

Metodología para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos lineales. Estudio de caso en el acueducto del municipio de Fredonia, Antioquia

Juliana Mendoza Ramírez¹ y Edier Aristizábal²

Recepción: 24-04-2017 | Aceptación: 13-08-2017 | En línea: 14-11-2017

doi:10.17230/ingciencia.13.26.7

Resumen

Los movimientos en masa se caracterizan por su capacidad de generar pérdidas. En Colombia, un considerable porcentaje de pérdidas está asociado a proyectos lineales; tan solo entre los años 2010-2011, 575 municipios fueron afectados por daños en la infraestructura de agua potable y saneamiento. Considerando la grave problemática de los proyectos lineales, el presente trabajo propone la combinación de métodos heurísticos, estadísticos y con base física para evaluar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, bajo diferentes escalas de análisis. Además de la construcción del mapa de unidades de criticidad, utilizando como unidad de análisis la Unidad Morfodinámica Independiente. El modelo obtenido es validado utilizando las curvas de éxito y el área bajo la curva (AUC, por su sigla en inglés). La metodología propuesta se implementó en el trayecto de la tubería del acueducto municipal del municipio de Fredonia en el departamento

¹ Universidad EAFIT, jmendoz1@eafit.edu.co, Medellín, Colombia.

² Universidad Nacional de Colombia, evaristizabal@unal.edu.co, Medellín, Colombia.

de Antioquia. Se identificó un 6 % de zonas tanto inestables como de muy alta y alta susceptibilidad; y un 13 % de zonas correspondientes tanto a cataclinales de menor buzamiento a la ladera y de igual buzamiento a la pendiente, como zonas de muy alta y alta susceptibilidad. El AUC para el análisis condicional y el mapa de criticidad arrojó un valor de 0.81 y 0.73 señalando un muy buen ajuste y desempeño de los modelos.

Palabras clave: Proyectos lineales; SHALSTAB; análisis condicional; heurístico; índice de TOBIA; susceptibilidad; amenaza.

Methodology for Landslide Susceptibility Assessment Along Linear Projects. Study Case in the Water Supply Pipeline of Fredonia, Antioquia

Abstract

Landslides are characterized by their capacity to generate losses. In Colombia, a considerable percentage of those are associated with linear projects; between 2010-2011, 575 municipalities were affected by damage to the infrastructure of water supply network and sanitation. Considering this serious problem related to linear projects, the present work proposes the combination of heuristic, statistical and physical based methods to evaluate the susceptibility and hazard of landslides, under different scales of analysis. In addition to the construction of a critical unit map, using as the unit of analysis the Independent Morphodynamic Unit. The obtained model is validated using the success curves and the Area Under the Curve (AUC). The proposed methodology was implemented in the pipeline of the municipal aqueduct of the municipality of Fredonia in the Antioquia region. It was identified 6% of areas, both unstable and very high and high susceptibility; and 13% of areas corresponding to both cataclinal over dip and pure dip slope, as well as areas of very high and high susceptibility. The AUC for the conditional analysis and the criticality map showed a value of 0.81 and 0.73 indicating a very good fit and performance of the models.

Key words: Linear projects; SHALSTAB; conditional analysis; heuristic; TOBIA index; susceptibility; hazard.

1 Introducción

Los movimientos en masa se caracterizan por su gran capacidad de generar pérdidas humanas y económicas [1]. En países como Italia, Japón y Estados Unidos las pérdidas económicas anuales varían entre 1 – 2 millones de

dólares [2]. Para el período 2002 – 2012 se registraron en el mundo 7,413 movimientos en masa no sísmicos que arrojaron un saldo de 62,312 muertos [3]. En Colombia, de acuerdo con los registros del Sistema de Inventario de Efectos de Desastres (DESINVENTAR), en los últimos 100 años se han registrado 9,650 movimientos en masa que han arrojado una cifra de 7,124 muertes, 23,848 viviendas destruidas y cerca de 3 millones de personas afectadas.

Algunos estudios han destacado las pérdidas a lo largo de infraestructura lineal, tales como vías y redes de servicio público, entre ellos los acueductos [4]. El acceso al servicio de agua potable es una necesidad básica y fundamental para el ser humano que se ve interrumpido por la ocurrencia de movimientos en masa. [5]. En Colombia un considerable porcentaje de las pérdidas por movimientos en masa están asociadas a proyectos lineales. El 52 % de movimientos en masa registrados reporta afectaciones en vías con el 26 % del total de víctimas por movimientos en masa, y el 5 % de movimientos en masa reporta afectaciones en los acueductos con el 5 % de víctimas. Tan solo en el periodo comprendido entre 2010 - 2011 bajo el fenómeno de La Niña, 575 municipios fueron afectados por daños en la infraestructura de agua potable y saneamiento. De estos municipios, el 64 % sufrieron daños en sus sistemas de acueducto, con pérdidas del orden de los \$248 mil millones [4]. Por parte de las empresas prestadoras se estimaron pérdidas alrededor de \$13 mil millones, en donde el 84 % fueron en el servicio de acueducto, a causa de la suspensión de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo [6].

Ante este escenario de pérdidas y afectaciones la predicción espacial de la ocurrencia de movimientos en masa ha sido un tema de gran interés para la comunidad científica en los últimos 30 años. Lo que ha permitido el desarrollo de nuevas técnicas para la evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa [7],[8],[9],[10],[11],[12].

Los métodos de susceptibilidad y amenaza se dividen en métodos cualitativos (heurístico, análisis geomorfológico) y métodos cuantitativos (estadísticos y determinísticos). Los métodos cualitativos están soportados en el criterio y evaluación de un experto para definir el grado de susceptibilidad [13],[14],[15]. Aunque estos métodos permiten incorporar en el análisis una gran cantidad de variables complejas, dependen completamente de la experiencia y conocimiento del experto sobre la ocurrencia de movimientos

en masa en la región específica de estudio y los factores de causa, por lo que son considerados con un alto grado de subjetividad [9]. Los métodos cuantitativos utilizan expresiones matemáticas objetivas produciendo factores de seguridad o probabilidades de ocurrencia de movimientos en masa [8],[9]. Entre estos, los métodos determinísticos, o también denominados con base física, utilizan modelos matemáticos geotécnicos, y en algunas ocasiones, acoplados con modelos hidrológicos para estimar el factor de seguridad de cada unidad de análisis [16],[17]. A su vez, los métodos estadísticos establecen relaciones funcionales entre factores de inestabilidad y la distribución pasada y presente de los movimientos en masa. Estas relaciones generalmente corresponden a funciones de densidad de movimientos en masa que pueden ser establecidas para cada factor individual, denominados métodos estadísticos bivariados, o relaciones combinadas entre una variable dependiente (ocurrencia de movimientos en masa) y variables independientes (factores de causa) denominados métodos estadísticos multivariados [9]. Aunque estos métodos han sido de amplia aplicación a escalas regionales, exigen tener un exhaustivo inventario de movimientos en masa. Entre los métodos estadísticos bivariados se destacan Radio de Frecuencia [18], Índice Estadístico [19], Peso de la Evidencia [20],[21], Funciones de Favorabilidad [22]. Entre los métodos multivariados de mayor uso están: Análisis Discriminante [23], Regresión Logística [14], y Análisis Condicional [24],[25].

Adicional a la metodología utilizada para la evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza es necesario definir la unidad de análisis [26], [9],[27]. La unidad de análisis se define como una porción de terreno que contiene un conjunto de condiciones que difieren de la unidad adyacente a lo largo de límites diferenciables [28]. Las más utilizadas por su facilidad bajo sistemas de información geográfica son las mallas de celdas regulares tipo raster [29]; sin embargo existen la Unidad de Terreno [30], Unidad de Laderas [31], Unidad de Condiciones Únicas (UCU) [32] y Unidad Morfo-dinámica Independiente (UMI) [33]

Aunque las diferentes metodologías de evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza son recurrentemente implementadas para proyectos lineales, en la realidad estas no han sido diseñadas para este tipo de proyectos, lo que trae consigo una serie de dificultades durante su implementación, y posteriormente durante la definición de medidas de mitigación. La principal diferencia y dificultad durante la implementación se

refiere a la escala de trabajo. Los proyectos lineales se caracterizan por tener una escala longitudinal al proyecto, que puede ser considerada de nivel regional (1:100,000 – 1:25,000), mientras que perpendicular al proyecto se requiere una escala detallada generalmente ($\leq 1:10,000$). Esta característica exige, para un adecuado análisis, el uso de diferentes unidades de análisis, y la combinación de diferentes escalas espaciales o niveles de detalle que permitan una gestión adecuada a cada nivel.

Considerando por lo tanto, la grave problemática de los proyectos lineales, en este caso acueductos, y la necesidad de metodologías que consideren las particularidades de este tipo de proyectos, el presente trabajo propone la combinación de métodos heurísticos, estadísticos y con base física para evaluar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa a lo largo de proyectos lineales, bajo diferentes escalas de análisis. Una aproximación regional que permita establecer las condiciones de susceptibilidad del área de estudio, y un análisis de detalle para evaluar las condiciones de amenaza. Para la zonificación regional se propone el método de Análisis Condicional, el cual utiliza como unidad de análisis la UCU, y para el análisis local se utilizan dos métodos con base física: el método SHALSTAB [34] para laderas en suelos, y el índice de TOBIA [35] para laderas en roca, utilizando en ambos como unidad de análisis la malla de celdas regulares. Tanto los resultados del método estadístico como los mapas de laderas inestables en suelo y roca son combinados para construir el mapa de unidades de criticidad, utilizando como unidad de análisis la UMI. Esta integración permite obtener un mapa final para la gestión del riesgo que logre identificar los sectores de mayor criticidad.

