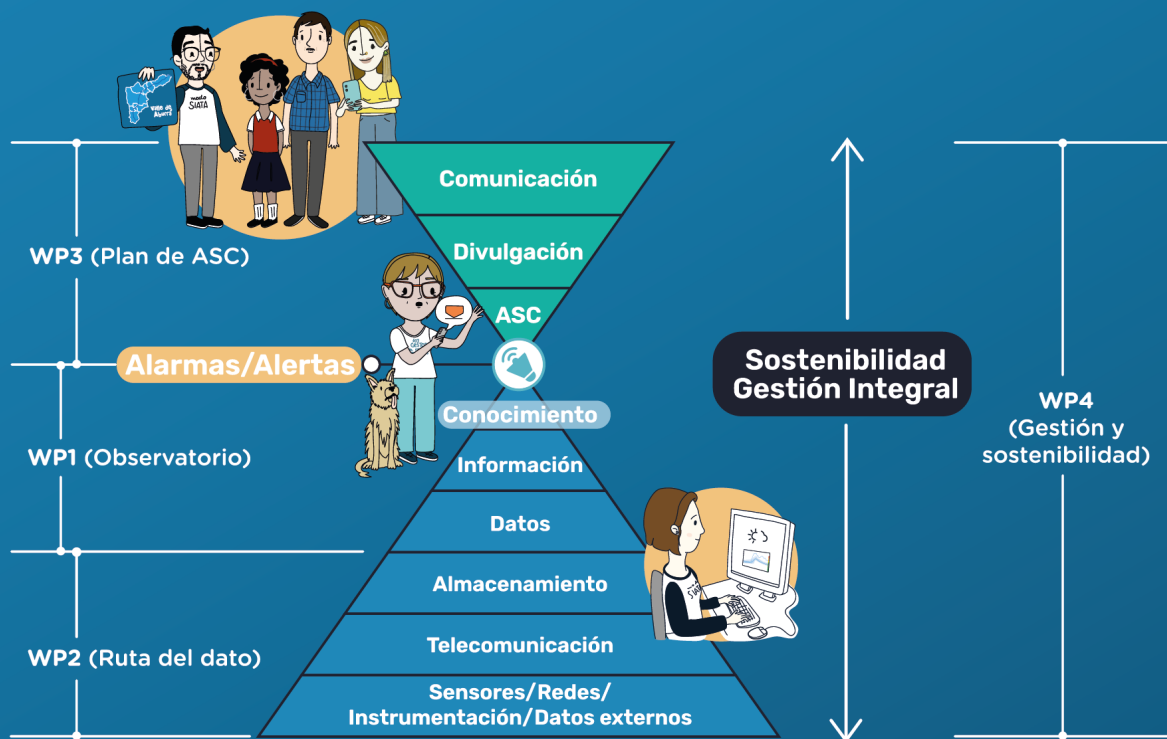


Desarrollar actividades de **investigación aplicada, desarrollo tecnológico y apropiación social del conocimiento para la acción preventiva, la toma de decisiones oportuna para una gestión efectiva del riesgo** (incluyendo variabilidad y cambio climático), y el seguimiento y análisis integral de variables relacionadas con la calidad del aire en el territorio metropolitano, **apoyando el proceso de formulación de políticas públicas y el fortalecimiento de la gobernanza por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá**, garantizando el estricto cumplimiento de las actividades de carácter obligatorio reguladas por el marco legal vigente.



Contenido

Introducción	1
Área de estudio	2
Datos	2
Metodología	6
Limpieza y procesamiento de datos geotécnicos	7
Delimitación de unidades de ladera	8
Geomorfología de la cuenca	9
Geología de la cuenca	11
Inventario de procesos morfodinámicos	13
Modelación	13
Zonificación morfodinámica mediante análisis estadístico	17
Metodología planteada para la modelación de SHALSTAB	18
Resultados	19
Limpieza y procesamiento de datos geotécnicos	19
Delimitación de unidades de ladera	27
Geomorfología de la cuenca	29
Geología de la cuenca	33
Inventario de procesos morfodinámicos	39
Modelación	42
Zonificación morfodinámica mediante análisis estadístico	49
Metodología planteada para la modelación de SHALSTAB	59
Discusión y Conclusiones	65
Trabajos futuros	67
Referencias	68

Modelación física de movimientos en masa

Investigadores: Federico Gómez y José Giraldo

Introducción

En áreas propensas a la inestabilidad del terreno, los movimientos en masa desencadenados por la lluvia representan una amenaza natural de gran importancia. Estos eventos, que comprenden deslizamientos, flujos de escombros y caídas de rocas, pueden tener efectos catastróficos en la infraestructura, el medio ambiente y la vida humana. Por lo tanto, comprender y predecir estos fenómenos es fundamental para la planificación territorial y la gestión del riesgo.

Para abordar esta problemática, se emplean una variedad de modelos que van desde enfoques empíricos y estadísticos hasta modelos físico-matemáticos complejos. Estos modelos tienen como objetivo capturar la interacción entre factores como la precipitación, la topografía, la geología y la vegetación, proporcionando herramientas clave para evaluar la inestabilidad en un área específica.

Los modelos físicos se basan en principios hidrológicos y geotécnicos para simular el comportamiento del suelo ante la lluvia y su inestabilidad. Estos modelos predicen los movimientos en masa en función de la infiltración del agua en el suelo, su saturación y resistencia, y la pendiente del terreno. Para realizar esta modelación, se requieren diferentes parámetros, entre ellos los parámetros geotécnicos del suelo.

Por ello, en este estudio se recopilan datos geotécnicos como la fricción, cohesión, peso unitario y permeabilidad del suelo, así como datos topográficos del Valle de Aburrá. Además, se realizan análisis estadísticos para identificar y eliminar datos atípicos y para agrupar unidades geotécnicas con propiedades geomecánicas similares, lo que permitirá tener una menor variabilidad espacial de los parámetros y una caracterización más precisa del terreno.

Actualmente, varios modelos físicos son ampliamente utilizados en la investigación, entre ellos el modelo SHALSTAB desarrollado por Montgomery and Dietrich (1994), que se centra en la interacción entre la estabilidad del terreno y la humedad del suelo. Este modelo, junto con otros como TRIGRS, r.slope.stability, SINMAP y otros, es uno de los más usados para el análisis y la modelación de movimientos en masa inducidos por la lluvia.

