

Evaluación del riesgo de deslizamientos superficiales para proyectos de infraestructura: caso de análisis en vereda El Cabuyal

Roberto J. Marín¹, Juan Carlos Guzmán-Martínez², Hernán E. Martínez Carvajal³,
Edwin F. García-Aristizábal⁴, Juan Diego Cadavid-Arango⁵ y Paulina Agudelo-Vallejo⁶

Recepción: 14-12-2017 | Aceptación: 08-05-2018 | En línea: 15-06-2018

MSC: 92.40.Ha, 02.70.Uu

doi:10.17230/ingciencia.14.27.7

Resumen

Este documento presenta un análisis y evaluación cuantitativa de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo asociados a deslizamientos superficiales en una subcuenca del Valle de Aburrá (Colombia). Se integra el modelo TRIGRS mediante una simulación de Montecarlo para la estimación

¹ Universidad de Antioquia, rjose.marin@udea.edu.co,
<http://orcid.org/0000-0002-3206-0425>, Medellín, Colombia.

² Universidad de Antioquia, juanc.guzman@udea.edu.co,
<http://orcid.org/0000-0002-7066-2881>, Medellín, Colombia.

³ Universidad de Brasilia, carvajal@unb.br,
<http://orcid.org/0000-0001-7966-1466>, Brasilia DF, Brasil.

⁴ Universidad de Antioquia, edwin.garcia@udea.edu.co,
<http://orcid.org/0000-0002-4837-8518>, Medellín, Colombia.

⁵ Universidad Nacional de Colombia, judcadavidar@unal.edu.co,
<http://orcid.org/0000-0003-4278-4547>, Medellín, Colombia.

⁶ Universidad de Antioquia, paulina.agudelo@udea.edu.co,
<http://orcid.org/0000-0002-9607-9416>, Medellín, Colombia.

de la probabilidad de falla en la subcuenca empleando una altura del nivel freático como factor desencadenante, que junto con su probabilidad de ocurrencia anual permiten la evaluación de la amenaza. Se emplea un modelo que cuantifica la vulnerabilidad física de estructuras basándose en la intensidad del deslizamiento y la resistencia del elemento expuesto. El riesgo anual se estima para una vivienda del sitio de estudio como el producto de la amenaza y el valor de la pérdida dado el evento catastrófico, considerando la vulnerabilidad. La metodología empleada se enfoca en el deslizamiento ocurrido el 26 de octubre de 2016 en un talud dentro del sitio de estudio que afectó la vivienda que es objeto de análisis.

Palabras clave: Deslizamientos; riesgo; amenaza; vulnerabilidad; TRIGRS; Montecarlo.

Risk Assessment of Shallow Landslides for Infrastructure Projects: Analysis of the Case of a Landslide in the El Cabuyal Zone

Abstract

In this paper an assessment of the hazard, the vulnerability and the risk associated with shallow landslides in a watershed of the Valle de Aburra is carried out. The TRIGRS model with a Monte Carlo simulation to estimate the probability of failure in the watershed using water table depth as the trigger factor is implemented, which allows the assessment of the hazard along with its annual probability of occurrence. Additionally, a quantitative model for physical vulnerability of structures which takes into account landslide intensity and resistance of exposed elements is used. The annual risk is estimated for a house of the study site as the product of the hazard and the damage costs due to the occurrence of the catastrophic event, which considers vulnerability. The methodology used focuses on the shallow landslide occurred on October 26, 2016 on a slope within the study site, which affected the house that is being analyzed.

Keywords: Landslide; risk; hazard; vulnerability; TRIGRS; Monte Carlo.

1 Introducción

Los movimientos en masa son reconocidos globalmente como un fenómeno causante de desastres naturales de suma importancia por sus efectos destructivos en la sociedad y el medio ambiente [1]. Si bien se consideran como un proceso natural dentro del ciclo geomorfológico y del desarrollo

paisajístico, pueden afectar significativamente el desarrollo socioeconómico al involucrar las vidas y propiedades humanas, principalmente cuando la ocurrencia de este fenómeno se potencia por actividades antropogénicas [2], [3].

En ambientes tropicales y terrenos montañosos son muy comunes los deslizamientos superficiales (espesores menores a 2 m), los cuales suelen ser inducidos por lluvias de alta intensidad o larga duración. Son generados principalmente por aumento en la presión de poros o por la pérdida de succión, un componente que actúa como una cohesión aparente [4].

El incremento en las presiones de poros positivas puede ser debido a oscilaciones en el nivel freático o a la presencia de niveles freáticos colgados; por su parte, estos se dan por el agua que se infiltra a través de diferentes mecanismos, como la infiltración por medio de vías difusas o preferenciales [5]. Asimismo, la entrada de agua en la zona saturada se puede dar mediante un movimiento descendente debido a las fuerzas de gravedad y por movimiento horizontal del flujo debido a las condiciones hidráulicas del suelo [6].

Tradicionalmente, la falla de un talud, especialmente en depósitos coluviales y rocas meteorizadas, se evalúa a través de análisis de estabilidad de taludes con modelos determinísticos cuya solución es única para unas condiciones iniciales dadas, sin tener en cuenta la variación de los parámetros [7],[8]. Recientemente, se han propuesto diferentes métodos probabilísticos [9, 10, 11, 12] que buscan reducir el grado de incertidumbre que suelen tener los modelos determinísticos [13]. La presente investigación se centra en el análisis y evaluación cuantitativa del riesgo de ocurrencia de deslizamientos superficiales, adoptando un método probabilístico para evaluar la probabilidad de falla. Se integran metodologías propuestas por otros investigadores para el análisis de la amenaza [14],[15] y la vulnerabilidad [10],[11].

De esta manera, se realiza una zonificación del riesgo de ocurrencia de deslizamientos superficiales en una subcuenca del Valle de Aburrá, incluyendo como objeto de análisis las condiciones ambientales y del suelo presentadas en la iniciación del deslizamiento ocurrido el 26 de octubre de 2016 en un talud dentro del área de estudio, en el municipio de Copacabana. Para esto, se introduce el efecto del flujo regional como causante del ascenso del nivel freático en el sitio donde ocurrió el deslizamiento, de modo

que se considera a esta condición como el factor detonante en el análisis de la amenaza. Por su parte, se emplea el modelo de vulnerabilidad de Guimarães Silva [16], aplicable a viviendas y edificios. En el presente artículo se expone el caso de una vivienda situada dentro del área del deslizamiento sobre el cual se centra el estudio.