El método propuesto es implementado en el trayecto de la tubería del acueducto municipal de Fredonia en el departamento de Antioquia, al noroccidente de los andes colombianos. Para la verificación del desempeño y coherencia del modelo se utilizan las curvas de éxito y el área bajo la curva (AUC).

2 Área de estudio

Para la implementación de la metodología se utilizó la infraestructura lineal del acueducto que surte al área urbana del municipio de Fredonia, a

58 Km de la ciudad de Medellín, en el flanco noroccidental de los Andes Colombianos. La infraestructura lineal consta de la bocatoma sobre la quebrada La Fría, a 1920 m.s.n.m. y coordenadas $5^{\circ}57'36.2''$ N - $75^{\circ}37'52.85''$ W, la planta de tratamiento de agua potable, a 1980 m.s.n.m. y el tanque de almacenamiento, a 1,850 m.s.n.m. y coordenadas $5^{\circ}55'37.74''$ N - $75^{\circ}40'24.64''$ W (ver Figura 1). En total corresponde a un trayecto de 8 km lineales.

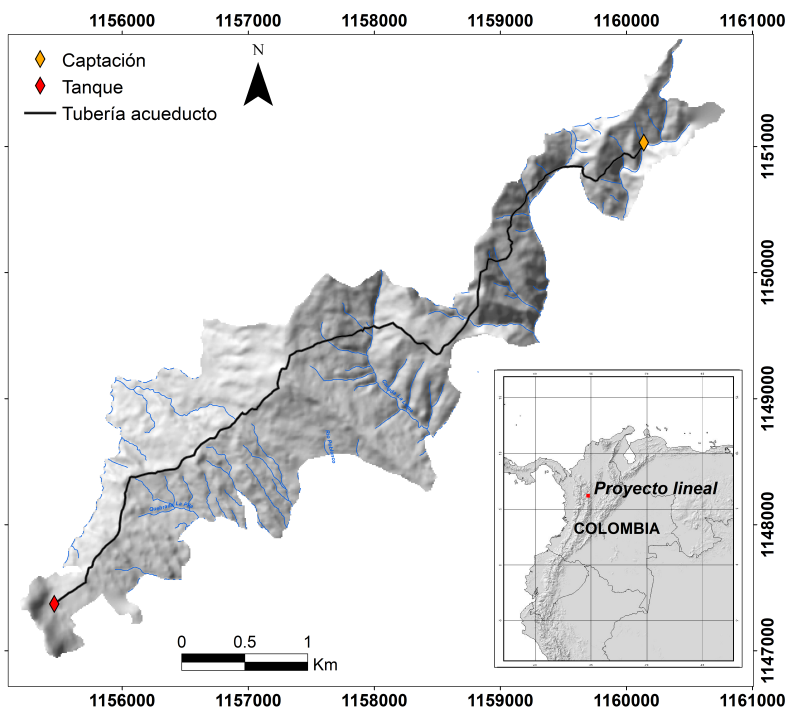


Figura 1: Mapa de localización de la zona de estudio.

El área se ubica en bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) hacia el costado norte, donde se encuentra la cuenca de la quebrada La Fría y bosque húmedo premontano (bh-PM) para el resto del área. Con temperatura media entre 18° y 24°C y lluvia acumulada anual media de 2,700 mm, distribuidas a lo largo del año en un ciclo bimodal con picos en los meses de mayo y octubre [36].

Geomorfológicamente el área corresponde a un relieve montañoso con cerros de topos subredondeados modelado en rocas metamórficas e ígneas de edades entre Paleozoicas y Mesozoicas según Calle y González, [37] y Corantioquia, [38]; que contrastan con relieves ondulados y más suaves en las partes bajas asociados a rocas sedimentarias de las formaciones Amagá y Combia [37],[39],[40],[36].

3 Metodología y datos

La Figura 2 presenta el esquema metodológico desarrollado donde se combinan diferentes análisis para la evaluación y zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa. Las diferentes aproximaciones propuestas en conjunto permiten una mirada a diferentes escalas del proyecto para identificar tramos y laderas críticas que pueden afectar la estabilidad y continuidad de un proyecto lineal. De acuerdo con las ventajas que ofrece cada método los diferentes análisis aportan elementos únicos que enriquecen la evaluación conjunta de las condiciones de estabilidad del proyecto lineal.

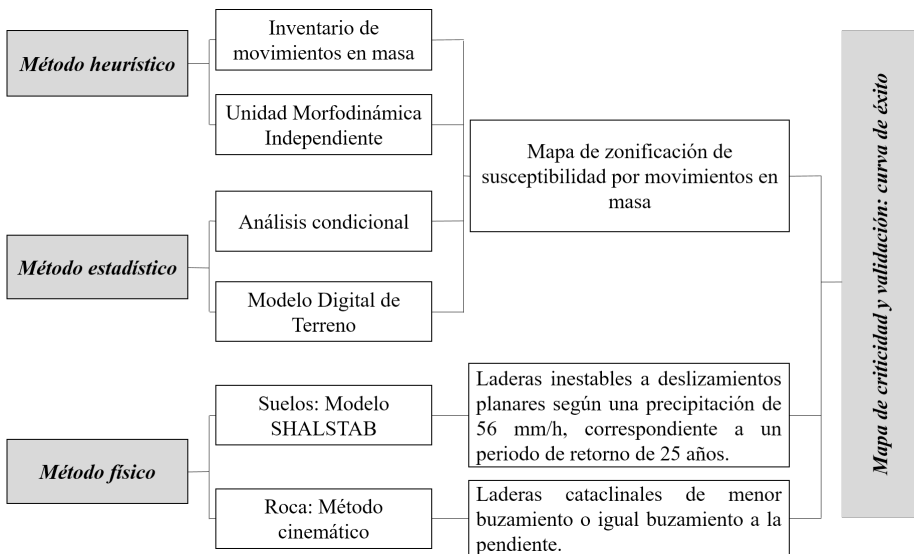


Figura 2: Diagrama explicativo de la metodología utilizada.

3.1 Aproximación heurística

Inicialmente el análisis heurístico es utilizado para generar el inventario de movimientos en masa y para definir las UMI como unidades de análisis regional. Los métodos heurísticos están basados en el conocimiento de las causas de inestabilidad en el área de estudio y depende de qué tanto y qué tan bien el experto conozca los procesos geomorfológicos actuando sobre el terreno [9]. Como ventaja del análisis heurístico se destaca que permiten una rápida evaluación de las condiciones de estabilidad de un área dada considerando una gran cantidad de factores [8], característica fundamental para elaborar el inventario de movimientos en masa y la definición de las UMI.

3.2 Inventario de movimientos en masa

El primer análisis heurístico corresponde a la elaboración del inventario de movimientos en masa. Los inventarios de movimientos en masa son considerados el primer acercamiento a los mapas de susceptibilidad y amenaza, ya que establecen la distribución espacial de los movimientos en masa que han ocurrido en el pasado, y en muchos casos a partir de las características morfológicas puede establecerse las causas de su ocurrencia. El inventario de movimientos en masa además de permitir implementar análisis estadísticos para evaluar y zonificar la probabilidad espacial de la ocurrencia de movimientos en masa, conocido como susceptibilidad, permite además validar cuantitativamente el desempeño y robustez del modelo [41],[42].

Diferentes métodos existen para elaborar el inventario de movimientos en masa. Desde el levantamiento de campo, hasta métodos más sofisticados como análisis de archivos históricos [43], interpretación de fotografías aéreas [44], análisis visual o procesamiento de imágenes LIDAR [45], procesamiento de imágenes de satélite [46]. Múltiples elementos introducen un grado de incertidumbre a los inventarios de movimientos en masa, entre ellos la vegetación, la intervención antrópica y los procesos de denudación de la superficie terrestre [47]. Superar estas incertidumbres depende en gran medida de la habilidad y experiencia del experto.

Para el presente estudio se utilizó un análisis heurístico a través de la interpretación de fotografías aéreas de los años 1991, 2003, 2010 y 2012;

y escala 1:10 000 del IGAC, complementada con levantamiento de campo detallada. Para cada movimiento en masa fue diferenciada la corona y el cuerpo de movimientos en masa. Esta aproximación heurística permite, de acuerdo con la experiencia del experto, identificar movimientos latentes o relictos de acuerdo con criterios morfológicos a partir de las fotografías aéreas o múltiples criterios morfométricos y ambientales en campo, tales como rugosidad del terreno, cambio de pendientes, usos del suelo, tipo de cobertura, entre otros. La combinación de todos estos factores puede ser solo realizada a través del análisis heurístico.

3.3 Unidades morfodinámicas independientes

Las Unidades Morfodinámicas Independientes (UMI) son definidas como la unidad del territorio que enmarca la ladera de interés y que presenta un comportamiento independiente de las unidades adyacentes [33]. Se considera que cualquier proceso morfodinámico que se presente en el exterior no afecta su interior e igualmente, cualquier proceso morfodinámico que se presente en el interior no afecta las unidades adyacentes [48]. Dicha unidad es delimitada por divisorias de agua, drenajes o expresiones geomorfológicas, combinadas con un análisis heurístico de la morfodinámica del paisaje. Para el presente trabajo las UMI se definieron a través de fotografías aéreas en escala 1:10 000 y trabajo de campo con un total de 30 UMI.