La mayoría de estos modelos realizan el análisis celda a celda. No obstante, estudios recientes han implementado la delimitación automática de unidades de ladera (slope units) mediante herramientas como r.slopeunits o LagriSu, sobre las cuales ejecutan el modelo. Esta metodología ha mostrado obtener resultados mejorados aumentando la legibilidad de los mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra al reducir los efectos de las crestas (Alvioli et al., 2016; Yan et al., 2024). Además, la combinación de esta delimitación con un trabajo de campo detallado, enfocado en la caracterización precisa de las unidades geológicas superficiales, contribuye a la mejora de los resultados de la modelación física.

En el presente estudio se desarrolla una modelación empleando SHALSTAB tanto a escala de píxel como de unidad de ladera. Además se explora un análisis mediante técnicas de machine learning, específicamente

el algoritmo XGBoost que permite obtener una zonificación morfodinámica detallada del área de estudio.

Área de estudio

El área de estudio es el Valle de Aburrá (Figura 1), región ubicada en el centro-sur del departamento de Antioquia, en medio de la Cordillera Central de los Andes. Este valle cuenta con 30 km de ancho en promedio, la parte más extensa puede alcanzar entre 60-90 km. De norte a sur se encuentran los municipios: Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Envigado, Itagüí, Sabaneta, La Estrella y Caldas.

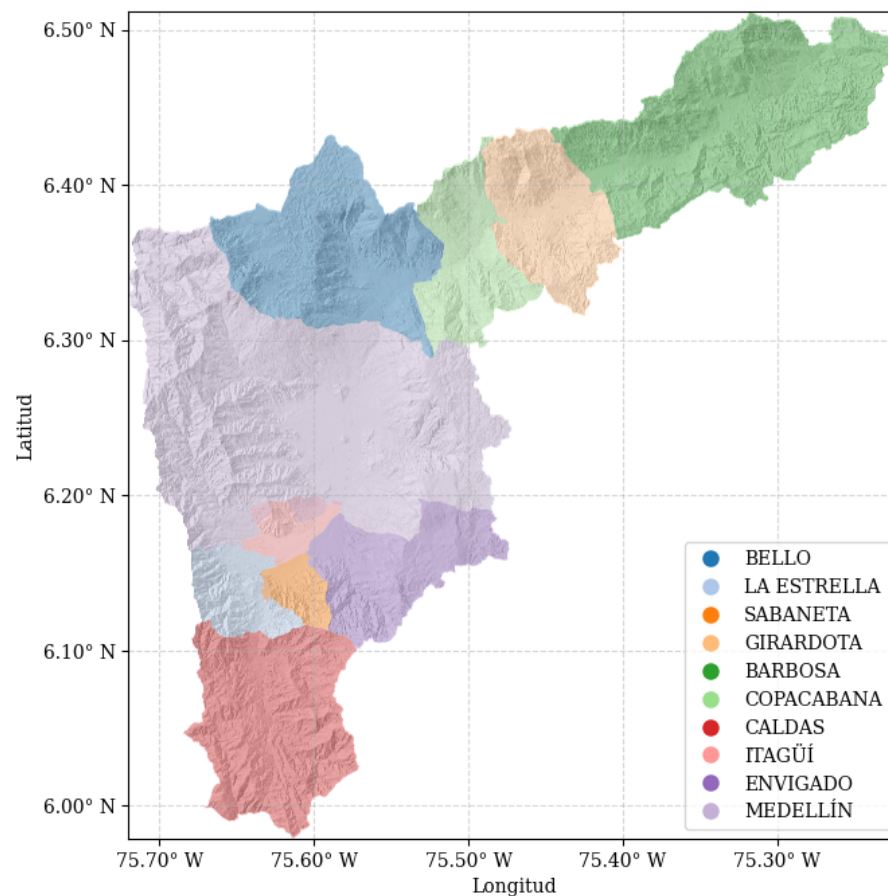


Figura 1: Área de estudio.

Datos

Los datos necesarios para los modelos físicos de estabilidad representan las características físicas del terreno y su distribución espacial. El modelo digital de elevación utilizado, tomado del proyecto Cartoantiquia, tiene una resolución espacial de 2 m x 2 m. A partir de este, se derivan la pendiente y el área acumulada.

Adicionalmente, se requieren los parámetros geotécnicos que representan las fuerzas resistentes del suelo. En el caso de SHALSTAB, son necesarios los valores de fricción, cohesión, peso unitario y permeabilidad, los cuales pueden ser calculados a partir de diferentes ensayos de laboratorio, como la penetración estándar (SPT), el ensayo de corte directo, el ensayo triaxial, el ensayo de consolidación, entre otros.

A mayor cantidad de datos de parámetros geotécnicos, menor será la incertidumbre y, por ende, se obtendrán mejores resultados del proceso, ya que al disponer de una mayor cantidad de información, es posible realizar una caracterización más precisa del terreno.

Para el Valle de Aburrá, se recolectaron un total de 375 muestras a partir de diferentes estudios, los cuales se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Estudios consultados para recopilación de datos geotécnicos