2 Metodología

Se realiza un análisis y evaluación cuantitativa de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo asociados a la ocurrencia de un deslizamiento superficial en un terreno montañoso, en una zona tropical. Un peligro (evento) combinado con una probabilidad determinan la amenaza $P[T]$, la cual combinada con las consecuencias expresan el riesgo (R) [17]. La vulnerabilidad está representada en las consecuencias, como el valor de la pérdida $u(C)$ debido a la ocurrencia de un evento catastrófico [18]:

$$R = P[T] * u(C) \quad (1)$$

La amenaza de movimientos en masa se define como la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno (un movimiento en masa potencialmente dañino) dentro de un periodo de tiempo y en un área dada [19]. En esta investigación se consideran las condiciones presentadas el 26 de octubre de 2016 en el momento en que ocurrió el deslizamiento en El Cabuyal, como factor desencadenante de dicho movimiento en masa. Este evento no fue iniciado por una lluvia extrema en la zona porque no ocurrieron precipitaciones intensas en aquel sitio en las 24 horas previas al deslizamiento. A su vez, en días posteriores al evento se observó un manantial en el área del deslizamiento, con agua brotando continuamente en un flujo que se asocia a la recarga regional.

El presente trabajo involucra el aporte del flujo regional en la saturación del suelo con base en un estudio sobre la dinámica de la recarga en el norte del Valle de Aburrá [20]. De esta manera, se asume que el deslizamiento fue detonado por ascensos en los niveles freáticos provocados por lluvias antecedentes de 15 días en el altiplano (aledaño a la ladera en donde ocurrió el deslizamiento), que al infiltrarse posibilita la circulación de agua a través de discontinuidades del macizo rocoso.

La probabilidad de falla se define como:

$$P_S = P(FS < 1,0) \quad (2)$$

donde FS es el Factor de Seguridad, evaluando la probabilidad de que FS sea menor a 1 en cada celda que representa un área de 12.5 m x 12.5 m dentro del sitio estudio. La amenaza se constituye como el producto de la probabilidad de ocurrencia anual del factor desencadenante del deslizamiento P_T con la probabilidad espacial relativa de su ocurrencia P_S .

La vulnerabilidad se define como el grado de pérdida o daño de un elemento o conjunto de elementos dentro del área afectada por una amenaza [21]. La presente investigación emplea un modelo que define la vulnerabilidad (V) a partir de factores de intensidad y resistencia de las estructuras [16]:

$$V = f(I, R_{str}) \quad (3)$$

$$V = \left[1 + \left(\frac{Z}{0,55} \right)^{-3,5} \right]^{-1} \quad (4)$$

donde R_{str} es la resistencia de las estructuras y Z el gradiente modificado entre la energía potencial y cinética que interactúan en un deslizamiento. Para una estructura, R_{str} se calcula de acuerdo a la siguiente expresión [22]:

$$R_{str} = (\xi_{sfd} * \xi_{sty} * \xi_{smn} * \xi_{sht})^{0,25} \quad (5)$$

donde ξ_{sfd} , ξ_{sty} , ξ_{smn} y ξ_{sht} son factores que dependen de la profundidad de la fundación, el material de construcción de la estructura portante vertical, el estado de mantenimiento y la altura (número de pisos) de la estructura, respectivamente.

Para el factor asociado a la profundidad de fundación ξ_{sfd} , se sugiere:

$$\xi_{sfd} = \left(\frac{D_{fod}}{10} \right)^{1/3} - 0,05 \quad (6)$$

donde D_{fod} es la profundidad de la fundación (en metros) de la estructura.

La intensidad se incluye en el modelo a través del gradiente modificado (Z), expresado de forma simplificada como se muestra en la Ecuación (7).

$$Z = \frac{H}{D} \quad (7)$$

donde H es la diferencia de altura entre la cota máxima del deslizamiento y la cota de la estructura expuesta y d la distancia desde el centro de gravedad de la estructura a la cota máxima del deslizamiento medida a lo largo del terreno.

Para el factor asociado a la tipología estructural (ξ_{sty}), se presentan seis categorías de tipo de estructura en términos de la vulnerabilidad a los deslizamientos. Estos pueden ser asignados subjetivamente como se muestra en la Tabla 1, propuesta por Li et al. (2010) [22]. Asimismo, para el factor asociado al estado de mantenimiento ξ_{smn} proponen cinco clases (Tabla 2) y cuatro rangos de diferente altura para ξ_{sht} (Tabla 3).

Tabla 1: Valores propuestos del factor de resistencia para la tipología estructural (Adaptada de [22])

Tipología estructural	Símbolo	ξ_{sty}
Estructura aligerada en madera	LT	0.10
Estructura aligerada	LS	0.20
Estructura mixta (concreto y madera)	MS	0.40
Muros de mampostería y concreto	BC	0.80
Concreto reforzado	RC	1.30
Reforzada	RF	1.50

Tabla 2: Valores propuestos del factor de resistencia para el estado de mantenimiento de la estructura.

Estado de mantenimiento	Símbolo	ξ_{smn}
Muy pobre	VP	0.10
Pobre	P	0.40
Medio	M	0.80
Bueno	G	1.20
Muy bueno	VG	1.50

Tabla 3: Valores propuestos del factor de resistencia para la altura de la estructura.

Altura	Símbolo	Número de pisos	ξ_{sht}
Un solo piso	S	1	0.10
Edificio bajo	L	2	0.40
Edificio de altura media	M	3, 4, 5	0.90
Edificio alto	H	6	1.50

2.1 Sitio de estudio

Se considera una subcuenca del Valle de Aburrá, ubicada en la vereda El Cabuyal (municipio de Copacabana, Colombia), con un área de 3.06 km². Tiene un rango de elevaciones entre 1636 m y 2596 m (Figura 1).

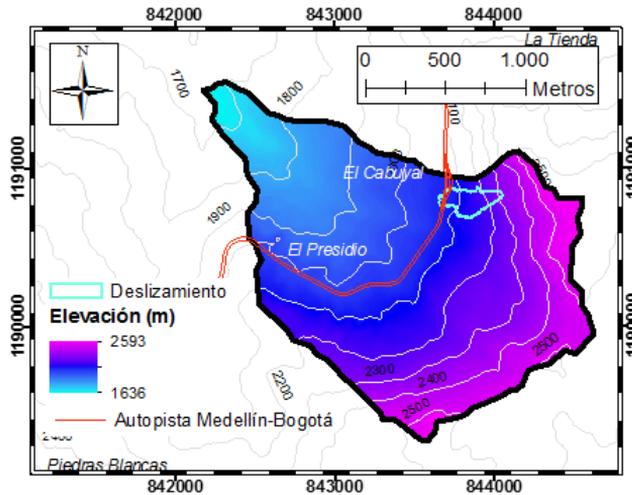


Figura 1: Modelo digital de elevación de la subcuenca (Copacabana, Antioquia).