3.4 Análisis estadístico

El Método Matricial o Análisis Condicional es considerado como una técnica conceptualmente simple altamente compatible con SIG y con resultados que pueden ser fácilmente utilizados por no especialistas, y aplicado a subdivisiones del terreno denominadas Unidades de Condiciones Únicas (UCU) [25],[49]. El método considera los factores seleccionados por el especialista que condicionan la ocurrencia de movimientos en masa en el área de estudio. Cada factor es subdividido en clases categóricas, y luego son cruzados todos los factores con el fin de obtener todas las posibles combinaciones de todas las clases de los diferentes factores. Cada combinación específica representa una UCU. Posteriormente la frecuencia espacial y densidad

de movimientos en masa para cada UCU es determinada. La probabilidad espacial de la ocurrencia de un movimiento en masa (L) dada una combinación de factores únicos (UCU) está dada por la densidad de los movimientos en masa en la UCU. [25] (ver ecuación (1)).

$$P \frac{L}{UCU} = \frac{\text{Área de los movimientos en masa}}{\text{Área de la UCU}} \quad (1)$$

Una gran cantidad de factores geológicos, hidrológicos y geomorfológicos son comúnmente utilizados como condicionantes para la predicción de futuros movimientos en masa, sin embargo la selección de los factores utilizados depende del tipo de movimiento en masa, del tipo de terreno y de la información disponible, por lo que un buen entendimiento de los mecanismos de falla es fundamental [50].

Considerando las características de los movimientos en masa, flujos (1%) y deslizamientos (99%), y la topografía montañosa y tropical de la zona de estudio, se seleccionaron como factores condicionantes la geología, usos del suelo, pendientes, curvatura, aspecto y flujo acumulado (ver Tabla 1). En la Tabla 2 se presenta la relación de frecuencia entre cada uno de los factores seleccionados y la ocurrencia o no ocurrencia de movimientos en masa.

Tabla 1: Relación entre los factores condicionantes de movimientos en masa y las metodologías para la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa.

Factores condicionantes		Método heurístico	Evaluación de la matriz	Modelo SHALSTAB	Método cinemático
Inventario de movimientos en masa		X	X		
Unidades morfoodinámicas independientes		X			
Geología	Formaciones superficiales		X		
	Datos estructurales				X
	Datos geotécnicos			X	X
Morfometría	Curvatura		X		
	Pendiente		X		X
	Aspecto				X
	Flujo acumulado			X	
Usos del suelo			X		
Análisis de lluvias				X	

Tabla 2: Relaciones de los diferentes factores condicionantes de movimientos en masa con la cuenca y el inventario de movimientos en masa, señalando las clases que contienen un mayor porcentaje de movimientos en masa.

	Definición de las variables	Área en la Cuenca (%)	Deslizamientos (%)
Formaciones superficiales	Grupo Cajamarca, I/II	1.45 %	1.58 %
	Grupo Grupo Cajamarca, IV/V	18.81 %	8.13 %
	Formación Quebradagrande miembro volcánico, II	5.08 %	2.01 %
	Formación Quebradagrande miembro volcánico, II/III	2.32 %	6.02 %
	Formación Quebradagrande miembro volcánico, IV	8.29 %	10.24 %
	Formación Quebradagrande miembro volcánico, IV/V	4.02 %	10.67 %
	Formación Quebradagrande miembro volcánico, VI	11.83 %	10.67 %
	Formación Amagá miembro inferior, II/III	11.39 %	5.70 %
	Formación Amagá miembro inferior, VI	16.53 %	21.01 %
	Formación Amagá miembro superior, II/III	6.89 %	6.44 %
	Formación Amagá miembro superior, VI	10.60 %	11.62 %
	Formación Combia, IV/V	0.12 %	0.84 %
	Depósitos de vertientes, VI	2.65 %	5.07 %
	Curvatura	Cóncava - Convexa	4.44 %
Cóncava - Plana		8.48 %	9.19 %
Cóncava - Cóncava		16.37 %	17.00 %
Plana - Convexa		8.45 %	9.82 %
Plana - Plana		14.96 %	9.61 %
Plana - Cóncava		11.78 %	11.51 %
Convexa - Convexa		15.43 %	15.31 %
Convexa - Plana		12.11 %	13.20 %
Convexa - Cóncava		7.98 %	6.76 %

(Continúa)

Tabla 2: Relaciones de los diferentes factores condicionantes de movimientos en masa con la cuenca y el inventario de movimientos en masa, señalando las clases que contienen un mayor porcentaje de movimientos en masa.

Definición de las variables		Área en la Cuenca (%)	Deslizamientos (%)
Pendientes (%)	Plano/Inclinación suave (0-13)	5.00 %	6.65 %
	Moderadamente escarpado (14-20)	8.55 %	8.45 %
	Escarpado (21-55)	54.05 %	44.98 %
	Muy escarpado (56-140)	32.32 %	39.70 %
	Extremadamente escarpado (>140)	0.07 %	0.21 %
Usos del suelo	Bosques naturales	15.76 %	20.06 %
	Cultivos	20.75 %	18.90 %
	Pastos	47.39 %	37.70 %
	Vegetación herbácea y/o arbustiva	12.56 %	15.84 %
	Zonas urbanizadas	3.54 %	7.50 %
Aspecto	Norte	5.21 %	7.39 %
	Noreste	11.30 %	10.03 %
	Este	17.75 %	20.38 %
	Sureste	14.79 %	12.78 %
	Sur	19.01 %	14.99 %
	Suroeste	15.93 %	16.58 %
	Oeste	10.61 %	9.93 %
	Noroeste	5.40 %	7.92 %

Para el factor geología se definieron cinco (5) formaciones en superficie compuestas por esquistos y filitas foliadas y fracturadas (Pbsd); basaltos verdes con venas de cuarzo (Kvc); areniscas conglomeráticas y limolitas (Toi); areniscas claras, lodolitas abigarradas y limolitas claras (Tos) [51]; conglomerados y areniscas tobaceas (Tmc); y clastos angulosos en una matriz arenosa no consolidada (Dv) [37],[39],[40],[36]. Considerando la importancia del grado de meteorización se diferenció cada formación de acuerdo con el grado de meteorización según Little [52]. (ver Figura 3A).

El mapa de usos del suelo se construyó utilizando la herramienta Google Earth y verificación de campo estableciendo las siguientes clases: bosques naturales, cultivos, pastos, vegetación herbácea y/o arbustiva y zonas urbanizadas. (ver Figura 3B)

Para los factores morfométricos se utilizó un modelo digital del terreno con resolución espacial de 10 m y el programa ArcGIS 10.2 de ESRI. El mapa de pendientes se reclasificó según la propuesta de Zuidam, [53] en cinco (5) clases por porcentaje de pendientes entre plano o inclinación suave a extremadamente escarpado (ver Figura 3C). La curvatura se representó combinando el mapa de curvatura vertical (curvatura de perfil) y lateral (curvatura del plano) [54] obteniéndose 9 clases de terrenos (ver Figura 3D). El mapa de aspectos, dividido en 8 clases (ver Figura 3E), señala la orientación horizontal de la ladera, por lo que puede señalar relaciones existentes entre la ocurrencia de los movimientos en masa y la exposición a la luz solar, el viento, la precipitación (el grado de saturación) o la relación de la ladera con las discontinuidades heredadas del suelo o la roca [55],[56]. Finalmente y considerando las condiciones de lluvia en la región se utilizó el mapa del área de flujo acumulado reclasificado en 5 clases categóricas (ver Figura 3F).

Para el análisis de frecuencia y densidad de movimientos en masa para cada UCU se utilizó solo la cicatriz del movimiento en masa, debido a que los cuerpos o polígonos de los depósitos pueden no ser representativos de las condiciones previas a la ocurrencia del movimiento en masa y por lo tanto no permitiría establecer relaciones adecuadas entre la ocurrencia de movimientos en masa y los factores condicionantes seleccionados [57],[58].