Estudio	Autor y año
Incertezas, vulnerabilidade e avaliação de risco devido a deslizamento em estradas	Hidalgo (2013)
Propiedades geomecánicas de las formaciones comprendidas entre los barrios San Diego, Poblado, Buenos Aires y Los Caunces, de la ciudad de Medellín	Osorio and Hincapie (1990)
Estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismos y lluvia en el Valle de Aburrá, Colombia	Hidalgo and Vega (2014)
Estudios geológicos-geotécnicos para el desarrollo del api Poblado Country Club Ejecutivos Medellín	EGEA Ingeniería S.A.S (2015)
Implementación del modelo TRIGRS con análisis de confiabilidad para la evaluación de la amenaza a movimientos en masa superficiales detonados por lluvia	Aristizabal et al. (2019)
Correlación de parámetros de resistencia con propiedades índice y de clasificación para suelos producto de la meteorización en el Valle de Aburrá y municipios aledaños	Echeverry (2019)
Elaboración de estudios de riesgo de detalle por movimiento en masa, según lo establece el Plan de Ordenamiento Territorial vigente, a través de la inversión de recursos de planeación local de presupuesto participativo en la comuna 90 de la ciudad de Medellín	Consortio Territorial Medellín (2016)
Estudio básico de amenazas naturales municipio de Caldas - Antioquia	Bioexplora S.A.S (2023)
Estudio de suelos para la caracterización geotécnica, la definición del sistema de fundación y las recomendaciones geotécnicas para el correcto manejo de las obras asociadas a la ampliación de la sede de operaciones de Emvarias localizada en el barrio La Toscana del municipio de Medellín (Antioquia)	Consulcivil S.A.S (2017)
Plan Parcial Carabineros Z2R48 Medellín-Antioquia	INCIGAM (2022)
Estudio de suelos para la construcción de varias obras en la Universidad de Antioquia sede Recinto Quirama	Universidad de Antioquia (2021)
Geotechnical variations on a tropical soil produced by municipal solid waste leachate	Quintero et al. (2017)
Aunar esfuerzos para realizar estudios de riesgo de detalle por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales, con sus respectivas medidas de intervención, en zonas clasificadas con condición de riesgo en el marco del POT del Municipio de Medellín	Universidad Eafit (2017)
Microzonificación y evaluación del riesgo sísmico del Valle de Aburrá	Universidad de los Andes (2016)

Tabla 1: Estudios consultados para recopilación de datos geotécnicos (continuación)

Estudio	Autor y año
Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín	Grupo de sismología de Medellín (1999)
Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones	Grupo de sismología de Medellín (2002)

Es relevante señalar que no todas las muestras cuentan con los cuatro parámetros geotécnicos mencionados anteriormente. Incluso en el caso de las permeabilidades, solo se dispone de los datos proporcionados por la Microzonificación Sísmica (Universidad de los Andes, 2016), los cuales serán utilizados directamente en la modelación física.

La Figura 2 proporciona un desglose detallado del número de muestras recolectadas en cada estudio.

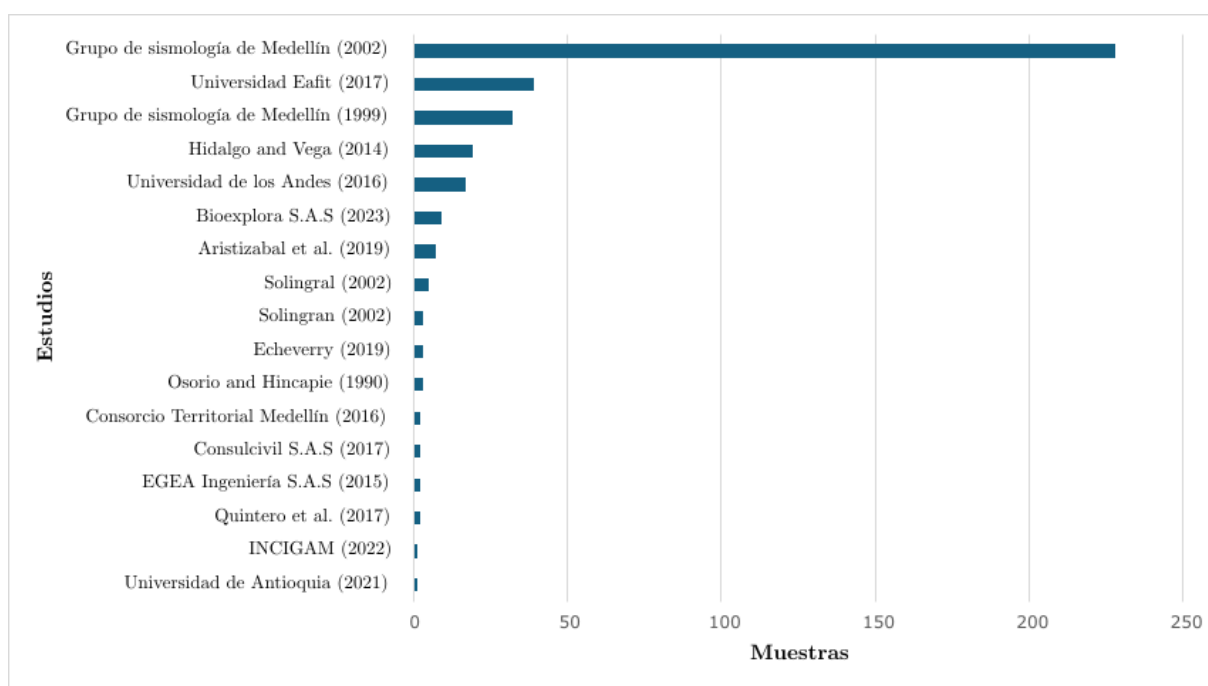


Figura 2: Muestras recolectadas por estudios consultados.

Los datos recolectados se distribuyen espacialmente según la clasificación geotécnica propuesta por Universidad de los Andes (2016), como se muestra en la Tabla 2 y en la Figura 3.

Tabla 2: Clasificación geotécnica propuesta en la Microzonificación Sísmica del 2016

Nº	Unidad	Subunidad
1	Anfibolita	Anfibolitas de Medellín (TRaM) Anfibolita granatífera de Caldas (PZagC) Anfibolitas del Alto de Minas (PZaAM)
2	Gneis Norte	Gneis de La Ceja (TRgLC)

Tabla 2: Clasificación geotécnica propuesta en la Microzonificación Sísmica del 2016 (continuación)

Nº	Unidad	Subunidad
		Gneis de Palmitas (TRgP) Milonita de La Iguaná (Jml)
3	Gneis Sur	Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS) Gneis de La Ceja (TRgLC)
4	Dunitas	Peridotita de Romeral (JuR) Dunitas de Medellín (JKuM)
5	Esquistos	Esquistos de Caldas (PZeC) Esquistos de Cajamarca (TReC) Esquistos anfibólicos de Baldías (TReaB)
6	Cuarzodiorita y Granodiorita Norte	Batolito Antioqueño (KcdA) Tonalita de Ovejas (KtO)
7	Cuarzodiorita y Granodiorita Sur	Batolito Antioqueño (KcdA) Stock de Media Luna (KcdML) Stock de Las Estancias (KcdE) Stock de Amagá (TRgA)
8	Diorita	Stock de Altavista (KdA)
9	Gabros	Gabros de Romeral (JgR) Metabasitas del Picacho (JKmbP) Gabro de San Diego (KgSD)
10	Migmatitas	Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP)
11	Flujos de lodos Norte	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos Depósitos de deslizamiento (Qd) Llenos antrópicos (Qll)
12	Flujos de lodos Oeste	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos Depósitos de deslizamiento (Qd) Llenos antrópicos (Qll)
13	Flujos de lodos Este	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos Depósitos de deslizamiento (Qd) Llenos antrópicos (Qll)
14	Flujos de lodos Sur	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos Depósitos de deslizamiento (Qd) Llenos antrópicos (Qll)
15	Depósitos aluviales	Depósitos aluviales (Qal)
16	Depósitos aluviotorrenciales	Depósitos aluviotorrenciales (Qat)
17	Rocas volcánicas	Miembro Volcanosedimentario (KvsQG) Miembro volcánico (KvQG)

