (θ_r), requeridos en el modelo de infiltración de TRIGRS, y que en realidad son estimaciones que se extienden para toda la cuenca, para el modelo geotécnico, considerando que el grado de incertidumbre es muy alto y para evitar asumir apresuradamente los demás parámetros de la Ec. (3), se opta por simplificar la evaluación asignando a $\theta(h)$ el valor del contenido de agua del suelo en saturación.

3.5 Variables de la vegetación

Las Ec. (1) y (4) permiten incluir en el análisis de la estabilidad el refuerzo aportado por las raíces de las plantas (c_r), como una cohesión adicional, y el peso debido a la vegetación (W_v). Se analizó la influencia de las mismas en el cálculo del factor de seguridad mediante múltiples modelaciones en donde se variaron sistemáticamente ambas variables, completando 169 modelaciones con valores diferentes de c_r y W_v , calculando FS tanto al inicio como al final de la tormenta para cada una de ellas. Inicialmente, fue simulada la variación de c_r , con $W_v = 0$, desde 0 hasta 3,0 kN/m², mediante incrementos de 0,1 kN/m². Asimismo, se estudió la variación de W_v , con $c_r = 0$, desde 0 hasta 3,0 kN/m², mediante incrementos de 0,1 kN/m².

Luego, utilizando incrementos de 0,25 kN/m², se estudió la variación de c_r para los valores constantes de W_v , de 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 y 3,0 kN/m². Finalmente, se hizo lo mismo para W_v ,

para estos mismos valores constantes de c_r . La Tabla 1 muestra los valores de todas las variables empleadas en las modelaciones realizadas.

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis de sensibilidad realizado inicialmente, para determinar algunos parámetros geotécnicos, realizado por medio de TRIGRS 2.0, utiliza un modelo de estabilidad de talud infinito similar al empleado en la presente investigación, pero no incluye ninguna variable asociada al efecto de la vegetación en la estabilidad. Como se mencionó anteriormente, los valores de c' , ϕ' y γ_s adoptados, junto con los demás parámetros implicados, producen valores de FS mayores a 1,0 antes de iniciar la tormenta (Fig. 2a). Con los valores de estos parámetros definidos, se observa que al finalizar la tormenta se predice falla ($FS < 1,0$) en el 2,2% del área total de la subcuenca (Fig. 2b).