Se presenta un suelo homogéneo, limo arenoso, con tonalidades rojas pálidas y puede alcanzar espesores superiores a tres metros. Este horizonte de suelo corresponde al perfil de meteorización del Gneis de la Ceja (PRnLc), el cual es la unidad litológica que predomina en la zona y subyace a la

anfíbolita de Medellín (TRaM). Una de las características importantes de esta última es la orientación de sus discontinuidades respecto a la margen derecha del río Aburrá, de modo que las familias de diaclasas predominantes (NE/NW y N-S/W) sirven de canales por donde el agua de la lluvia se incorpora fácilmente al agua subterránea y alimenta los acuíferos de la parte baja de la ladera [20]. Esta condición es relevante en la selección del factor detonante del deslizamiento en el que se basa la presente investigación. Asimismo, se destaca la presencia de depósitos de vertiente (no consolidados) a partir de flujos de deslizamiento (QdIII), que desarrollan una condición de saturación parcial.

2.2 Datos de entrada

Las variables geotécnicas e hidrológicas son parámetros de entrada requeridos en el modelo TRIGRS [14]. Estos se introducen como distribuciones de probabilidad, obteniendo para simulaciones individuales un conjunto de parámetros que se toman aleatoriamente de una distribución normal que se asume para cada parámetro. Raia et al. (2014) [15] proponen esta distribución en los casos en donde se han caracterizado las propiedades físicas de los materiales geológicos mediante ensayos de campo y/o laboratorio.

TRIGRS permite modelar la distribución temporal y espacial de deslizamientos superficiales detonados por lluvia. Se basa en la deducción de los cambios transitorios de la presión de poros y su incidencia en el Factor de Seguridad, asociado a la infiltración de la lluvia. Un modelo de infiltración en suelo parcialmente saturado permite el cálculo de la cabeza de presión. Esta se introduce en la ecuación del Factor de Seguridad (FS) del modelo de talud infinito unidimensional de Taylor (1948) [23]:

$$FS(Z, t) = \frac{\tan \phi'}{\tan \delta} + \frac{c' - \psi(Z, t)\gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s Z \sin \delta \cos \delta} \quad (8)$$

donde c' es la cohesión efectiva del suelo, ϕ' el ángulo de fricción efectivo, γ_w el peso unitario del agua, γ_s el peso unitario del suelo y $\psi(Z, t)$ la cabeza de presión en función de la profundidad Z y el tiempo t .

Baum et al. (2010) [24] describen de forma detallada los modelos hidrológicos y geotécnico de TRIGRS. La Tabla 4 muestra los valores medios de los parámetros requeridos en las simulaciones, junto con sus desviaciones estándar.

Tabla 4: Valores promedios y desviaciones estándar de los parámetros hidrológicos y geotécnicos requeridos en TRIGRS. Cohesión efectiva (c'), ángulo de fricción efectivo (ϕ'), peso unitario del suelo (γ_s), conductividad hidráulica (K_s), difusividad hidráulica (D_0), contenido de humedad saturada (θ_{sat}), contenido de humedad residual (θ_{res}), inversa de la cabeza de entrada de aire o de la altura del ascenso capilar sobre el nivel freático (α), tasa de infiltración inicial (I_{ZLT}).

Variable	Media	Desviación estándar
$c' (kN/m^2)$	5.90	4.23
$\phi' (^\circ)$	35.9	5.4
$\gamma_s (kN/m^3)$	16.6	$0.25 * \gamma_{s_prom}$
$K_s (m/s)$	$5,00 * 10^{-5}$	$2,17 * 10^{-4}$
$D_0 (m^2/s)$	0.005	0.025
θ_{sat}	0.45	$0.25 * \theta_{sat_prom}$
θ_{res}	0.1	$0.5 * \theta_{res_prom}$
$\alpha (1/m)$	1	0.5
$I_{ZLT} (m/s)$	$1,00 * 10^{-6}$	$2,00 * 10^{-6}$

El espesor del estrato superficial (suelo, en adelante) y la profundidad del nivel freático no varían entre simulaciones. Se implementa la función exponencial utilizada por Baum et al. (2010) [14] para elaborar un mapa de la profundidad de la base del suelo, asumida como la superficie deslizante o la profundidad de la frontera basal impermeable d_{LZ} . Esta se expresa en función del ángulo del talud δ , $d_{LZ} = 5,0exp(-0,04\delta)$, con un límite inferior de 1.4 m y uno superior de 3.6 m (Figura 2).

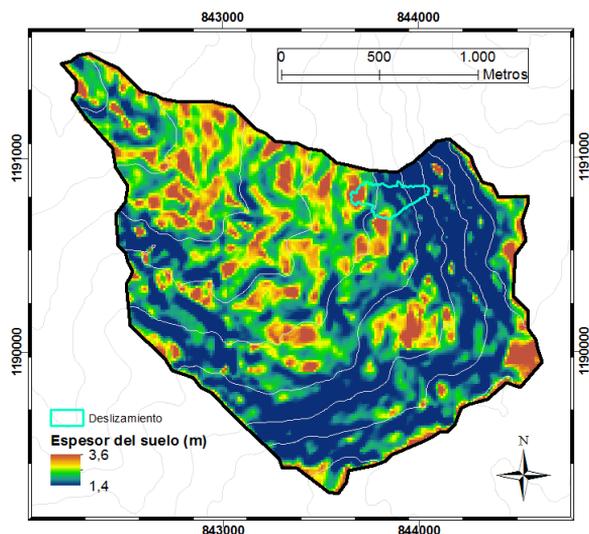


Figura 2: Mapa del espesor del depósito superficial, asumido como la profundidad de la superficie deslizante en el modelo TRIGRS.

2.3 Análisis de sensibilidad

En el análisis se incorpora la condición de un ascenso en los niveles freáticos como factor desencadenante del deslizamiento, y cobra importancia la determinación de la profundidad del nivel freático en el área de estudio. Marín & Osorio (2017) [25] realizan un análisis de estabilidad en la misma subcuenca simulando la ubicación inicial del nivel freático como una fracción de la profundidad del estrato superficial ($0,75d_{LZ}$), como se ha hecho en investigaciones con TRIGRS en otros sitios del mundo [15],[26],[27].

Se analiza su posición en el sitio donde ocurrió el movimiento, tomando como referencia el área afectada por el deslizamiento que se muestra en las Figuras 1, 2. Para esto, se realiza un análisis de sensibilidad empleando el modelo TRIGRS (con los valores medios de los parámetros mostrados en la Tabla 4), variando la profundidad del nivel freático en cada celda de la subcuenca, como una fracción de la profundidad del suelo (Figura 2).