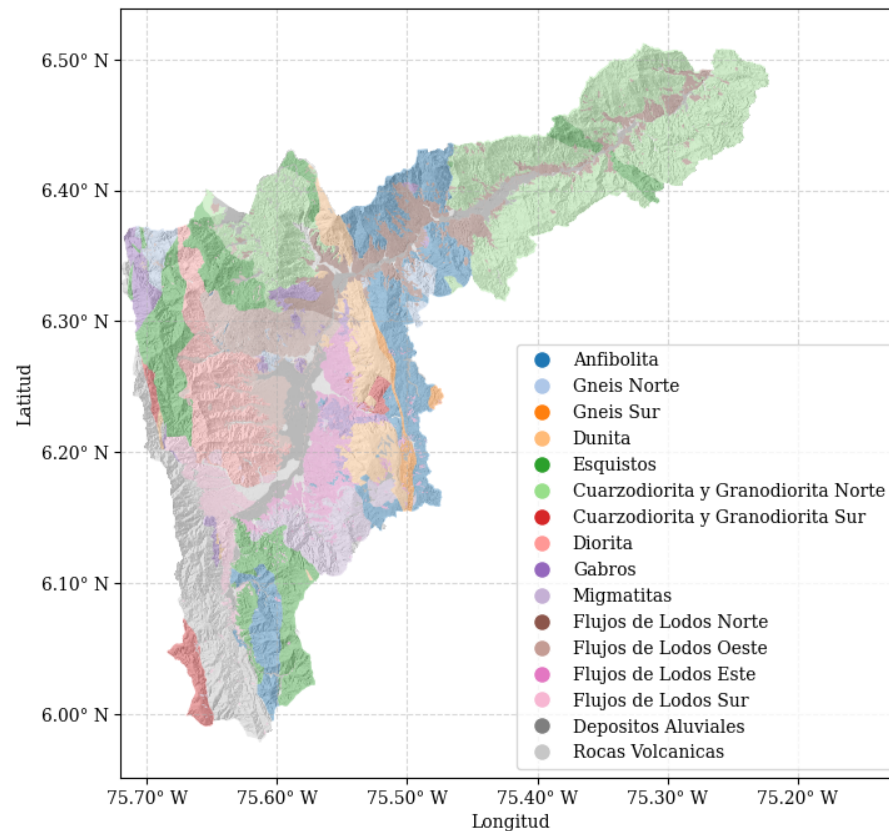


Figura 3: Ubicación espacial de unidades geotécnicas presentadas en la Microzonificación Sísmica del 2016.

Metodología

La metodología utilizada en este estudio se centra inicialmente en la recopilación y procesamiento de datos geotécnicos necesarios para la modelación física, seguida de la aplicación de filtros estadísticos diseñados para combinar unidades geotécnicas con propiedades similares. Se utilizan filtros basados en el rango intercuartil para identificar y eliminar datos atípicos, mientras que la prueba t se emplea para evaluar la similitud estadística entre subunidades y unidades. Este enfoque permite agrupar las unidades geotécnicas de manera coherente y definir parámetros óptimos para la modelación. Adicionalmente, como parte del mejoramiento de los insumos, se realiza un trabajo de campo detallado en la zona piloto para la redelimitación de la geomorfología y geología tomada de la Microzonificación Sísmica, buscando una mayor exactitud en la modelación física.

Posteriormente, con el objetivo de llevar la modelación más allá del nivel de píxel y realizar un análisis a nivel de ladera en un área seleccionada como zona piloto, se delimitan automáticamente las unidades de ladera utilizando herramientas especializadas. A partir de estas unidades, se aplica el modelo SHALSTAB en un área seleccionada para simular y analizar los movimientos en masa inducidos por la lluvia. Finalmente, con un inventario actualizado de movimientos en masa obtenido a través de visitas de campo y la revisión de imágenes satelitales, se lleva a cabo una zonificación morfodinámica mediante técnicas de machine learning, integrando variables físico-espaciales, morfodinámicas y geométricas.

Limpieza y procesamiento de datos geotécnicos

En la Figura 5 se puede observar un diagrama de flujo que representa la metodología usada para la ejecución de la limpieza y procesamiento de datos.

Primer filtro (rango intercuartil) en las subunidades

La base de datos recopilada presenta casos con diferencias notables entre los parámetros geotécnicos (cohesión, fricción peso unitario) de suelos similares, debido a esto es recomendable realizar este primer filtro que consiste en eliminar los datos atípicos o “outliers”. Para esto se procede inicialmente a identificar el rango intercuartil (RQ), definido como la diferencia entre el tercer cuartil (Q3) equivalente al percentil 75 y el primer cuartil (Q1) equivalente al percentil 25 (King and Eckersley, 2019).

De esta manera se considera que un punto es atípico cuando está por encima de 1.5 veces por encima de Q3 o por debajo de 1.5 veces de Q1 (King and Eckersley, 2019) (Figura 4).

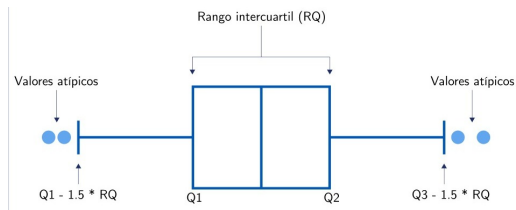


Figura 4: Explicación gráfica de rango intercuartil y datos atípicos.