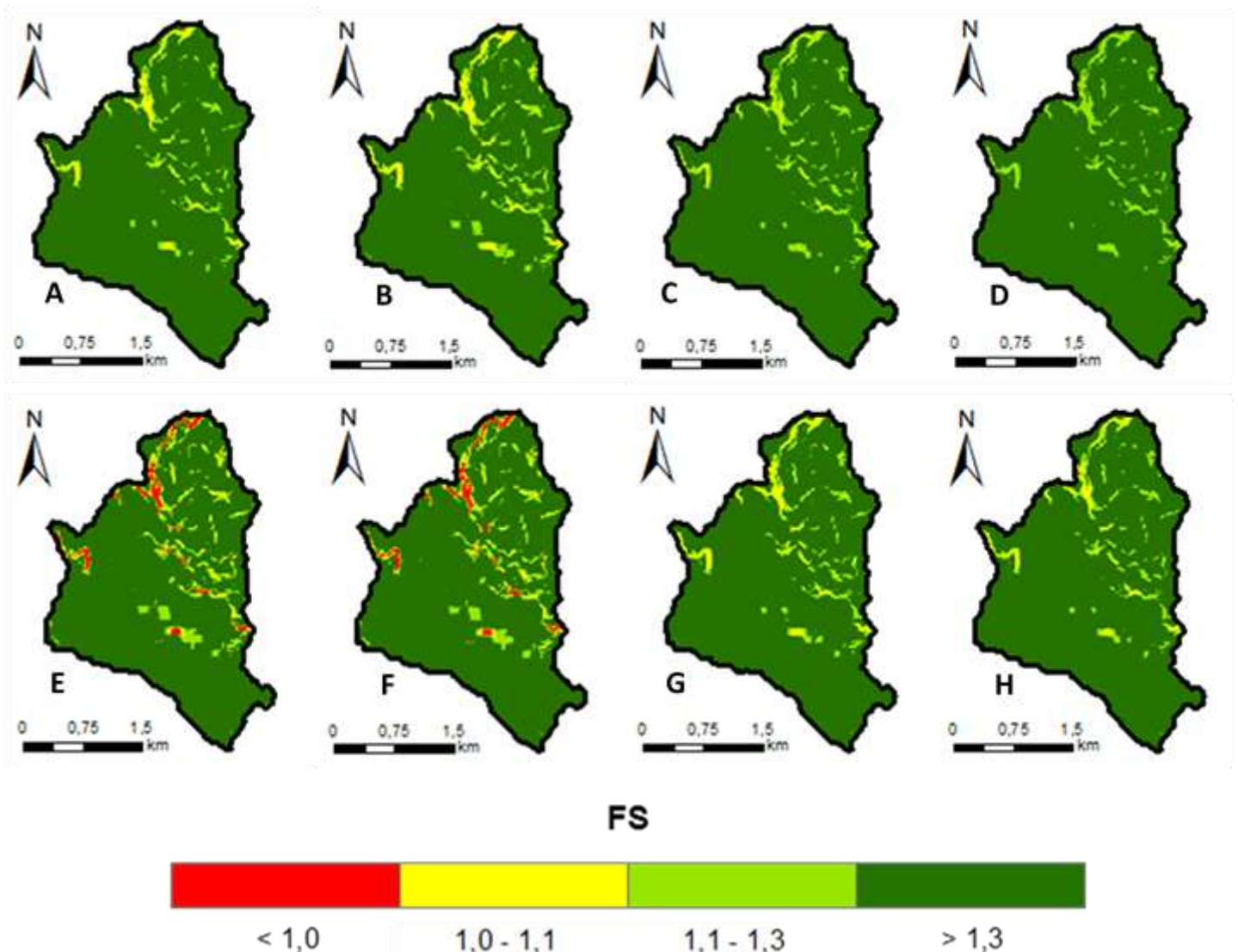


Figura 3: Factor de seguridad al inicio (A, B, C, D) y al término (E, F, G, H) de la tormenta. (A, E) $c_r = 0$ y $W_v = 0$; (B, F) $c_r = 0,5$ kN/m² y $W_v = 1,5$ kN/m²; (C, G) $c_r = 1,5$ kN/m² y $W_v = 1,5$ kN/m²; (D, H) $c_r = 1,5$ kN/m² y $W_v = 0,5$ kN/m².