Este análisis de sensibilidad se realiza incluyendo la técnica de análi-

sis ROC [28], ampliamente empleada en diferentes campos y que puede ser utilizada para evaluar el desempeño de modelos para la predicción de movimientos en masa. Se basa en una clasificación que se le asigna a cada celda, siendo cada una etiquetada como clase positiva o negativa de acuerdo al inventario de deslizamientos (si falla o no) y la distinción de verdaderas o falsas según la predicción del modelo.

Se denominan verdaderos positivos a las celdas predichas como inestables (en la simulación) y que efectivamente presentan falla (deslizamiento) en el inventario; por su parte, son falsos positivos las celdas que se predicen inestables pero no se registran con falla en el inventario. Los verdaderos negativos son las que el modelo predice como estables y que no fallan en el inventario; por último, son falsos negativos las predicciones de estabilidad que se presentan como deslizamiento dentro del inventario.

Una ventaja del análisis ROC es la existencia de indicadores métricos que se han definido para la evaluación del desempeño de los modelos. La tasa de verdaderos positivos o tasa de aciertos (Hit rate, en inglés) es la relación entre los verdaderos positivos y el total de positivos (todas las celdas que fallan de acuerdo al inventario). La tasa de falsas alarmas (False alarm rate, en inglés) es la relación entre falsos positivos y el total de negativos [29],[30].

De esta manera, se ejecutan diferentes simulaciones con TRIGRS, iniciando con el nivel freático en la misma profundidad del suelo. En las siguientes simulaciones se reduce la profundidad en la que se encuentra el nivel del agua (es decir, se aumenta su altura) como una fracción de la profundidad del suelo, desde 1 (nivel freático coincidiendo con la profundidad del suelo) hasta 0 (nivel freático en la superficie), con un decremento del 10%.

La Tabla 5 muestra el porcentaje del área que falla en cada simulación, el Factor de Seguridad mínimo, la tasa de aciertos y la tasa de falsas alarmas, tomando como clases positivas las celdas dentro del área del deslizamiento del 26 de octubre de 2016 (Figuras 1, 2, 3).

Tabla 5: Resultados de simulaciones variando la profundidad del nivel freático, como un factor del espesor del suelo o profundidad de la superficie deslizante (d_{LZ}).

Profundidad del nivel freático	FS mínimo	Porcentaje del área que falla	Tasa de aciertos	Tasa de falsas alarmas
d_{LZ}	1.00	0.1 %	0.0 %	0.3 %
(0.9) * d_{LZ}	0.98	0.3 %	0.0 %	0.3 %
(0.8) * d_{LZ}	0.97	0.6 %	2.5 %	0.6 %
(0.7) * d_{LZ}	0.96	1.0 %	5.3 %	1.0 %
(0.6) * d_{LZ}	0.95	1.7 %	9.3 %	1.6 %
(0.5) * d_{LZ}	0.93	2.7 %	10.7 %	2.5 %
(0.4) * d_{LZ}	0.91	3.9 %	12.1 %	3.8 %
(0.3) * d_{LZ}	0.90	5.2 %	13.2 %	5.1 %
(0.2) * d_{LZ}	0.88	7.0 %	14.6 %	6.9 %
(0.1) * d_{LZ}	0.86	9.6 %	17.8 %	9.5 %
0	0.84	13.0 %	21.4 %	12.9 %

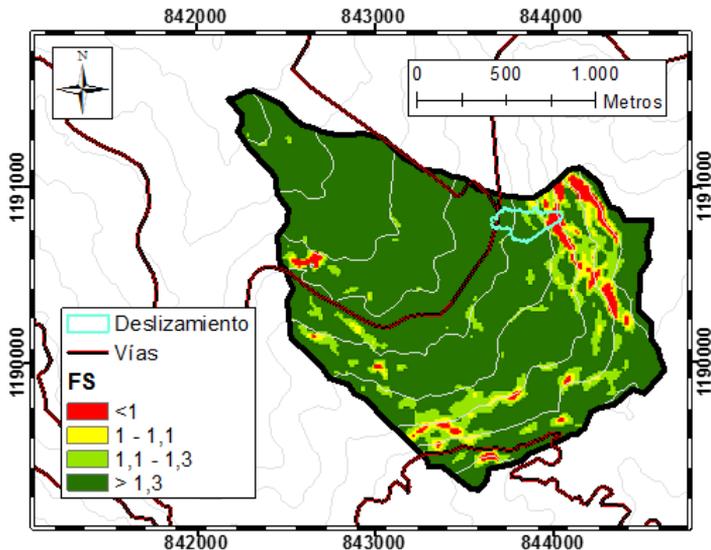


Figura 3: Mapa de susceptibilidad.

Finalmente, se selecciona como la altura del nivel freático para el análisis de susceptibilidad y amenaza la primera simulación con una tasa de aciertos superior a 10%. La Figura 3 muestra los resultados de esta simulación y se presenta como el mapa de susceptibilidad ante el factor desencadenante que se asocia a dicha profundidad del nivel freático.

3 Amenaza

3.1 Probabilidad de falla

Se realiza una simulación de Montecarlo en donde se generan 2000 escenarios con diferentes conjuntos de los parámetros de entrada (geotécnicos e hidrológicos) requeridos en cada simulación con TRIGRS (ver Tabla 4). Se asumen distribuciones normales de probabilidad para cada uno de ellos. Raia et al. (2013) [31] adopta un enfoque probabilístico que también incluye esta función de densidad de probabilidad para las variables en el código de su modelo TRIGRS-P. De igual forma, otros estudios de estabilidad de taludes analizan la variación de los parámetros empleando esta distribución [32],[33],[34].

El empleo de una distribución normal puede ser apropiado en el caso en que la incertidumbre y los errores de medición se hayan determinado por medio de suficientes ensayos de campo o experimentos de laboratorio [15]. Se opta por esta distribución como un ejercicio académico que pretende determinar de manera razonable los valores medios y las desviaciones estándar de estos parámetros (Tabla 4). Se sugiere que la metodología propuesta sea reproducida con el mayor rigor posible en la definición de las funciones de probabilidad de los parámetros analizados.

Raia et al (2014) [15] muestran la implementación de TRIGRS-P utilizando únicamente funciones de probabilidad uniformes para las variables que describen las propiedades de los materiales, presentándolo como una alternativa para contrarrestar la limitación del poco conocimiento de las características del terreno. En este caso solo se conocen sus probables rangos de variación, pero no se tiene información sobre la estructura interna de la incertidumbre. En esta investigación no se implementa el software TRIGRS-P, sino un código propio desarrollado en Python.