Segundo filtro (prueba T) entre subunidades de una misma unidad

La prueba t es una técnica estadística comúnmente utilizada para probar hipótesis que involucran datos numéricos. Esta prueba permite calcular el valor p (“p-value”), que es la probabilidad de que un valor estadístico observado sea posible bajo la hipótesis nula. La práctica común es rechazar la hipótesis nula cuando el valor p es menor que 0.05, indicando que las diferencias observadas son estadísticamente significativas. Por otro lado, no se rechaza la hipótesis nula cuando el valor p es mayor que 0.05, sugiriendo así que las diferencias no pueden ser tomadas como estadísticamente significativas (Ugoni and Walker, 1995). En este análisis, la hipótesis nula establece

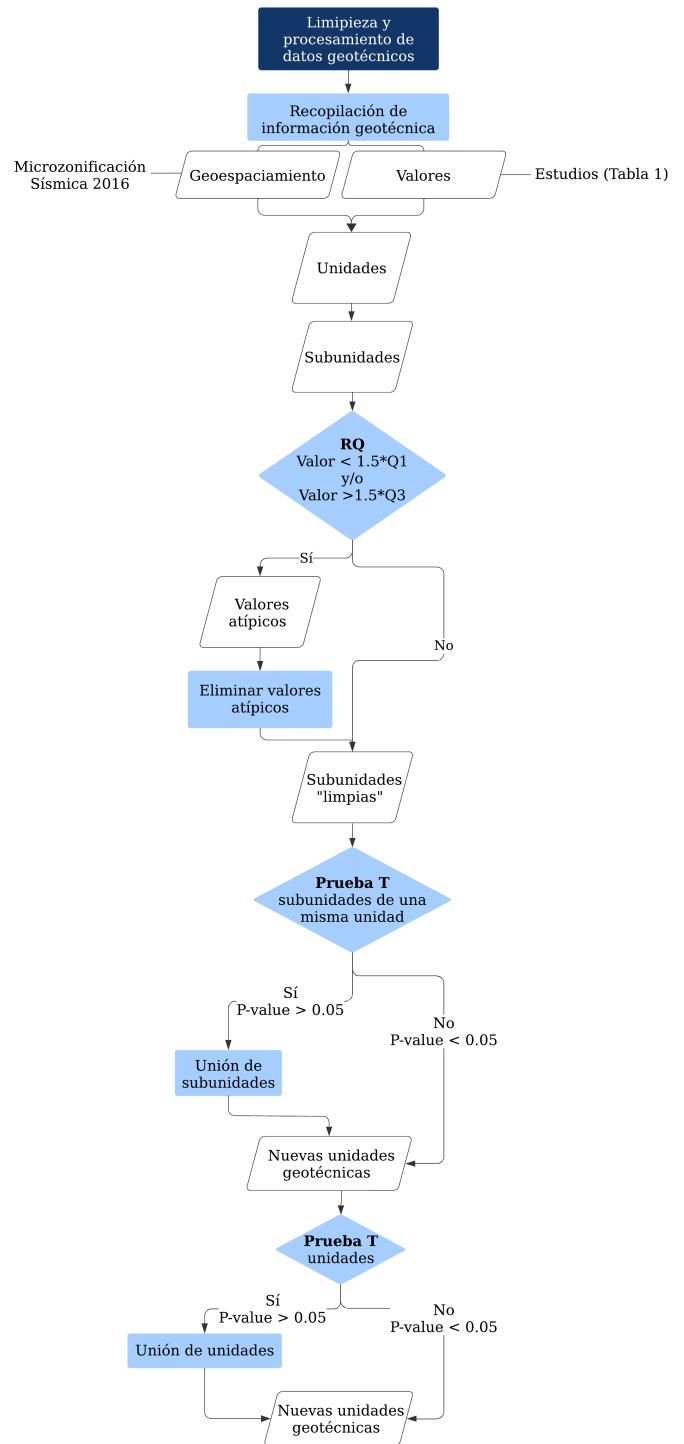


Figura 5: Metodología empleada para la limpieza y procesamiento de datos geotécnicos.

que las muestras no son significativamente diferentes, usando de esta manera la prueba t para determinar si las unidades pueden ser combinadas en función de su similitud estadística.

Primero, se realiza esta prueba entre subunidades de una misma unidad con el objetivo de agrupar las subunidades similares y convertirlas en unidades. Si una subunidad no es similar a ninguna otra, se convierte en una nueva unidad independiente. Para que se produzca la unión entre dos subunidades, se establece la condición de que los tres valores de p (fricción, cohesión y peso unitario) sean mayores a 0.05.

Tercer filtro (prueba T) entre unidades

Una vez que se realizan las posibles uniones entre las subunidades, se procede a realizar la prueba t entre unidades, al igual que en el filtro anterior se establecen las mismas condiciones para la unión de unidades.

Cuarto filtro (Unión final iterativa)

En este filtro, el objetivo es agrupar las unidades geotécnicas que muestran similitudes estadísticamente significativas en sus propiedades, con base en los resultados del tercer filtro.

El proceso para la unión de unidades es una iteración de la prueba t, con la idea de llegar al punto en el que no queden más combinaciones posibles. La agrupación comienza comparando una unidad con otra unidad, si la unión es posible, entonces se combinan y se comienza a iterar nuevamente sobre la matriz resultante, y así sucesivamente hasta llegar al punto en el que no sea posible unir unidades debido a sus diferencias estadísticas.

Delimitación de unidades de ladera

La selección de la unidad de mapeo adecuada es fundamental para obtener buenos resultados en la modelación de movimientos en masa. Aunque la unidad de cuadrícula (celda a celda) es la más común debido a su simplicidad matemática y facilidad de cálculo en diferentes zonas geográficas, presenta limitaciones importantes. Entre ellas, la falta de una relación directa con la información geomorfológica de los deslizamientos. En contraste, las unidades de ladera abordan estos inconvenientes al ofrecer una representación más precisa del terreno y sus límites potenciales para el movimiento en masa (Chang et al., 2023). Además, la delimitación de estas unidades ayuda a reducir los efectos de las crestas y valles, que de otro modo podrían distorsionar los resultados de la modelación (Alvioli et al., 2016; Yan et al., 2024).