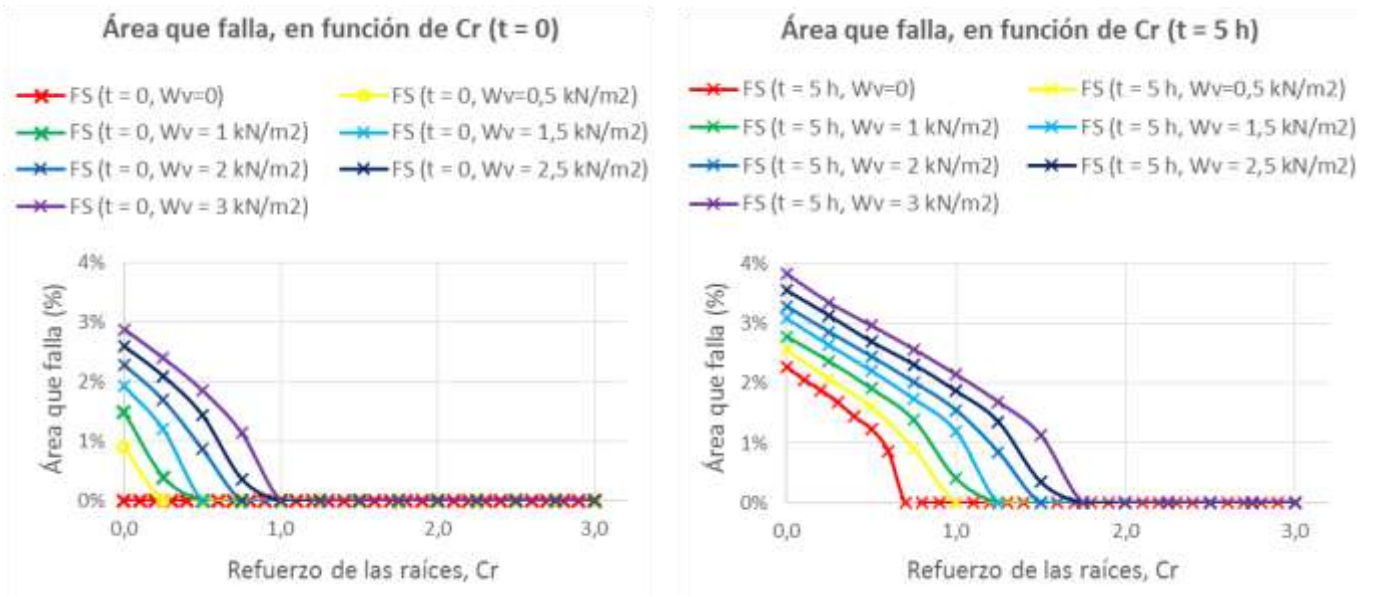


Figura 4: Área inestable de la subcuenca (%) en función del refuerzo aportado por las raíces de la vegetación (kN/m^2). Izquierda: variación de C_r para valores específicos de W_v , al inicio de la tormenta. Derecha: variación de C_r para valores específicos de W_v , al finalizar la tormenta.

La Figura 3 muestra FS antes ($t = 0$) y después de la tormenta ($t = 5 h$), para $c_r = 0$ y $W_v = 0$ (Fig. 3a, e), donde al finalizar la lluvia falla el 2,3% del área de la subcuenca; para $c_r = 0,5 kN/m^2$ y $W_v = 1,5 kN/m^2$ (Fig. 3b, f), presentándose inestabilidad en el 2,2% del terreno evaluado; para $c_r = 1,5 kN/m^2$ y $W_v = 1,5 kN/m^2$ (Fig. 3c, g); y para $c_r = 1,5 kN/m^2$ y $W_v = 0,5 kN/m^2$ (Fig. 3d, h). En estos últimos no ocurre falla en ninguna celda al término del evento de lluvia simulado. Se puede observar que a

medida que aumenta el valor de c_r aumentan los valores de FS tanto al inicio como al final de la tormenta; por el contrario, el incremento de W_v tiende a disminuir FS .

Esta tendencia se visualiza con mayor claridad en las gráficas de las Figuras 4 y 5, en donde se muestra el área de la cuenca que presenta inestabilidad de acuerdo a la variación de los valores de c_r y W_v . La Figura 4 muestra que entre más alto sea el valor de refuerzo aportado por las raíces de la vegetación, es menor el área que falla

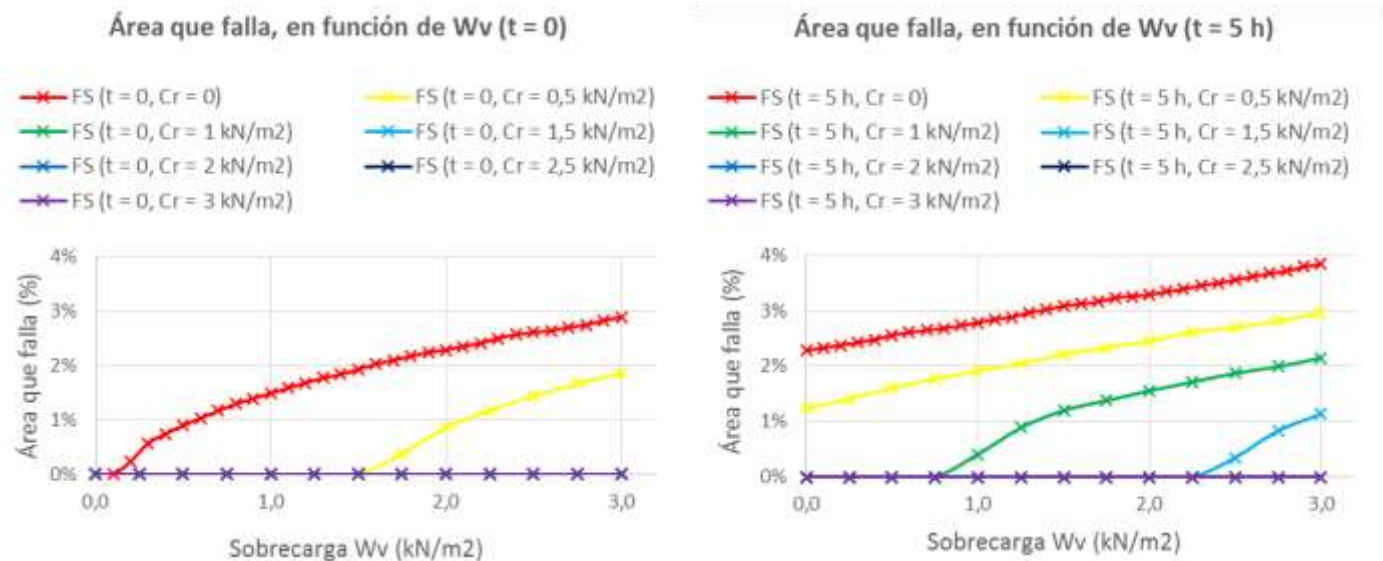


Figura 5: Área inestable de la subcuenca (%) en función de la sobrecarga debida al peso de la vegetación (kN/m^2). Izquierda: variación de W_v para valores específicos de C_r , al inicio de la tormenta. Derecha: variación de W_v para valores específicos de C_r , al finalizar la tormenta.