Metodología para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos lineales. Estudio de caso en el acueducto del municipio de Fredonia, Antioquia

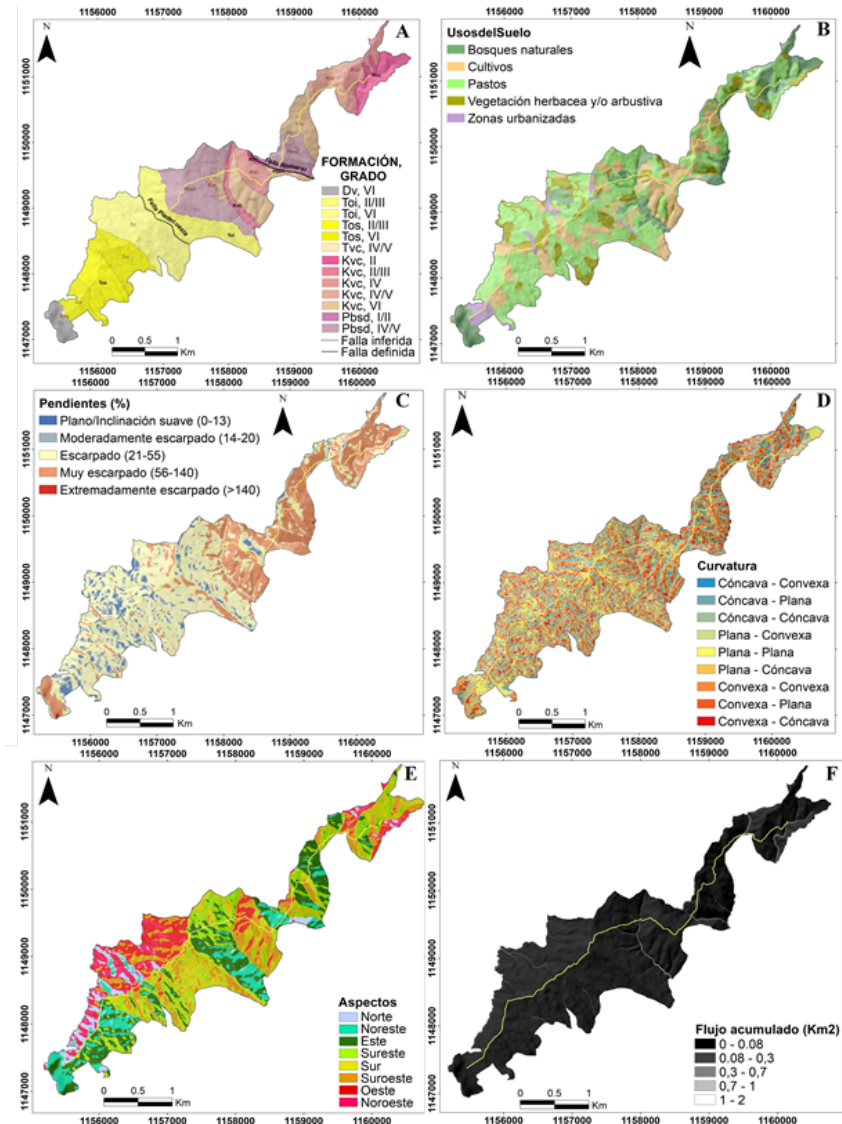


Figura 3: A. Geología de la zona mostrando el grado de meteorización de la roca al igual que la formación. B. Usos del suelo. C. Pendientes. D. Curvatura generalizada. E. Aspectos. F. Flujo acumulado. (En todos los mapas se muestra la tubería resaltada como referencia.)

3.5 Análisis con base física

Para la escala más detallada se implementaron modelos con base física considerando la naturaleza en suelo o roca de las laderas.

Para laderas en suelo se implementó el modelo físico SHALSTAB desarrollado por Montgomery y Dietrich, [34] y utilizado en cuencas de montaña y ambientes tropicales con éxito [59]. Este modelo considera el control topográfico sobre el flujo subsuperficial causante de los movimientos en masa superficiales detonados por lluvias. SHALSTAB utiliza el modelo hidrológico denominado TOPOG y desarrollado por O'Loughlin, [60], el cual utiliza un régimen de lluvias estacionaria para construir el patrón espacial de la humedad en el suelo basado en el área acumulada, transmisividad del suelo en condiciones saturadas y la pendiente. El componente geotécnico del modelo SHALSTAB está basado en el criterio de falla de Mohr-Coulomb y método de talud infinito, el cual se ajusta muy bien a la física de los movimientos en masa detonados por lluvias. Como resultado el modelo identifica inicialmente las celdas incondicionalmente estables e incondicionalmente inestables, en las cuales su estabilidad es independiente de las condiciones de lluvia. Y para la lluvia analizada el modelo señala las celdas inestables y que fallarían ante dicho evento de lluvia y las celdas que permanecen estables.

Ante la ausencia de ensayos de laboratorio que permitan caracterizar geomecánicamente los suelos, se obtuvieron los parámetros de cohesión, fricción y peso unitario de bases de datos con parámetros de suelos típicos en ambientes similares a la zona de estudio [61],[62],[63],[64],[65]. Aunque se evaluaron diferentes escenarios de lluvias finalmente se seleccionó un valor de lluvia con un periodo de retorno de 25 años, y que equivale a 56 mm/h [65].

Para laderas en roca se utilizó el método del Índice de TOBIA (Topographic Bedding plane Intersection Angle) propuesto por Meentemeyer y Moody [35]. El índice de TOBIA es función de la pendiente y aspecto de la ladera, y de la dirección y ángulo de buzamiento de las estructuras o discontinuidades de la roca (ver ecuación (2)).

$$T = |\cos(\beta) \times \cos(\alpha) + \sin(\beta) \times \sin(\alpha) \times \cos(\delta - \theta)| \quad (2)$$

Donde β es el buzamiento de las estructuras o discontinuidades analizadas

$[0-90^\circ]$, δ es la dirección del buzamiento, α es la pendiente de la ladera $[0-90^\circ]$ y θ el aspecto $[0-360^\circ]$.

Con el Índice de TOBIA se pueden clasificar las laderas en cataclinales, donde el aspecto de la ladera y dirección de buzamiento son paralelas, ortoclinales donde forma un ángulo cercano a 90° y anaclinales donde forma un ángulo de 180° , es decir en sentido contrario. Las laderas cataclinales, las cuales corresponden a aquellas donde la relación entre la orientación de la ladera y el rumbo de las estructuras favorece la ocurrencia de deslizamientos planares, pueden ser subdivididas en laderas cataclinales de mayor buzamiento con respecto a la pendiente de la ladera, de igual buzamiento o de buzamiento menor a la pendiente de la ladera. Estas últimas, de igual y menor buzamiento, son las más susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos planares en roca, ya que el plano paralelo o la intersección de las estructuras o discontinuidades con la ladera generan superficies de fallas potenciales.

Para la implementación del índice de TOBIA se clasificó toda la zona de estudio en dominios morfoestructurales, los cuales corresponde a unidades litológicas de laderas en roca con familias de estructuras o discontinuidades iguales. Se definieron en total 4 dominios estructurales que corresponden a las estructuras de la Tabla 3.

Tabla 3: Dominios estructurales definidos según las estructuras determinadas en campo en cada una de las formaciones.

Estructuras		Datos estructurales	Formación superficial
		59/197	Kvc,II
1	Familia de diaclasas 1	30/200	Kvc,II/III y IV
		22/193	Toi,II/III y Tos,II/III
2	Familia de diaclasas 2	81/94	Kvc, II
		45/180	Toi II/III y Tos II/III
3	Familia de diaclasas 3	47/116	Kvc, II
		36/164	Kvc, II/III y IV
	Plano de falla,	80/220	Kvc, II y Pbsd, I/II
4	estratificación y foliación	13/70	Pbsd, IV/V
		39/55	Toi II/III
		10/242	Tos II/III

4 Resultados

Bajo el análisis heurístico se identificaron 96 movimientos en masa, que corresponde al 1.6 % de la cuenca y una densidad de 0.02 MenM/km². En la zona predominan los movimientos en masa tipo deslizamientos con el 99 % del total, seguido por los flujos con el 1 %. Con respecto a la actividad de los movimientos en masa cartografiados el 39.6 % corresponde a movimientos activos (Figura 4).

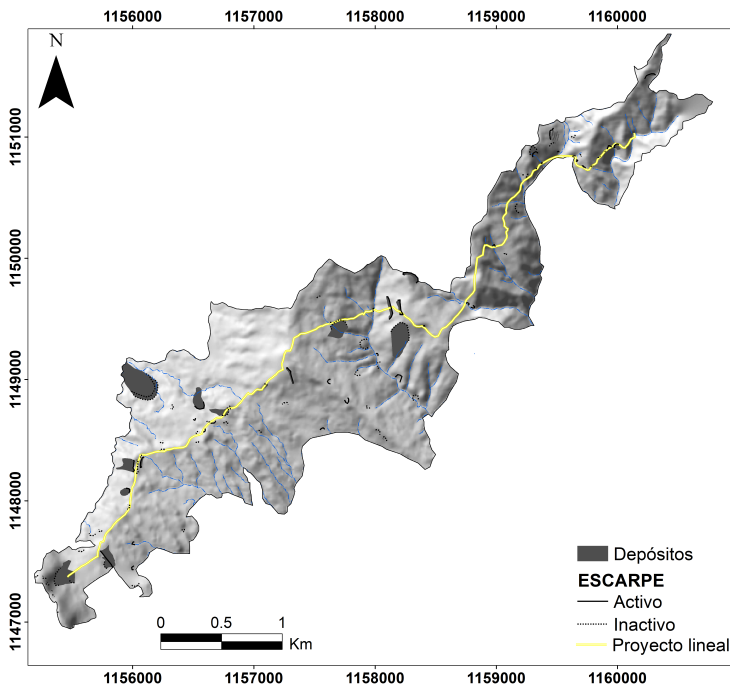


Figura 4: Inventario de movimientos en masa observados en fotografías aéreas, imágenes satelitales o ubicados en el SIMMA y comprobados en campo.

El análisis de las variables condicionantes seleccionadas señala que el 21 % de los movimientos en masa se presentan en la clase Formación Amagá miembro inferior en grado VI de formaciones superficiales y el 38 % en la clase Pastos de usos del suelo. En términos de pendientes el rango entre 21 y 55 % presenta el mayor número de eventos con el 45 % y aspecto Este con

el 20%. En términos de curvatura el 17% de los movimientos en masa se presenta en laderas Cóncava-Cóncava, seguido por Convexa-Convexa con el 15%.