Cada simulación se lleva a cabo sin considerar un evento de lluvia, siendo la posición del nivel freático, adoptada del análisis de sensibilidad en cada celda (nivel freático en la mitad de la profundidad del suelo, asumida como superficie deslizante d_{LZ}), la que influye en su estabilidad como el factor detonante de deslizamientos superficiales. La Figura 4 muestra el mapa de probabilidad de falla ante la profundidad del nivel freático especificada como factor desencadenante ($0,5 * d_{LZ}$). La probabilidad en cada celda se obtiene de acuerdo al número de veces que falla ($FS < 1.0$) en las 2000 simulaciones.

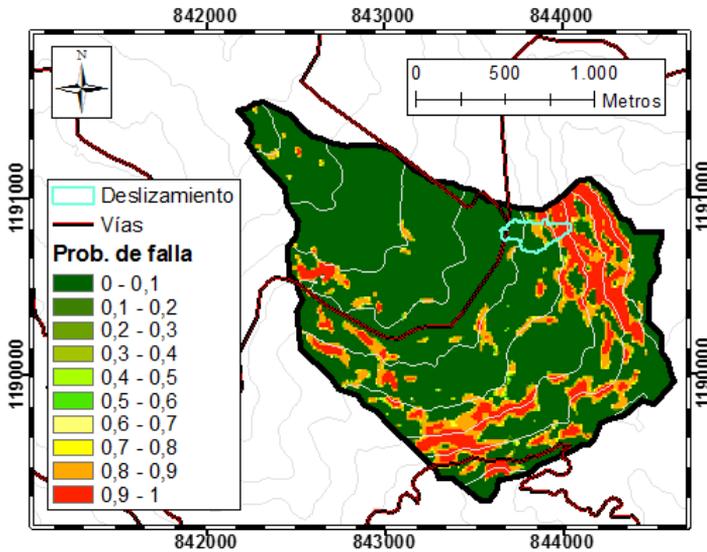


Figura 4: Mapa de probabilidad de falla.

3.2 Probabilidad de ocurrencia anual

Como se mencionó anteriormente, a la posición del nivel freático en el momento del deslizamiento del 26 de octubre de 2016 en el talud de la autopista Medellín-Bogotá, en el kilómetro 12+200 (El Cabuyal), se le asocia la incidencia del flujo regional por infiltración de lluvias en el altiplano (en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas). De esta manera, se asume que el

incremento del nivel freático está relacionado con las intensas precipitaciones ocurridas en el altiplano durante los 15 días anteriores al deslizamiento, con un acumulado de 233.6 mm.

La probabilidad de ocurrencia anual del acumulado de lluvia en el altiplano en los 15 días anteriores al deslizamiento, se calculó a partir del registro histórico de lluvias registrado en una estación meteorológica del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá-SIATA. La estación 207 (Vivero EPM Piedras Blancas), ubicada en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, está aproximadamente a 4 km del sitio de estudio.

Esta estación proporciona información de la cantidad de agua que cae en el sitio donde está ubicado un sensor que mide la precipitación con una resolución temporal de un minuto. Se cuenta con datos históricos de un poco más de 4 años, desde febrero de 2013. A partir de esto, se obtuvo una probabilidad de ocurrencia anual del 16.7%.

4 Vulnerabilidad

Se emplea el modelo de vulnerabilidad de Guimarães Silva (2015) [16], que incluye la intensidad del deslizamiento y susceptibilidad de los elementos expuestos a unos factores que se derivan del marco conceptual para la estimación de la vulnerabilidad de estructuras a deslizamientos, propuesta por Uzielli et al. (2008) [35]. Los factores de resistencia, descritos por Li et al. (2010) [22], se asocian a la capacidad de las viviendas de soportar un movimiento en masa, considerando los materiales de construcción de la estructura portante vertical, su altura, su estado de mantenimiento y la profundidad de la fundación de la estructura. La Tabla 6 muestra los factores de resistencia seleccionados a partir de la tipificación de una vivienda ubicada en el kilómetro 12+200 aledaña a la vía, afectada por el deslizamiento que se considera en el presente estudio. Con esto, se obtiene el valor de resistencia R_{str} (Ecuación (5)).

La profundidad de la fundación (D_{fod}), estimada de 1 m, permite el cálculo de ξ_{sfd} (Ecuación (6)). Se toma un valor de ξ_{sty} de 1.3 asociado a una tipología estructural de concreto reforzado (Tabla 1). De igual forma, se opta por el valor propuesto de factor de resistencia para un buen estado de

mantenimiento ($\xi_{smn} = 1.2$, Tabla 2) y para una edificación de baja altura ($\xi_{sht} = 0.4$, Tabla 3). Este último factor se destaca como característica general en las viviendas aledañas a la autopista Medellín-Bogotá dentro de la zona de estudio, principalmente de uso residencial.

Tabla 6: Factores de resistencia empleados y resistencia (R_{str}) de la vivienda en riesgo.

ξ_{sfd}	ξ_{sty}	ξ_{smn}	ξ_{sht}	R_{str}
0.51	1.3	1.2	0.4	0.75

5 Resultados y discusión

La Figura 5 muestra el mapa de amenaza por deslizamientos superficiales asociados al incremento del nivel freático en el suelo. En la parte alta de la subcuenca se presentan los mayores niveles de amenaza, con valores superiores al 16 % anual. Los valores altos se deben principalmente a la alta probabilidad de excedencia de un acumulado de 233.6 mm de lluvias en 15 días en el altiplano, asumido como el factor externo que incide directamente en el ascenso del nivel freático.

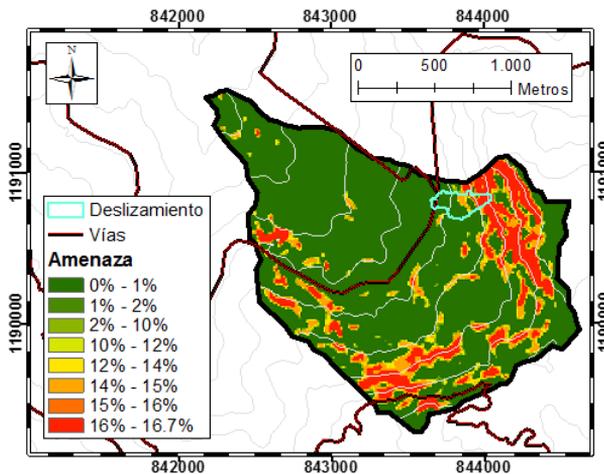


Figura 5: Mapa de amenaza (probabilidad anual).