en la subcuenca. Para valores de c_r inferiores a 1,0 kN/m², incluso antes de la tormenta se presentan celdas inestables, siendo mayores entre más alto sea el valor de sobrecarga debida al peso de la vegetación. De esta manera, el mayor número de celdas inestables se presenta en el caso de $c_r = 0$ y $W_v = 3,0$ kN/m², para el cual antes de iniciar la tormenta se predice un 2,9% de área inestable y un 3,8% al término del evento de lluvia. Por el contrario, valores de c_r superiores a 1,75 kN/m² garantizan estabilidad en todo el terreno, al término de la tormenta, para cualquier valor de W_v del rango evaluado (0 – 3 kN/m²).

La Figura 5 ilustra el incremento del área que falla a medida que aumentan los valores de W_v , al inicio y al final de la tormenta. A pesar de esto, los valores más altos de W_v no generan una mayor disminución en los valores de FS con respecto al inicio y al final de la tormenta en una simulación en particular, sino que, por el contrario, valores bajos de W_v causan ligeramente una mayor disminución de los valores de FS . Por ejemplo, transcurridas las 5 horas del evento de lluvia, el factor de seguridad promedio (de todas las celdas de la cuenca) se disminuye 0,17 para $W_v = 0$, mientras que para $W_v = 3,0$ kN/m² se disminuye 0,15, independientemente del valor de c_r empleado.

El modelo de estabilidad de talud infinito empleado (Chirico et al., 2013) es sensible a las variables relacionadas con la presencia de la vegetación en el terreno, en mayor medida al refuerzo aportado por las raíces de la vegetación, el cual se incluye en el modelo como una cohesión adicional que incrementa las fuerzas de fricción que favorecen la estabilidad. Si bien no son los parámetros de mayor importancia, su inclusión puede conllevar a análisis más precisos en la evaluación de la susceptibilidad a ocurrencia de deslizamientos superficiales.

5 CONCLUSIONES

Las modelaciones realizadas en la subcuenca del Valle de Aburrá integran un modelo de infiltración transitoria y un modelo de estabilidad de talud infinito, que incluye en el análisis el refuerzo mecánico del suelo provisto por los sistemas de raíces y la sobrecarga debida al peso de la vegetación, para identificar las áreas de una cuenca que presentan mayor susceptibilidad a ocurrencia de deslizamientos superficiales inducidos por lluvia. Se llevaron a cabo múltiples simulaciones variando los parámetros asociados a

la presencia de vegetación en la cuenca, en donde se evidenció que, en el modelo de estabilidad de talud infinito empleado, el refuerzo aportado por las raíces de las plantas, el cual constituyó un efecto favorable a la estabilidad, tiene una mayor influencia en el cálculo del factor de seguridad que el peso adicional debido a la cobertura vegetal. En el sitio estudiado, la sobrecarga representó un factor adverso a la estabilidad.

El modelo empleado, así como otros modelos basados en la física que intentan representar los procesos físicos observados en el mundo real, tienen la ventaja de que sus parámetros se pueden evaluar usando datos de la literatura, información regional y criterio profesional, en caso de insuficiencia de datos medidos en el terreno. Sin embargo, entre menor sea la disponibilidad de información de los parámetros del modelo, será mayor la incertidumbre en los resultados obtenidos (Bathurst et al., 2010).

La principal aplicación de la evaluación de susceptibilidad a ocurrencia de deslizamientos superficiales, cuantificando los efectos de la vegetación, es la creciente práctica alrededor del mundo del uso de vegetación para estabilización de taludes (Osman y Barakbah, 2006). Análisis de este tipo permitirían plantear soluciones más adecuadas para prevenir la ocurrencia de deslizamientos superficiales mediante el empleo de vegetación, por ejemplo mediante la intervención de las áreas topográficas más críticas, identificadas metódicamente, y la reforestación de estas pequeñas áreas que podrían reducir significativamente la ocurrencia de movimientos en masa (Reid y Page, 2003).