La Figura 5 presenta el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa utilizando el método Análisis Condicional. El cruce de las variables condicionantes seleccionadas arrojó un total de 464 UCU. La UCU con mayor densidad corresponde a la combinación: Formación Combia - Zonas urbanizadas - Escarpado - Cóncava-Cóncava, con una densidad de 1.25 MenM/km² que corresponde al 62.5%.

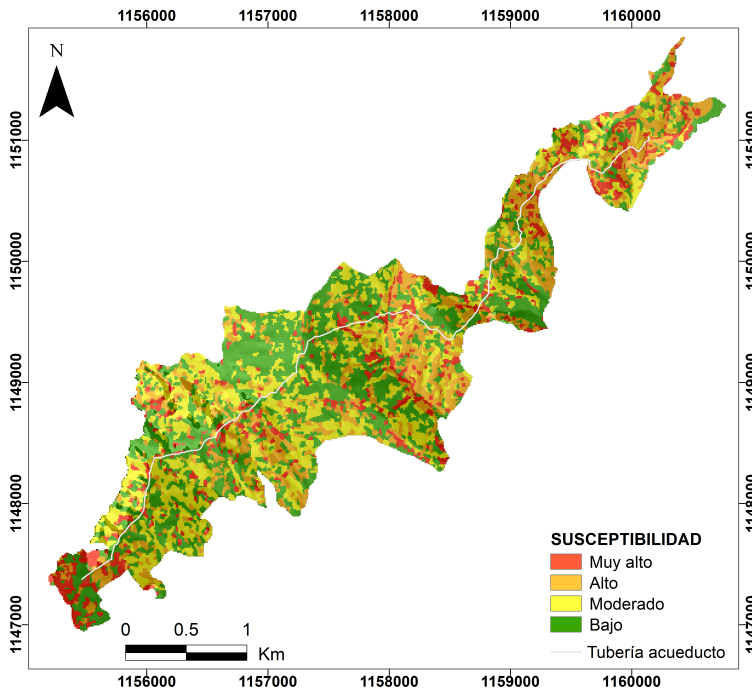


Figura 5: Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa utilizando el método de análisis condicional.

De acuerdo con los resultados del análisis estadístico para la susceptibilidad, el área de estudio presenta un 12.5% de la cuenca con el 50% de ocurrencia de movimientos en masa (Figura 6).

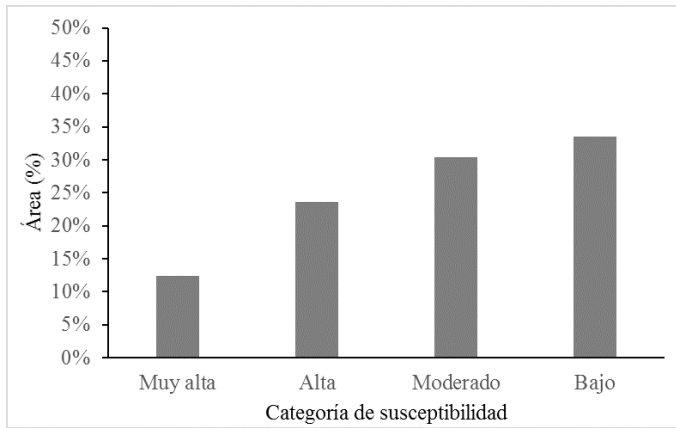


Figura 6: Estadística de la abundancia relativa de las categorías de susceptibilidad del análisis condicional.

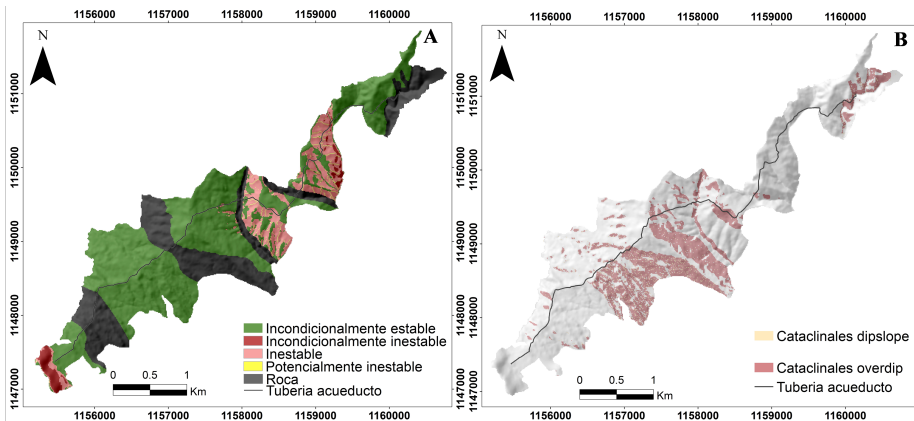


Figura 7: A. Definición de la susceptibilidad por el modelo físico SHALSTAB para un periodo de retorno de 25 años (56 mm/h). B. Dominios morfoestructurales definidos como cataclinales dipslope y overdip resaltados.

La Figura 7 presenta los resultados de la implementación de los métodos con base física, SHALSTAB e índice de TOBIA. Los resultados señalan que el 11 % de las laderas en suelo corresponden a zonas inestables ante un

evento de lluvia con intensidad de 56 mm/h. El 1% corresponde a celdas potencialmente inestables, pero que no fallan con esta intensidad de lluvia. El 2% corresponde a celdas condicionalmente inestables y el 59% a celdas incondicionalmente estables.

La clasificación de laderas mediante el índice de TOBIA presenta un 32% de área con laderas cataclinales de menor buzamiento a la ladera y un 2.45% con laderas de igual buzamiento a la pendiente de la ladera.

Para la identificación de los sectores críticos se elaboró un mapa combinando los resultados del método estadístico con los resultados de los métodos con base física utilizando como unidad de análisis la UMI. La Figura 8 presenta el mapa de sectores críticos como resultado de la combinación del mapa por método estadísticos y métodos con base física. Donde el 19% del área presenta una criticidad muy alta (9 UMI), el 23% una criticidad alta (9 UMI), el 52% una criticidad moderada (9 UMI) y el 6% una criticidad baja con 3 UMI.

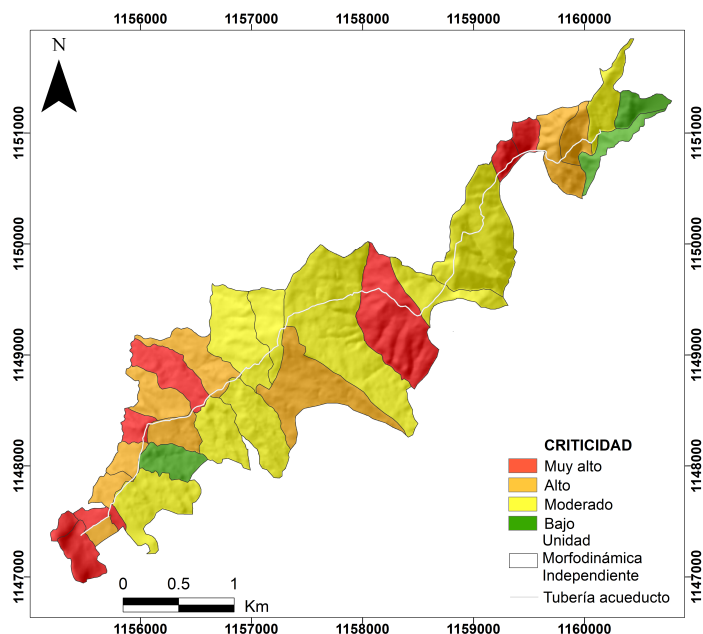


Figura 8: Mapa final de criticidad que combina las metodologías mostrando las UMI y la susceptibilidad determinada.