Asimismo, los parámetros de entrada requeridos en la simulación de Montecarlo con el modelo TRIGRS influyen de forma significativa en los resultados de la amenaza. Cabe destacar la relación existente entre tres variables que afectan de forma directa en el análisis de estabilidad: la pendiente, la profundidad del suelo y la profundidad del nivel freático. En este caso, la posición del nivel freático se definió en función de la profundidad del suelo; por su parte, esta es función de la pendiente en la superficie del terreno.

Las zonas en mayor amenaza se localizan en los sitios de mayor pendiente, principalmente en la cabecera de la subcuenca, en donde se distinguen cotas por encima de 2200 m. s. n. m. En estas zonas, la cobertura de suelos se asume cercana a 1.4 m de espesor, en un terreno con baja cobertura vegetal.

En el presente análisis se supone que el factor detonante de deslizamientos superficiales es el ascenso del nivel freático debido a la recarga regional por infiltración de lluvias en el altiplano, asumiendo que el proceso de recarga afecta la posición del nivel freático en tiempos similares para todo el sitio de estudio. Esta condición ideal, que no tiene en cuenta la dinámica de las aguas subsuperficiales en el terreno, evidencia la necesidad de interpretar el mapa de amenaza de forma cuidadosa.

Esta simplificación no es necesaria en los análisis de la amenaza asociada a movimientos en masa detonados por lluvias ocurridas en el mismo sitio de estudio. Sin embargo, este tipo de análisis tradicional no resuelve el problema planteado en la presente investigación, en donde el deslizamiento superficial registrado no fue inducido por un evento de lluvia en particular.

La probabilidad de ocurrencia anual del acumulado de precipitación de 15 días, en el altiplano, tiene un valor relativamente alto por dos motivos principales: el acumulado fue significativo, pero históricamente fue igualado o superado en varias ocasiones (no es muy atípico), y los registros históricos de precipitación analizados fueron relativamente cortos. Cabe destacar que en este tipo de análisis la probabilidad de ocurrencia anual del factor desencadenante de los deslizamientos tiene mucha incidencia en la evaluación de la amenaza y su estudio exhaustivo es de vital importancia.

Para la zonificación de la vulnerabilidad, el modelo empleado introduce en su análisis la consideración de cada estructura como una unidad indivi-

sible. Esto implica que la resolución espacial con la que se trabaja incida en la interpretación de los resultados. Su incidencia se analiza comparando la variación del gradiente modificado (Z) en el área del deslizamiento en la vereda El Cabuyal; en su interior se encuentra la vivienda que hace parte del estudio, representada como un elemento rectangular en las Figuras 6a y 6b.

La Figura 6 muestra los resultados de los cálculos de Z empleando una resolución espacial de 1 m x 1 m (Figura 6a) y una de 30 m x 30 m (Figura 6b). En el primer caso (Figura 6a), se presenta una variación del gradiente modificado al interior de la vivienda, lo que imposibilita determinar la vulnerabilidad de la vivienda como un conjunto, al estimarla como la suma de porciones de igual resistencia. Por lo tanto, el elemento expuesto no se considera como una unidad indivisible.

Por su parte, empleando un tamaño de pixel de 30 m (Figura 6b), la vivienda se aproxima a estar incluida totalmente dentro de una celda del ráster, de tal forma que se puede considerar un valor de Z único para la vivienda. De esta manera, las variables geométricas que emplea el modelo para cuantificar la intensidad (H y d) se pueden determinar en el centroide del polígono que representa la vivienda.

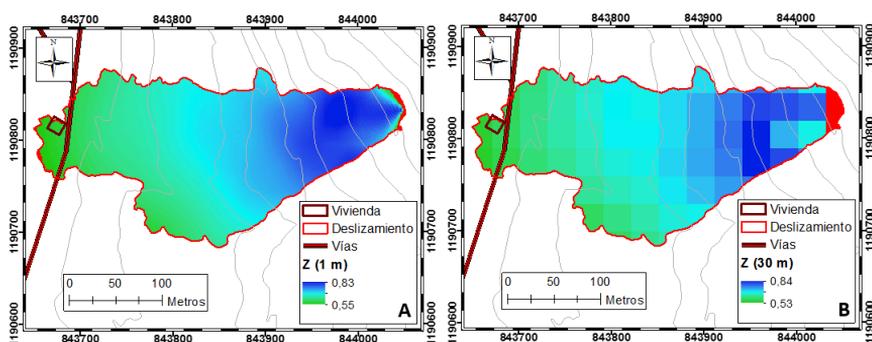


Figura 6: Variación del gradiente modificado (Z) dentro del área del deslizamiento con (A) una resolución espacial de 1 m x 1 m y (B) una resolución de 30 m x 30 m.

La Figura 6b muestra la variación del gradiente modificado (Z) dentro del área del deslizamiento. Esta variable, junto con metodologías para es-

timar áreas potenciales de deslizamientos, puede ser una herramienta útil dentro de los sistemas de alerta temprana y proyectos de infraestructura. La relación proporcional de Z con la vulnerabilidad física (Ecuación (4)) permite identificar y preestablecer zonas de alta vulnerabilidad. De igual forma, puede ser empleada para analizar la interacción y/o necesidad de implementar medidas de mitigación del riesgo por distintos focos de deslizamientos cuando son establecidos los mapas de amenaza.

Así mismo, otro factor que diferencia los valores de Z para ambos tamaños del pixel es la variación en las coordenadas del punto que representa la ubicación del sitio en el cual se desencadena el deslizamiento. En efecto, se infiere que el tamaño del ráster a emplear debe ser compatible y representativo a las dimensiones de los elementos a analizar, de modo que se emplea una resolución espacial de 30 m x 30 m para determinar la vulnerabilidad. La Tabla 7 muestra los valores de los parámetros requeridos y el valor de vulnerabilidad para la vivienda estudiada.

Tabla 7: Parámetros requeridos para el cálculo de la vulnerabilidad.

$d(m)$	$H(m)$	Z	T	V
0.51	1.3	1.2	0.4	0.75

Guimarães Silva (2015) [16] clasifica los daños sufridos por estructuras a partir de una observación de las mismas, considerando los parámetros y cálculos de resistencia realizados en cada una de ellas. Asociados a los daños sufridos, los valores de vulnerabilidad observada se clasifican como parcial leve (0.3 y 0.4), parcial media (0.5 y 0.6), parcial intensa (0.7, 0.8 y 0.9) y total (1.0). De esta manera, el valor estimado de 0.77 representa una vulnerabilidad parcial intensa, que se puede describir como una vulnerabilidad alta en la que no se compromete la totalidad del área de la estructura con la ocurrencia del deslizamiento analizado.