En futuros análisis del efecto de la vegetación en la ocurrencia de deslizamientos superficiales, se deberían incluir otros mecanismos asociados a la presencia de cobertura vegetal, mayor profundidad en la descripción de los mecanismos mecánicos, pero principalmente de los procesos hidrológicos, tales como la interceptación de la lluvia y la evapotranspiración. Así mismo, es importante avanzar en el estudio de los diferentes tipos de vegetación para la selección de los tipos de planta que pueden contribuir de mejor forma en la estabilización de las áreas susceptibles a ocurrencia de movimientos en masa.

6 REFERENCIAS

Abe, K. e Iwamoto, M. (1986). Preliminary experiment on shear in soil layers with a large direct-shear apparatus. *Journal of the Japanese Forestry Society*

- (Japan).
- Abe, K. y Ziemer, R. R. (1991a). Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(7), 1012–1019.
- Abe, K. y Ziemer, R. R. (1991b). Effect of Tree Roots on Shallow-Seated Landslides 1. *USDA Forest Service Gen. Tech. Rep.*, 11–20.
- Alcaldía de Envigado. (2011). *Documento técnico de formulación. Plan de ordenamiento territorial*.
- Bathurst, J. C., Bovolo, C. I. y Cisneros, F. (2010). Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale. *Ecological Engineering*, 36(3), 317–327.
- Baum, R. L., Savage, W. Z. y Godt, J. W. (2008). *TRIGRS- A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2. 0*. U.S. Geological Survey Open-File Report.
- Bourrier, F., Kneib, F., Chareyre, B. y Fourcaud, T. (2013). Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots. *Ecological Engineering*, 61, 646–657.
- Burroughs E. R. y Thomas, B. R. (1977). Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability. *USDA For Serv Res Pap INT US Intermt For Range Exp Stn*.
- Chiaradia, E. A., Vergani, C. y Bischetti, G. B. (2016). Evaluation of the effects of three European forest types on slope stability by field and probabilistic analyses and their implications for forest management. *Forest Ecology and Management*, 370, 114–129.
- Chirico, G. B., Borga, M., Tarolli, P., Rigon, R. y Preti, F. (2013). Role of vegetation on slope stability under transient unsaturated conditions. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 932–941. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.103>
- Gray, D. H. y Sotir, R. B. (1996). *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control*. (John Wiley & Sons, Ed.). Wiley.
- Liu, C.-N. y Wu, C.-C. (2008). Mapping susceptibility of rainfall-triggered shallow landslides using a probabilistic approach. *Environmental Geology*, 55(4), 907–915.
- Montrasio, L., Valentino, R. y Losi, G. L. (2011). Towards a real-time susceptibility assessment of rainfall-induced shallow landslides on a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(7), 1927–1947.
- Morgan, R. P. C. y Rickson, R. J. (2003). *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach: A Bioengineering Approach*. Taylor & Francis.
- O'Loughlin, C. y Watson, A. (1979). Root-wood strength deterioration in radiata pine after clearfelling [in New Zealand]. *New Zealand Journal of Forestry Science (New Zealand)*.
- Osman, N. y Barakbah, S. S. (2006). Parameters to predict slope stability-Soil water and root profiles. *Ecological Engineering*, 28(1), 90–95. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.04.004>
- Park, D. W., Nikhil, N. V y Lee, S. R. (2013). Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2833–2849.
- Reid, L. M. y Page, M. J. (2003). Magnitude and frequency of landsliding in a large New Zealand catchment. *Geomorphology*, 49(1), 71–88.
- Terwilliger, V. J. y Waldron, L. J. (1990). Assessing the contribution of roots to the strength of undisturbed, slip prone soils. *Catena*, 17(2), 151–162.
- van Beek, L. P. H., Wint, J., Cammeraat, L. H. y Edwards, J. P. (2005). Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes. *Plant and Soil*, 278, 55–74.
- Vieira, B. C. y Fernandes, N. F. (2010). Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, Sao Paulo, Brazil. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(9), 1829–1837.
- Waldron, L. J. y Dakessian, S. (1981). Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties. *Soil Science*, 132(6), 427–435.
- Wu, T. (1995). Slope stabilization 7. *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach*, 233, 221–264.
- Ziemer, R. R. (1978). An apparatus to measure the crosscut shearing strength of roots. *Canadian Journal of Forest Research*, 8(1), 142–144.