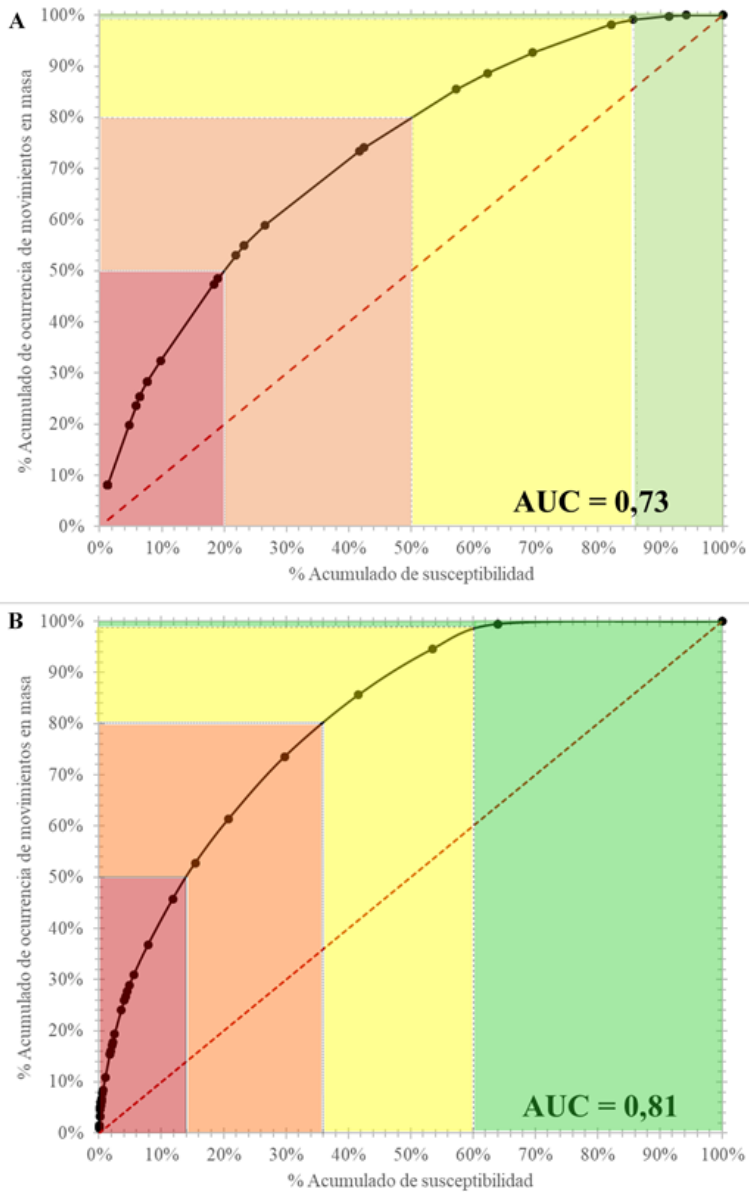


Figura 9: A. Gráfica de validación para la zonificación de la susceptibilidad del análisis condicional, mostrando desde susceptibilidad muy alta (rojo) hasta susceptibilidad baja (verde). B. Gráfica de validación de la zonificación de la criticidad del mapa final.

La Figura 9 muestra la Curva de Éxito y el Área Bajo la Curva (AUC) para el mapa de zonificación de la susceptibilidad por el Análisis Condicional y para el Mapa de Criticidad. Para el caso del análisis condicional el AUC arrojó un valor de 0.81, señalando un muy buen ajuste y desempeño de modelo a los datos del inventario de movimientos en masa utilizado. De acuerdo con la propuesta de Guzzetti *et al.*, [66] la Curva de Éxito fue además utilizada para establecer los rangos de susceptibilidad con criterio cuantitativo en términos de probabilidad espacial de ocurrencia. El rango definido como susceptibilidad muy alta corresponde al área donde se ha presentado el 50 % de los movimientos en masa de acuerdo con el inventario de eventos.

Para el mapa de criticidad el AUC arrojó un valor de 0.73, donde el 80 % de los movimientos en masa inventariados se encuentran en el 42 % del área de la cuenca, por lo cual se clasificó este rango como de muy alta y alta criticidad. De criticidad moderada se definió el 9 % de la cuenca, el cual presenta un 19 % de movimientos en masa; y el resto de la zona, donde se ubica el 1 % de movimientos en masa se clasificó como de criticidad baja.

5 Discusión

La metodología propuesta permite una mirada a diferentes escalas de forma independiente, estableciendo por medio de esta las zonas de susceptibilidad y amenaza; pero también da la posibilidad de definir las áreas de condiciones críticas para el proyecto. Esto se logró utilizando el método estadístico para evaluar las condiciones de susceptibilidad a escala regional y evaluando la amenaza a escala local a través de métodos con base física.

La susceptibilidad es la probabilidad espacial de ocurrencia dado una combinación de variables condicionantes sin considerar el factor detonante dentro del análisis [66],[67]. Por otra parte, la amenaza establece no solo la probabilidad espacial, sino también la probabilidad temporal, por lo cual debe considerar dentro de su análisis el factor detonante [1]. La susceptibilidad debe ser el primer acercamiento hacia la evaluación de la amenaza, ya que explica la distribución espacial de los movimientos en masa [68]. Y la amenaza corresponde a un acercamiento posterior a una mayor escala para conocer la frecuencia y magnitud de la ocurrencia de movimientos

en masa [69]. En general los mapas de zonificación, tanto amenaza como susceptibilidad se han utilizado normalmente como sinónimos, lo que es un error y genera que se utilicen de forma inadecuada. Los movimientos en masa deben entenderse como la consecuencia de las condiciones intrínsecas del terreno y los cambios generados por los procesos externos que hacen que se disminuyan las condiciones de equilibrio, hasta que la presencia de un factor detonante inicia el movimiento. [7].

En el caso de estudio el factor detonante utilizado fue la lluvia, sin embargo de acuerdo con la zona de estudio que se elija y sus condiciones, es posible adicionar o seleccionar otro factor detonante, tal como los sismos. El modelo SHALSTAB permite utilizar diferentes escenarios de lluvia como factor detonante; en este caso se seleccionó el evento con periodo de retorno de 25 años como una ventana de largo plazo para un proyecto lineal. Es recomendable la evaluación a largo plazo, ya que permite tomar medidas o delimitar las acciones a realizar de manera preventiva lo que reduce las condiciones de riesgo futuras.

El análisis estadístico permite establecer relaciones de causa y efecto a nivel regional entre las variables condicionantes seleccionadas y la ocurrencia de movimientos en masa, permitiendo identificar cuáles son aquellas condiciones naturales del terreno que favorecen la ocurrencia de movimientos en masa, con el fin de ser evitadas o mitigadas. En el caso de los métodos físicos, estos permiten identificar las laderas en suelo o roca, de menor competencia de acuerdo con sus propiedades geomecánicas o características estructurales. Es importante destacar la diferencia de los métodos en cuanto al uso del inventario de movimientos en masa. Mientras el método estadístico construye su modelo basado en el inventario, los métodos físicos no utilizan para su desarrollo dicho inventario.

Para el análisis estadístico se utilizó el método Análisis Condicional y en los métodos físicos para laderas en suelo se utilizó el modelo SHALSTAB y para laderas en roca el Índice de TOBIA, sin embargo dichos modelos pueden ser diferentes a los propuestos de acuerdo con las condiciones del área de estudio e información disponible. Existe una gran variedad de métodos estadísticos bivariados y multivariados que han sido implementados en diferentes ambientes con excelentes resultados [19],[70].

Con respecto a la unidad de análisis, se seleccionó la metodología del

Análisis Condicional ya que permite utilizar una unidad diferente a la malla de grillas regulares utilizadas ampliamente en los métodos estadísticos. Al utilizar distintas unidades de análisis, es posible observar de una manera independiente la susceptibilidad y amenaza, lo que se puede confirmar con los resultados obtenidos. Para el caso de estudio, el sector nororiental de la zona de estudio presenta el mayor número de celdas susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa basado en la recurrencia de los eventos inventariados. A su vez, este sector presenta el mayor número de laderas en suelo inestables, y hacia la parte central un número importante de laderas en roca cataclinales de bajo buzamiento, lo que señala un efecto para toda la cuenca entre movimientos en masa detonados por lluvias y movimientos controlados por las estructuras de las rocas. La unión y el uso de los dos modelos dan un mayor entendimiento de la causa de los movimientos en masa en la zona de estudio, y por lo tanto permite valorar para cada sector específico los elementos determinantes en la ocurrencia de los movimientos en masa. Un 6 % del área de la cuenca pertenece tanto a zonas inestables por el método SHALSTAB como a zonas de muy alta y alta susceptibilidad por el método estadístico; y un 13 % de zonas con presencia de estructuras geológicas corresponden tanto a cataclinales de menor buzamiento a la ladera y de igual buzamiento a la pendiente de acuerdo con el Índice de TOBIA, como zonas de muy alta y alta susceptibilidad de acuerdo con el método estadístico.

Adicionalmente se consideró importante en el desarrollo metodológico la incorporación de un análisis que combinara los resultados a escala regional y local, utilizando como unidad de análisis una región diferente a las unidades de análisis utilizadas en ambas escalas, y que respondiera a una división del terreno con significado físico. Las unidades de celdas regulares no responden a una división natural del terreno, sino a la conveniencia en la aplicación matemática de los métodos bajo sistemas de información geográfica; en este sentido la UMI responde adecuadamente a estas necesidades, ya que define un área con condiciones de estabilidad similares para toda la región, y que cualquier cambio dentro de dicha región podría modificar las condiciones de estabilidad global. Desde la gestión de riesgo, la identificación de una unidad con unas condiciones de estabilidad homogénea es importante, ya que permite definir las regiones en el espacio donde se deben desarrollar e implementar unas medidas de mitigación, o de otra manera delimitar las

regiones en las que cualquier modificación puede generar un proceso en un área mayor.

El mapa de criticidad obtenido identifica cinco sectores críticos de la tubería. El sector nororiental entre los 1 y 1,3 km del punto de captación, el sector 2 aproximadamente hacia el centro del proyecto a 3 km del punto de captación, el sector 3 al suroccidente a 2 km del tanque de almacenamiento, el sector 4 a 1.2 km del tanque de almacenamiento y el sector 5 en el área que incluye el tanque de almacenamiento y donde se encuentra una parte de la cabecera municipal. En el sector 1 y 5 las condiciones críticas están dadas por las laderas de suelo inestables que dominan el sector y las zonas de susceptibilidad entre muy alta y alta que se pueden observar en el mapa. En el sector 2 por las laderas cataclinales de menor e igual buzamiento a la ladera que se observan hacia la zona alta y baja de la unidad, junto con laderas de suelo inestables y zonas con susceptibilidad muy alta y alta; y en el sector 3 y 4 por las laderas cataclinales de menor e igual buzamiento a la ladera y las zonas de susceptibilidad muy alta, alta y moderada.