Finalmente, se calcula el riesgo a partir de los análisis de amenaza y vulnerabilidad. El valor económico del metro cuadrado construido en el municipio de Copacabana es de \$88.58 (USD), de acuerdo al catastro departamental. De esta manera, se obtiene el valor de la pérdida $u(C)$ mediante el producto de la vulnerabilidad ($V = 0.77$) de la vivienda (Tabla 3) y el valor económico del área de la vivienda expuesta a la amenaza

($u(C) = \$12\,195.55$, USD). La amenaza en la celda que representa el punto de iniciación del deslizamiento (en la corona) es de 16.7 %, de modo que el riesgo anual (Ecuación (1)) es de $\$2\,032.59$ (USD).

De acuerdo a la evaluación realizada, en términos económicos, la vivienda tenía un alto riesgo anual por deslizamientos superficiales. En el presente análisis se considera únicamente las pérdidas económicas por el costo de metro cuadrado construido. Si bien se podrían incluir otros elementos en el análisis, como el riesgo de pérdidas humanas, se expresa cuantitativamente una valoración del riesgo que incluye la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad, que puede ser perceptible en términos económicos y es de suma importancia en los proyectos de ingeniería.

6 Conclusiones

La metodología empleada permite el análisis y evaluación cuantitativa de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo asociados a inestabilidad de laderas. Puede ser una herramienta útil para la planificación urbana y el ordenamiento territorial. Se integra un modelo físico determinístico [14] que predice la ocurrencia de deslizamientos superficiales, aplicando una simulación de Montecarlo para estimar la probabilidad de falla de las celdas que representan un área del terreno. Asimismo, se emplea un modelo que cuantifica la vulnerabilidad [16] de una vivienda afectada por un deslizamiento superficial, permitiendo el cálculo del riesgo como las consecuencias o pérdidas probables del elemento expuesto a un evento adverso.

La aplicación del método probabilístico (Montecarlo) es útil para la evaluación cuantitativa de la amenaza por la dificultad que tienen los modelos determinísticos en la obtención de valores adecuados para las variables que describen las propiedades del suelo y las condiciones geotécnicas e hidrológicas del terreno. Tiene una gran trascendencia en modelos distribuidos aplicados en grandes áreas de terreno, donde generalmente la información disponible es limitada [15] por la dificultad de realizar suficientes ensayos de laboratorio y de campo a lo largo de grandes áreas de terreno y suele haber gran incertidumbre en la parametrización de los mismos [36],[37],[38].

Cuando es poco el conocimiento que se tiene de las características del terreno en el área de estudio, se puede aplicar la simulación de Montecarlo

asignando distribuciones uniformes a los parámetros requeridos en el modelo [15]. En la presente investigación se asignaron distribuciones normales para los parámetros, de modo que sus valores medios y las desviaciones estándar definen directamente la incertidumbre. Dicho procedimiento se realiza para ilustrar la posibilidad de implementar este tipo de análisis en proyectos de infraestructura en donde se cuenta con mayor información de las condiciones geotécnicas e hidrológicas, de modo que es posible reducir en cierto grado la incertidumbre en los parámetros. Asimismo, se evidencia la importancia de realizar suficientes ensayos de campo y de laboratorio para caracterizar adecuadamente las propiedades físicas de los materiales y las condiciones del terreno [39].

La consideración de una resolución espacial del ráster asociada al tamaño de la estructura, en el análisis de vulnerabilidad, permite considerar el elemento expuesto como una unidad indivisible, de tal forma que se le puede asignar un valor único a los parámetros del modelo (como el gradiente modificado Z), así como obtener un valor único en la estimación de la vulnerabilidad de la estructura. En este sentido, conviene hacer una selección del tamaño del ráster a partir de una evaluación de los elementos expuestos que son objeto de estudio. Por su parte, el parámetro Z puede ser un indicador de zonas de alta vulnerabilidad que puede ser implementado en la toma de decisiones relacionadas con la gestión del riesgo en sitios que se determinan como críticos en los análisis de la amenaza.

El procedimiento que se lleva a cabo puede ser reproducido en proyectos de infraestructura que involucren un elemento en riesgo. De igual forma, se puede extender para la implementación de medidas de mitigación en la gestión del riesgo, como son sistemas de alerta temprana de movimientos en masa basados en modelos físicos.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al ingeniero Luis Bermúdez por su orientación en programación, implementada en la ejecución de las simulaciones y el procesamiento de los resultados. También para el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) por sus incesantes esfuerzos por salvar vidas ante la posible ocurrencia de eventos que afectan a las personas; asimismo, al facilitar la información de los registros de precipitación

empleados en la investigación. Finalmente, a la Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia y al Grupo de Investigación en Infraestructura (GII) por el apoyo constante y por fomentar el avance investigativo.

Referencias

- [1] J. Samia, A. Temme, A. Bregt, J. Wallinga, F. Guzzetti, F. Ardizzone, and M. Rossi, “Characterization and quantification of path dependency in landslide susceptibility,” *Geomorphology*, vol. 292, pp. 16–24, 2017. 154
- [2] E. Aristizábal and J. Gómez, “Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá. Originados por fenómenos naturales y antrópicos en el período 1880-2007,” *Gestión y ambiente*, vol. 10, no. 2, 2007. 155
- [3] R. C. Sidle and T. A. Bogaard, “Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated landslides,” *Earth-science reviews*, vol. 159, pp. 275–291, 2016. 155
- [4] E. V. Aristizábal, J. I. Vélez, and H. E. Martínez, “Influencia de la lluvia antecedente y la conductividad hidráulica en la ocurrencia de deslizamientos detonados por lluvias utilizando el modelo SHIA_Landslide,” *Revista EIA*, vol. 13, no. 26, pp. 31–46, 2016. 155
- [5] R. S. Crosbie, J. L. McCallum, G. R. Walker, and F. H. Chiew, “Modelling climate-change impacts on groundwater recharge in the Murray-Darling Basin, Australia,” *Hydrogeology Journal*, vol. 18, no. 7, pp. 1639–1656, 2010. 155
- [6] V. Otálvaro, M. Victoria, L. M. Vásquez Ariza *et al.*, “Métodos para determinar la recarga de acuíferos.” 2004. 155
- [7] D. Griffiths and G. A. Fenton, “Probabilistic slope stability analysis by finite elements,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, no. 5, pp. 507–518, 2004. 155
- [8] C. C. Silva, “Análise de estabilidade de um talude da cava de alegria utilizando abordagem probabilística.” 2015. 155
- [9] H. J. Park, J. H. Lee, and I. Woo, “Assessment of rainfall-induced shallow landslide susceptibility using a gis-based probabilistic approach,” *Engineering Geology*, vol. 161, pp. 1–15, 2013. 155