Las unidades de ladera se definen en la literatura como unidades de terreno morfológicas delimitadas por líneas de drenaje y divisorias de cuenca. Estas son consideradas homogéneas en términos de su comportamiento geomecánico, lo que significa que las propiedades físicas y mecánicas del suelo y la roca dentro de una misma unidad tienden a ser similares.

Para la delimitación de estas unidades existen diversos métodos, que van desde enfoques empíricos hasta herramientas automatizadas. En esta línea de investigación, se utilizan dos herramientas diferentes con el objetivo de comparar la eficiencia de sus resultados, LagriSu empleada como extensión de QGIS y r.slopeunits como extensión de GRASS GIS. Ambas herramientas realizan la delimitación de manera automática, utilizando un modelo de elevación digital y una serie de parámetros de entrada.

En esta investigación, se decide inicialmente realizar la modelación física a nivel local, seleccionando como zona de estudio la cuenca La Despensa. Esta elección se debe a que, al tratarse de una cuenca, su delimitación natural, basada en divisorias topográficas y líneas de drenaje, facilita una subdivisión más

precisa y eficiente en unidades de ladera bien definidas. Por esta razón, se optó por emplear la herramienta *r.slopeunits*, ya que suele ser más eficaz en la delimitación a escalas detalladas.

Herramienta *r.slopeunits*

A continuación se explica el uso de los parámetros requeridos por el algoritmo para la delimitación automática de unidades de ladera:

- I. **Modelo Digital de Elevación (MDE):** representa la morfología del terreno, utilizado para producir un mapa inicial de cuencas hidrográficas.
- II. **Umbral del área de acumulación de flujo:** área máxima de acumulación de flujo, debe ser menor que el área máxima de acumulación de la superficie total del área de estudio para permitir la delimitación de al menos dos subcuencas que sean lo suficientemente grandes como para ser subdivididas. Umbrales más bajos dan como resultados subdivisiones más finas.
- III. **Área mínima superficial para unidad de ladera:** define el área planimétrica más pequeña posible para una unidad de ladera.
- IV. **Área máxima superficial para unidad de ladera:** define el área más grande permitida para cualquier unidad de ladera. Esto asegura que ninguna unidad de ladera sea demasiado extensa.
- V. **Varianza circular:** mide la uniformidad de la dirección del terreno. Un valor de 0.1 representa direcciones de aspecto casi uniformes, mientras que 0.6 indica direcciones más dispersas. Este parámetro permite controlar la homogeneidad en las subcuencas.
- VI. **Factor de reducción:** factor para ajustar el umbral de la acumulación de flujo en pasos iterativos para refinar progresivamente la subdivisión las subcuencas.
- VII. **Tamaño de limpieza:** especifica el tamaño de las unidades de ladera candidatas a eliminar si no cumplen ciertos criterios, asegurando que solo se consideren unidades de ladera válidas.

Una vez definidos los parámetros, el algoritmo de *r.slopeunit* genera inicialmente subcuencas basadas en el umbral de acumulación de flujo. Estas subcuencas se subdividen iterativamente en subcuencas más pequeñas “hijas” mientras su tamaño supere un área mínima y la variación circular sea menor que el valor definido. El proceso continua hasta que todas las subcuencas cumplan con los parámetros establecidos.

Gemorfología de la cuenca

La evolución geomorfológica de la cuenca resulta de la interacción continua entre agentes endógenos y exógenos en la región, influenciada por diversos eventos ocurridos a nivel local y regional a lo largo del tiempo. Si bien esta variable no es un insumo directo del modelo físico, es fundamental para entender el comportamiento de la zona de estudio y evaluar la coherencia de los resultados obtenidos.

La delimitación geomorfológica se elabora siguiendo la propuesta de jerarquización geomorfológica propuesto por Universidad de los Andes (2016). Esta metodología se estructura en una jerarquía que se adapta según el nivel de detalle requerido y la escala de trabajo, como se ilustra en la Figura 6.

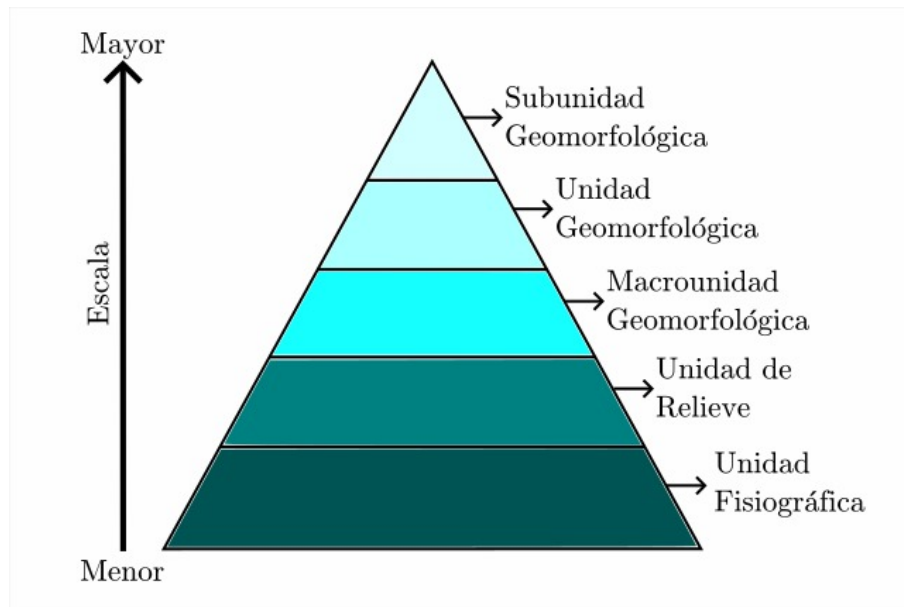


Figura 6: Esquema de jerarquización geomorfológica propuesto por Microzonificación Sísmica.

- **Unidad fisiográfica:** cartografiables a escalas regionales; su condición de homogeneidad la constituyen la geología y tectónica.
- **Unidad de relieve:** su condición de homogeneidad la constituyen las geoformas y la geología.
- **Macrounidad geomorfológica:** conformada por un conjunto de geoformas vinculadas genéticamente.
- **Unidad geomorfológica:** conjunto de geoformas del mismo tipo, originadas por el mismo procesos y durante el mismo tiempo.
- **Subunidad geomorfológica:** división en partes de una unidad geomorfológica.