El desarrollo metodológico propuesto incorpora dentro de su análisis la validación del método estadístico y el mapa de criticidad. El presente estudio utiliza la curva de éxito porque permite no solo la evaluación del desempeño del modelo en un solo valor estimado por el área bajo la curva, sino además definir con un criterio cuantitativo los niveles de susceptibilidad y criticidad en términos de probabilidad espacial. Para la evaluación y generación de los mapas de susceptibilidad o amenaza, es necesario siempre definir los rangos o intervalos de la escala en los cuales será dividido el mapa. Esos rangos son definidos generalmente con criterios subjetivos o estadísticos dados directamente por las herramientas de información geográfica utilizada, tales como intervalos de confianza o métodos de vecindad. La curva de éxito permite definir dichos rangos o intervalos de acuerdo con los resultados obtenidos, siendo a su vez la curva independiente de los rangos seleccionados.

Finalmente el AUC, cuyo valor debe estar entre 0.5 y 1 siendo 1 el máximo valor de predicción posible [70], indica un muy buen ajuste del modelo al inventario de movimientos en masa. Con un mejor ajuste para el mapa de susceptibilidad por el método estadístico.

6 Conclusiones

Este trabajo presenta un modelo metodológico para la evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza de acuerdo con las características propias de los proyectos lineales. En el trabajo se propone combinar diferentes análisis disponibles en la literatura con criterios independientes en términos de la escala, y uso del inventario de movimientos en masa y la unidad de análisis, lo que permite comparar sus resultados y coherencia en la distribución de la ocurrencia de movimientos en masa. La propuesta metodológica complementa además los resultados obtenidos con un nuevo mapa de criticidad, que combina los resultados de ambos métodos, y que permite definir sectores de especial cuidado y atención a escala del proyecto.

La metodología propuesta es implementada en la tubería del acueducto del municipio de Fredonia (Antioquia), sin embargo se considera que puede ser utilizada en otros tipos de proyectos lineales, siendo muy útil si se decide realizar en una etapa previa a la construcción del proyecto. Como resultados se obtuvo que la Formación Amagá y la cobertura tipo Pastos presentan una alta susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa. En términos de UCU la combinación Formación Combia-Zonas urbanizadas-Escarpado-Cóncava-Cóncava presenta la mayor densidad de movimientos en masa ($1.25 \text{ MenM}/\text{km}^2$). En términos de criticidad el 42 % del total del área presenta condiciones críticas muy latas y altas. La validación de los mapas de zonificación obtenidos arrojó valores adecuados en términos de desempeño y capacidad de predicción con valores del AUC por encima del 0.73. Los resultados de la implementación del modelo señalan un adecuado desempeño, con información valiosa y necesaria tanto al momento de la operación del proyecto, como en casos de toma de decisiones para construcción de nuevos tramos de la tubería o cambio en el recorrido.

Por último, debido a la importancia de una buena prestación en el servicio de acueducto para toda la población, el derecho a este recurso y la capacidad de este análisis para evitar o reducir pérdidas para las empresas, se debe seguir avanzando en propuestas metodológicas aplicadas a proyectos lineales, que permita disminuir las condiciones de riesgo y las pérdidas humanas y económicas asociadas a movimientos en masa.

Agradecimientos

A la empresa Operadores de Servicios S.A. E.S.P, trabajadores y la Universidad EAFIT y la Universidad Nacional de Colombia.

Referencias

- [1] D. J. Varnes and International Association of Engineering Geology. Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes., *Landslide hazard zonation : a review of principles and practice*. Unesco, 1984, no. 3. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=281932> 174, 194
- [2] A. K. Turner and R. L. Schuster, *Landslides : investigation and mitigation*. National Academy Press, 1996, no. 247. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=462499> 175
- [3] D. Petley, “Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding.” *Landslides and engineered slopes*, vol. 1, pp. 3 – 13, 2012. 175
- [4] Comision Economica para America Latina y el Caribe, “Valoracion de daños y perdidas: Ola Invernal en Colombia 2010- 2011,” Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/37958> 175
- [5] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, “Lineamientos de política de gestión del riesgo de desastres en la prestación de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.” p. 74, 2014. 175
- [6] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio and Unidad de Gestión de Riesgos y Desastres, “Lineamientos de Política de Gestión del Riesgo de Desastres en la prestación de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo,” Bogotá, 2014. [Online]. Available: <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20088><http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/Gestiondelriesgo/Lineamientosdepoliticadegestiondelriesgodedesastres.pdf> 175
- [7] R. Soeters and C. J. Van Westen, “Slope instability recognition, analysis, and zonation,” in *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report, 1996, vol. 247, ch. 8, pp. 129–177. 175, 195
- [8] P. Aleotti and R. Chowdhury, “Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 58, no. 1, pp. 21–44, 1999. 175, 176, 180

- [9] F. Guzzetti, A. Carrara, M. Cardinali, and P. Reichenbach, "Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy," *Geomorphology*, vol. 31, no. 1-4, pp. 181–216, dec 1999. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X99000781> 175, 176, 180
- [10] J. Chacón, C. Irigaray, T. Fernández, and R. El Hamdouni, "Engineering geology maps: landslides and geographical information systems," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 65, no. 4, pp. 341–411, nov 2006. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s10064-006-0064-z> 175
- [11] R. Fell, J. Corominas, C. Bonnard, L. Cascini, E. Leroi, and W. Z. Savage, "Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning," *Engineering Geology*, vol. 102, no. 3-4, pp. 85–98, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022> 175
- [12] F. Dai, C. Lee, and Y. Ngai, "Landslide risk assessment and management: an overview," *Engineering Geology*, vol. 64, no. 1, pp. 65–87, apr 2002. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379520100093X> 175
- [13] J. Barredo, A. Benavides, J. Hervás, and C. J. van Westen, "Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 2, no. 1, pp. 9–23, jan 2000. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243400850229> 175
- [14] L. Ayalew and H. Yagamishi, "The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan," *Geomorphology*, vol. 65, no. 1-2, pp. 15–31, feb 2005. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X04001631> 175, 176
- [15] A. Carrara, "Uncertainty in Evaluating Landslide Hazard and Risk." Springer, Dordrecht, 1993, pp. 101–109. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/978-94-015-8190-5_12 175
- [16] T. W. van Asch, J.-P. Malet, L. P. van Beek, and D. Amitrano, "Techniques, issues and advances in numerical modelling of landslide hazard," *Bulletin de la Societe Geologique de France*, vol. 178, no. 2, pp. 65–88, mar 2007. [Online]. Available: <http://bsgf.geoscienceworld.org/lookup/doi/10.2113/gssgfbull.178.2.65> 176

- [17] M. Casadei, W. E. Dietrich, and N. L. Miller, “Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes,” *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 28, no. 9, pp. 925–950, aug 2003. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/esp.470> 176
- [18] C.-J. Chung, “Using likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment,” *Computers & Geosciences*, vol. 32, no. 8, pp. 1052–1068, oct 2006. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098330040600029X> 176
- [19] T. Chen, R. Niu, and X. Jia, “A comparison of information value and logistic regression models in landslide susceptibility mapping by using GIS,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, no. 10, p. 867, may 2016. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-016-5317-y> 176, 195
- [20] C. van Westen, “Application of geographic information systems to landslide hazard zonation,” 1993. [Online]. Available: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:a59d2eca-ab58-41e6-91c9-01e4e090cf81?collection=research> 176
- [21] S. Lee, J. Choi, and K. Min, “Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, no. 11, pp. 2037–2052, jun 2004. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160310001618734> 176
- [22] C. F. Chung and A. Fabbri, “Representation of geoscience data for information integration,” *J Non-Renewable Resour 2*, vol. 2, pp. 122–139, 1993. 176
- [23] R. B. Gorsevski, P.V.; Gessler, P.;Foltz, “Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Discriminant Analysis and GIS,” *4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4); Problems, Prospects and Research Needs*, 2000. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Paul_Gessler/publication/209804015_Spatial_Prediction_of_Landslide_Hazard_Using_Discriminant_Analysis_and_GIS/links/0deec523c91c7bcf80000000.pdf 176
- [24] J. V. de Graff, E. Brabb, and A. King, “Landslide hazard assessment In: Primer on natural hazard management in integrated regional development planning. DRDE, General Secretariat, OAS,” Washington, D.C., Tech. Rep., 1991. 176
- [25] A. Clerici, S. Perego, C. Tellini, and P. Vescovi, “A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method,”