- [10] E. Arnone, Y. Dialynas, L. Noto, and R. Bras, "Parameter uncertainty in shallow rainfall-triggered landslide modeling at basin scale: a probabilistic approach," *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 9, pp. 101–111, 2014. 155
- [11] D.-Q. Li, F.-P. Zhang, Z.-J. Cao, W. Zhou, K.-K. Phoon, and C.-B. Zhou, "Efficient reliability updating of slope stability by reweighting failure samples generated by Monte Carlo simulation," *Computers and Geotechnics*, vol. 69, pp. 588–600, 2015. 155
- [12] Y. Wang, Z. Cao, and S.-K. Au, "Efficient Monte Carlo simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis," *Computers and Geotechnics*, vol. 37, no. 7-8, pp. 1015–1022, 2010. 155
- [13] Y.-F. Lee and Y.-Y. Chi, "Rainfall-induced landslide risk at Lushan, Taiwan," *Engineering Geology*, vol. 123, no. 1-2, pp. 113–121, 2011. 155
- [14] L. Baum, W. Z. Savage, and J. W. Godt, "TRIGRS-A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0, US Geological Survey Open-File Report 2008–1159, available at: <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1159/>," 2008. 155, 160, 161, 172
- [15] S. Raia, M. Alvioli, M. Rossi, R. Baum, J. Godt, and F. Guzzetti, "Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: a probabilistic approach," *Geoscientific Model Development*, 2014. 155, 160, 162, 165, 172, 173
- [16] M. T. d. M. G. Silva, "Avaliação quantitativa da vulnerabilidade física associada a processos de deslizamentos de encostas," 2016. 156, 157, 167, 171, 172
- [17] H. Einstein and R. Sousa, "Warning systems for natural threats," *Georisk*, vol. 1, no. 1, pp. 3–20, 2007. 156
- [18] P. A. Isaza-Restrepo, H. E. M. Carvajal, and C. A. H. Montoya, "Methodology for quantitative landslide risk analysis in residential projects," *Habitat International*, vol. 53, pp. 403–412, 2016. 156
- [19] P. Jaiswal, C. J. van Westen, and V. Jetten, "Quantitative landslide hazard assessment along a transportation corridor in southern india," *Engineering geology*, vol. 116, no. 3-4, pp. 236–250, 2010. 156
- [20] J. Escobar, T. Betancur, E. García, C. Martínez, and P. Palacio, "Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos," *Revista Politécnica*, vol. 13, no. 24, pp. 37–48, 2017. 156, 160

- [21] R. Fell, K. Ho, S. Lacasse, and E. Leroi, "A framework for landslide risk assessment and management," *Landslide Risk Management*, pp. 3–26, 2005. 157
- [22] Z. Li, F. Nadim, H. Huang, M. Uzielli, and S. Lacasse, "Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards," *Landslides*, vol. 7, no. 2, pp. 125–134, 2010. 157, 158, 167
- [23] D. Taylor, *Fundamentals of soil mechanics*. Chapman And Hall, Limited.; New York, 1948. 160
- [24] R. L. Baum, J. W. Godt, and W. Z. Savage, "Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration," *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 115, no. F3, 2010. 161
- [25] R. J. Marín and J. P. Osorio, "Modelación de la contribución arbórea en análisis de susceptibilidad a deslizamientos superficiales," *Revista EIA*, vol. 14, no. 28, pp. 13–28, 2017. 162
- [26] Z. Liao, Y. Hong, D. Kirschbaum, R. F. Adler, J. J. Gourley, and R. Wooten, "Evaluation of TRIGRS (transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis)'s predictive skill for hurricane-triggered landslides: a case study in Macon County, North Carolina," *Natural hazards*, vol. 58, no. 1, pp. 325–339, 2011. 162
- [27] D. Salciarini, J. W. Godt, W. Z. Savage, P. Conversini, R. L. Baum, and J. A. Michael, "Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy," *Landslides*, vol. 3, no. 3, p. 181, 2006. 162
- [28] T. Fawcett, "An introduction to ROC analysis," *Pattern recognition letters*, vol. 27, no. 8, pp. 861–874, 2006. 163
- [29] E. Aristizábal, E. García, and C. Martínez, "Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains," *Natural Hazards*, vol. 78, no. 1, pp. 621–634, 2015. 163
- [30] E. Aristizábal, J. I. Vélez, H. E. Martínez, and M. Jaboyedoff, "SHIA_Landslide: a distributed conceptual and physically based model to forecast the temporal and spatial occurrence of shallow landslides triggered by rainfall in tropical and mountainous basins," *Landslides*, vol. 13, no. 3, pp. 497–517, 2016. 163
- [31] S. Raia, M. Alvioli, M. Rossi, F. Guzzetti, R. Baum, and J. Godt, "Improving predictive power of physically based rainfall induced shallow landslides models: a probabilistic approach with TRIGRS-P (v. 2.0)," 2013. 165

- [32] S. E. Cho, “Effects of spatial variability of soil properties on slope stability,” *Engineering Geology*, vol. 92, no. 3-4, pp. 97–109, 2007. 165
- [33] G. Steluti Marques and J. Azoia Lukiantchuki, “Evaluation of the stability of a highway slope through numerical modeling,” *Dyna*, vol. 84, no. 200, pp. 121–128, 2017. 165
- [34] G. B. Baecher and J. T. Christian, *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. John Wiley & Sons, 2005. 165
- [35] M. Uzielli, F. Nadim, S. Lacasse, and A. M. Kaynia, “A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides,” *Engineering Geology*, vol. 102, no. 3-4, pp. 251–256, 2008. 167
- [36] E. Arnone, Y. Dialynas, L. Noto, and R. Bras, “Accounting for soil parameter uncertainty in a physically based and distributed approach for rainfall-triggered landslides,” *Hydrological Processes*, vol. 30, no. 6, pp. 927–944, 2016. 172
- [37] C. Bovolo and J. Bathurst, “Modelling catchment-scale shallow landslide occurrence and sediment yield as a function of rainfall return period,” *Hydrological Processes*, vol. 26, no. 4, pp. 579–596, 2012. 172
- [38] R. J. Marín, J. P. Osorio *et al.*, “Evaluación de la estabilidad de taludes cuantificando el efecto de la vegetación,” in *ISRM 2nd International Specialized Conference on Soft Rocks*. International Society for Rock Mechanics, 2016. 172
- [39] J. C. Bathurst, C. I. Bovolo, and F. Cisneros, “Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale,” *Ecological Engineering*, vol. 36, no. 3, pp. 317–327, 2010. 173