Para la clasificación geomorfológica, se parte de la delimitación de unidades geomorfológicas propuesta por la Microzonificación Sísmica. Esta clasificación se refina a nivel de subunidades utilizando variables morfométricas derivadas del MDE, como la pendiente, el aspecto y la altura de la ladera; esta última, además de indicar la altitud, permite evaluar la incisión en las laderas.

El nombre de las subunidades se establece con base en los rangos propuestos por Carvajal et al. (2005) para las variables de pendiente (Tabla 3) y longitud de la ladera (Tabla 4), mientras que el grado de incisión se establece con lo observado en campo y con ayuda del mapa de altura de ladera.

Tabla 3: Clasificación de inclinación del terreno según Carvajal et al. (2005).

Inclinación	Descripción
< 5°	Plana o suavemente inclinada
6° - 10°	Inclinada
11° - 15°	Muy inclinada
16° - 20°	Abrupta



Tabla 3: Clasificación de inclinación del terreno según Carvajal et al. (2005) (continuación).

Inclinación	Descripción
21° - 30°	Muy abrupta
31° - 45°	Escarpada
> 45°	Muy escarpada

Tabla 4: Clasificación de longitud de ladera según Carvajal et al. (2005).

Longitud	Descripción
< 50 m	Muy Corta
51 - 250 m	Corta
251 - 500 m	Moderada
501 - 1000 m	Larga
1001 - 2500 m	Muy Larga
> 2500 m	Extremadamente Larga

La asignación de códigos a cada subunidad geomorfológica se realiza de forma sistemática para facilitar su identificación y clasificación. El código se compone de las iniciales del nombre de la unidad, seguidas por un conjunto de letras que indican, en orden, el grado de incisión, el grado de inclinación y la longitud de la ladera.

Tabla 5: Esquema de asignación de códigos a subunidades geomorfológicas.

Categoría	Descripción	Código	Significado
Unidad geomorfológica	Nombre de la unidad	<i>Depende de la unidad</i>	Ej. Ld (Lomos en depósitos)
Grado de incisión	Poco incidado	Pi	Poco incidado
	Moderadamente incidado	Mi	Moderadamente incidado
	Incidado	I	Incidado
Grado de inclinación de la pendiente	Plana	p	Plana
	Inclinada	i	Inclinada
	Muy inclinada	mi	Muy inclinada
	Abrupta	a	Abrupta
	Muy abrupta	ma	Muy abrupta
	Escarpada	e	Escarpada
	Muy escarpada	me	Muy escarpada
Longitud de ladera	Muy corta	mc	Muy corta
	Corta	c	Corta
	Moderada	m	Moderada
	Larga	l	Larga
	Muy larga	ml	Muy larga
	Extremadamente larga	el	Extremadamente larga

Geología de la cuenca

Unidades geológicas

La delimitación de las unidades geológicas se basa en la división propuesta por Universidad de los Andes (2016). El objetivo principal es verificar y complementar esta información mediante trabajo de campo y el análisis de datos topográficos, como curvas de nivel y mapas de pendientes, con el fin de generar un mapa geológico a una escala más detallada y ser usado en la modelación física.

Unidades geológicas superficiales (UGS)

Para realizar la delimitación de las UGS se tiene en cuenta: los diferentes tipos de rocas clasificadas según su origen y composición mineralógica, grado de meteorización o alteración, dureza y resistencia, así como, los suelos diferenciados de acuerdo con su origen, composición mineralógica, clasificación genética, características y propiedades del suelo, grado de meteorización, consistencia, resistencia, densidad relativa, compacidad, propiedades de la masa del suelo, estructuras relictas o discontinuidades en la masa de suelo y propiedades ingenieriles.

Para la asignación de nombre a cada UGS se tiene en cuenta la clasificación según el origen de las unidades propuesta por SGC (2017) detallada en la Tabla 6.

Tabla 6: Unidades Geológicas Superficiales (UGS) según su origen (SGC, 2017).

Tipo de material	Origen de la UGS	Tipo de UGS
Roca	Roca inalterada	Roca dura (calidad de macizo buena y muy buena)
		Roca intermedia (calidad de macizo regular)
		Roca blanda (calidad de macizo regular y mala)
Suelo residual	Derivadas de roca in situ	Suelo residual: horizontes IV (saprolito grueso), V (saprolito fino) y VI
Suelo transportado	Depósitos volcanoclásticos primarios	Flujos piroclásticos (Ignimbrita), oleada piroclástica, caídas piroclásticas (bombas, bloques y ceniza)
	Depósitos volcanoclásticos secundarios	Lahar, avalancha de escombros
	Depósitos aluviales	Aluviones recientes y de cauce activo
		Llanura aluvial
		Abanicos o conos aluviales
	Depósitos lacustres y paludales	Terrazas aluviales
		Depósitos fluvio-torrenciales
	Depósitos lacustres y paludales	Suelos fluviolacustres
	Depósitos costeros	Suelos paludales
	Depósitos eólicos	Deltas, barras, playas
	Depósitos glaciares	Dunas y médanos
		Loess
	Depósitos de gravedad y ladera	Morrenas y tillitas
		Suelos fluvioglaciares
	Depósitos de gravedad y ladera	Coluvial, talud, derrubios y detritos
		Flujos (de lodo, tierra y escombros)

Tipo de material	Origen de la UGS	Tipo de UGS
	Depósitos antrópicos	Llenos de basuras, llenos de escombros, llenos mixtos

El inventario de procesos morfodinámicos en la cuenca de La Despensa se originó a partir de datos recopilados en el marco del convenio de 2018 entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad Nacional de Colombia. Este convenio tenía como objetivo principal la evaluación detallada de las amenazas por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en varios municipios del Valle de Aburrá (UNAL, 2018).

Modelación

13

Para analizar los movimientos en masa inducidos por la lluvia a partir de modelos físicos, se empieza explorando el modelo SHALSTAB desarrollado por Montgomery and Dietrich (1994).