- Geomorphology*, vol. 48, no. 4, pp. 349–364, dec 2002. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X0200079X> 176, 181, 182
- [26] A. Meijerink, “Data acquisition and data capture through terrain mapping unit.” *ITC Journal*, vol. 1, pp. 23–44, 1988. 176
- [27] A. Erener and H. S. B. Düzgün, “Landslide susceptibility assessment: what are the effects of mapping unit and mapping method?” *Environmental Earth Sciences*, vol. 66, no. 3, pp. 859–877, jun 2012. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-011-1297-0> 176
- [28] A. Hansen, “Landslide hazard analysis,” in *Slope Instability*, D. E. Brunsten, D., Prior, Ed., New York, 1984, pp. 523–602. 176
- [29] A. Carrara, “Multivariate models for landslide hazard evaluation,” *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, vol. 15, no. 3, pp. 403–426, jun 1983. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/BF01031290> 176
- [30] A. Hansen, C. A. M. Franks, and P. A. Kirk, “Application of GIS to Hazard Assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong,” in *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Springer, Dordrecht, 1995, pp. 273–298. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/978-94-015-8404-3_14 176
- [31] A. Carrara, M. Cardinali, R. Detti, F. Guzzetti, V. Pasqui, and P. Reichenbach, “GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard,” *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 16, no. 5, pp. 427–445, aug 1991. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/esp.3290160505> 176
- [32] G. F. Bonham-Carter, “Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS,” p. 398, 1994. 176
- [33] A. Chica, *Apuntes de geotecnia: cursos de geotecnia y prácticas geotécnicas.*, Facultad Nacional de Minas, Ed. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 1989. 176, 181
- [34] D. R. Montgomery and W. E. Dietrich, “A physically based model for the topographic control on shallow landsliding,” *Water Resources Research*, vol. 30, no. 4, pp. 1153–1171, apr 1994. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1029/93WR02979> 177, 187
- [35] R. K. Meentemeyer and A. Moody, “Automated mapping of conformity between topographic and geological surfaces,” *Computers and Geosciences*,

- vol. 26, no. 7, pp. 815–829, aug 2000. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009830040000011X> 177, 187
- [36] Operadores de Servicios E.S.P., “Informe de diagnóstico. Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado Urbano del Municipio de Fredonia: Información general del municipio.” Medellín, Colombia, pp. 1–69, 2005. 178, 179, 185
- [37] B. Calle and H. González, “Geología y geoquímica de la plancha 166, Jericó,” vol. Informe N, p. 232, 1980. 179, 185
- [38] C. A. R. d. C. d. A. (CORANTIOQUIA), “Memoria geomorfológica de la plancha 166-Jericó,” in *Mapa geomorfológico, de amenazas y de áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000: informe final*, Medellín, Colombia, 2002. 179
- [39] J. E. Henao Betancur, “Estratigrafía y petrografía de las areniscas de la secuencia quebrada La Naranjala - Municipio de Fredonia miembro inferior de la formación Amagá,” Ph.D. dissertation, Universidad EAFIT, 2012. [Online]. Available: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/735#.WelbA4iQy00> 179, 185
- [40] J. F. Berrío, H. Caballero, M. E. Díaz, and M. V. Vélez, “Relación lluvia-aguas subterráneas con deslizamientos en Fredonia, Antioquia, Colombia.” in *XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Sao Pedro, oct 2004.[Online]. Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4398/> 179, 185
- [41] F. Guzzetti, A. C. Mondini, M. Cardinali, F. Fiorucci, M. Santangelo, and K.-T. Chang, “Landslide inventory maps: New tools for an old problem,” *Earth-Science Reviews*, vol. 112, no. 1-2, pp. 42–66, apr 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825212000128> 180
- [42] C.-J. F. Chung, A. G. Fabbri, and C. J. Van Westen, “Multivariate Regression Analysis for Landslide Hazard Zonation.” Springer, Dordrecht, 1995, pp. 107–133. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/978-94-015-8404-3_7 180
- [43] P. Reichenbach, F. Guzzetti, and M. Cardinali, “Map of sites historically affected by landslides and floods, map at 1: 1 200 000 scale, CNR, Rome.” Rome, 1998. 180
- [44] M. Santangelo, D. Gioia, M. Cardinali, F. Guzzetti, and M. Schiattarella, “Interplay between mass movement and fluvial network organization: An example from southern Apennines, Italy,” *Geomorphology*, vol. 188, pp. 54–67, apr 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12005570> 180

- [45] M. Van Den Eeckhaut, N. Kerle, J. Poesen, and J. Hervás, “Object-oriented identification of forested landslides with derivatives of single pulse LiDAR data,” *Geomorphology*, vol. 173-174, pp. 30–42, nov 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12002620> 180
- [46] A. Mondini and K.-t. Chang, “Combining spectral and geoenvironmental information for probabilistic event landslide mapping,” *Geomorphology*, vol. 213, pp. 183–189, may 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X14000324> 180
- [47] F. Ardizzone, M. Cardinali, A. Carrara, F. Guzzetti, and P. Reichenbach, “Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 2, pp. 3–14, 2002. [Online]. Available: <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/2/3/2002/nhess-2-3-2002.pdf> 180
- [48] U. E. U. N. d. C. s. M. U. d. M. Área Metropolitana del Valle de Aburrá, *Directrices y lineamientos para la elaboración de los estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera, en el Valle de Aburrá*, 2012. [Online]. Available: <http://www.metropol.gov.co/Planeacion/DocumentosAreaPlanificada/DirectricesAMVA.pdf> 181
- [49] J. V. De Graff, H. C. Romesburg, R. Ahmad, and J. P. McCalpin, “Producing landslide-susceptibility maps for regional planning in data-scarce regions,” *Natural Hazards*, vol. 64, no. 1, pp. 729–749, oct 2012. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s11069-012-0267-5> 181
- [50] E. A. Castellanos Abella and C. J. Van Westen, “Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba,” *Geomorphology*, vol. 94, no. 3-4, pp. 453–466, feb 2008. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X07002784> 182
- [51] G. Sierra, J. C. Silva, and L. G. Correa, “Estratigrafía Secuencial de la Formación Amagá,” *Boletín Ciencias de la Tierra*, vol. 15, pp. 9 – 22, 2001. 185
- [52] A. L. Little, “The Engineering Classification Of Residual Tropical Soils,” in *7th Int. Conf. Soil Mech & Foundation Engineering vol. 1*, no. 0, 1969, pp. 1–10. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=121244> 185
- [53] R. V. Zuidam, *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Smits Publishers, 1986. 185

- [54] L. Ayalew and H. Yagamishi, "Slope failures in the Blue Nile basin, as seen from landscape evolution perspective," *Geomorphology*, vol. 57, no. 1-2, pp. 95–116, jan 2004. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X03000850> 185
- [55] M. Komac, "A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia," *Geomorphology*, vol. 74, no. 1-4, pp. 17–28, mar 2006. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X05002072> 185
- [56] A. Yalcin, S. Reis, A. Aydinoglu, and T. Yomralioglu, "A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey," *CATENA*, vol. 85, no. 3, pp. 274–287, jun 2011. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816211000233> 185
- [57] H. Y. Hussin, V. Zumpano, P. Reichenbach, S. Sterlacchini, M. Micu, C. van Westen, and D. Băflteanu, "Different landslide sampling strategies in a grid-based bi-variate statistical susceptibility model," *Geomorphology*, vol. 253, pp. 508–523, jan 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X15301951> 185
- [58] A. Clerici, S. Perego, C. Tellini, and P. Vescovi, "A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the Conditional Analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines)," *Environmental Geology*, vol. 50, no. 7, pp. 941–961, aug 2006. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s00254-006-0264-7> 185
- [59] 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, aug 2015. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s11069-015-1736-4> 187
- [60] E. M. O'Loughlin, "Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis," *Water Resources Research*, vol. 22, no. 5, pp. 794–804, may 1986. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1029/WR022i005p00794> 187
- [61] J. Suárez, *Deslizamientos: análisis geotécnico Vol. I.*, 2009. [Online]. Available: www.erosion.com.co 187
- [62] A. Lizcano and M. C. Herrera, "Suelos derivados de cenizas volcánicas en colombia," *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 6, no. 2, pp. 167–198, 2006. [Online]. Available: http://www.pmrl.ce.gatech.edu/papers/Lizcano_2006a.pdf 187

- [63] J. Salamanca and K. Sadeghian, “La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana,” *Cenicafé* 56, vol. 4, pp. 381 – 397, 2005. [Online]. Available: <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/163> 187
- [64] L. Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, and C. Oteo, *Ingeniería Geológica*, S. Pearson Educación, Ed., Madrid, 2002. 187
- [65] A. Ortega and A. Serrano, “Índice de erosión pluvial y periodos de retorno para Fredonia, Jardín y Venecia,” Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de Colombia, 1984. 187
- [66] F. Guzzetti, P. Reichenbach, F. Ardizzone, M. Cardinali, and M. Galli, “Estimating the quality of landslide susceptibility models,” *Geomorphology*, vol. 81, no. 1-2, pp. 166–184, nov 2006. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X06001371> 194
- [67] C. van Westen, T. van Asch, and R. Soeters, “Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult?” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 65, no. 2, pp. 167–184, may 2006. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s10064-005-0023-0> 194
- [68] J. S. Griffiths, A. E. Mather, and A. B. Hart, “Landslide susceptibility in the Río Aguas catchment, SE Spain,” *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 35, no. 1, pp. 9–17, feb 2002. [Online]. Available: <http://qjgeh.lyellcollection.org/cgi/doi/10.1144/qjgeh.35.1.9> 194
- [69] D. Brunsten, “Geomorphological roulette for engineers and planners: some insights into an old game,” *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 35, no. 2, pp. 101–142, may 2002. [Online]. Available: <http://qjgeh.lyellcollection.org/cgi/doi/10.1144/1470-92362001-40> 195
- [70] A. Ozdemir and T. Altural, “A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan mountains, SW Turkey,” *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 64, pp. 180–197, mar 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367912012005585> 195, 197