El modelo SHALSTAB

El modelo SHALSTAB, que significa Estabilidad de Deslizamientos Superficiales en inglés (SHallow Landslide STABility), se basa en el uso del modelo hidrológico TOPOG (O'Loughlin, 1986). TOPOG utiliza la precipitación en estado estacionario para configurar el patrón espacial de humedad, teniendo en cuenta el área de influencia de cada punto, la pendiente y la transmisividad del suelo. La humedad del suelo se calcula mediante la ecuación:

$$W = \frac{qa}{bT \sin \theta} \quad (1)$$

Donde q es la precipitación en condiciones estacionarias [mm/d], a es el área de drenaje [m^2], b es la longitud de cada celda [m], T es la transmisividad del suelo en condiciones saturadas [m^2/d], y θ es la pendiente. Si consideramos que la transmisividad no varía con la profundidad, podemos simplificar la ecuación como:

$$W = \frac{h}{z} \quad (2)$$

Donde h es el espesor del suelo saturado y z es el espesor total del suelo. Al combinar las ecuaciones 1 y 2, obtenemos la saturación relativa del perfil de suelo:

$$\frac{h}{z} = \frac{qa}{bT \sin \theta} \quad (3)$$

En cuanto al componente geotécnico, el modelo SHALSTAB se basa en el análisis de equilibrio límite con un talud infinito y el criterio de falla de Mohr-Coulomb.

$$\rho_s g z \sin \theta \cos \theta = c' + \left(\rho_s - \rho_w \frac{h}{z} \right) g z \cos^2 \theta \tan \phi \quad (4)$$

Donde ρ_s es la densidad del suelo, ρ_w es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad, c' es la cohesión efectiva del suelo, y ϕ es el ángulo de fricción. Al reformular la ecuación anterior en términos de la relación h/z :

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} \quad (5)$$

Las dos condiciones que representan estabilidad independiente de la lluvia. Las celdas estables con el perfil de suelo completamente saturado ($h/z = 1$) se denominan estables incondicionalmente y cumplen:

$$\tan \theta < \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \tan \phi + \frac{c'}{\rho_s g z \cos^2 \theta} \quad (6)$$

Mientras que las celdas inestables en condiciones secas ($h/z = 0$) se denominan inestables incondicionalmente y cumplen:

$$\tan \theta \geq \tan \phi + \frac{c'}{\rho_s g z \cos^2 \theta} \quad (7)$$

Índice de estabilidad $\log(q/T)$

Finalmente, al integrar el modelo hidrológico y el modelo de estabilidad, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \sin \theta \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} \right] \quad (8)$$

La razón de q/T es pequeña porque la transmisividad siempre es mucho mayor que la precipitación efectiva. Para facilitar la comunicación, se utiliza el logaritmo de q/T (Dietrich et al., 1998). Este índice de estabilidad es bajo en condiciones críticas mientras que valores altos indican alta estabilidad.

Estabilidad ante un escenario de precipitación

Al reformular la ecuación para tener en cuenta la precipitación y su relación con la transmisividad, se pueden establecer categorías de estabilidad ante un determinado escenario de precipitación estacionaria.

$$\frac{a}{b} = \frac{T}{q} \sin \theta \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} \right] \quad (9)$$

A partir de la ecuación 9, es posible establecer cuatro condiciones de estabilidad para cada celda de análisis. Las celdas donde la relación entre el área de drenaje aferente y la longitud de la celda (a/b) supera la expresión del lado derecho de la ecuación, corresponden a celdas inestables; de lo contrario, son celdas estables.

Lluvia crítica

Despejando la lluvia crítica q a partir de la ecuación 8 se puede encontrar una distribución espacial de la susceptibilidad definida en términos de la precipitación en estado estacionario necesaria para la falla en cada unidad de análisis.

$$q = \frac{Tb}{a} \sin \theta \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} \right] \quad (10)$$

Los datos necesarios para el modelo de estabilidad representan las características físicas del terreno y su distribución espacial. El modelo digital de elevación utilizado tiene una resolución espacial de 2 m x 2 m del proyecto Cartoantiquia. El mapa de profundidad de la capa del suelo se elaboró mediante la metodología propuesta por Catani et al. (2010) *S model*, considerando profundidades menores a 3 m (h_{max}) para deslizamientos superficiales. La distribución espacial del espesor de suelo deslizable h_i a lo

largo del área de estudio se determinó utilizando la ecuación 11, basada en la relación inversa entre la pendiente y el espesor del suelo.

$$h_i = h_{max} \left[1 - \frac{\tan \theta_i \cdot \tan \theta_{min}}{\tan \theta_{max} \cdot \tan \theta_{min}} \cdot \left(1 - \frac{h_{min}}{h_{max}} \right) \right] \quad (11)$$

Donde θ_{max} y θ_{min} corresponden a los valores máximos y mínimos de elevación o pendiente, mientras que h_{max} y h_{min} son los valores que limitan el espesor h_i .

La implementación del modelo SHALSTAB a nivel de unidad de ladera requiere una adaptación específica de los parámetros principales que tradicionalmente se calculan a nivel de píxel:

- **Pendiente (θ):** se calcula como el valor medio de las pendientes de todas las celdas que componen cada unidad de ladera, generando así un valor único y representativo para toda la unidad.
- **Área de drenaje (a):** se identifica la celda con mayor acumulación de flujo dentro de cada unidad, cuyo valor corresponde al área total de la unidad de ladera. Este valor se aplica uniformemente a toda la unidad, representando su capacidad máxima de acumulación de flujo.
- **Ancho de la unidad (b):** se determina trazando múltiples líneas (20 líneas) perpendiculares a la dirección principal del flujo a lo largo de cada unidad. El promedio de estas medidas establece el ancho característico de la unidad de ladera.

Esta selección de parámetros permite mantener la consistencia del análisis a escala de unidad de ladera, considerando que cada unidad funciona como un elemento geomorfológico integrado con características homogéneas.

Modelación probabilística de estabilidad

Para complementar el análisis del modelo SHALSTAB, se implementa un enfoque probabilístico que considera la incertidumbre en los parámetros geotécnicos. Para esto se evalúan tres parámetros geotécnicos: cohesión (c'), ángulo de fricción interno (ϕ) y peso unitario (γ); para cada uno de estos parámetros se consideran cinco escenarios:

- Valor original
- ± 1 desviación estándar
- ± 2 desviaciones estándar

La combinación de estas variaciones genera 124 escenarios posibles, permitiendo evaluar desde cambios individuales hasta combinaciones complejas de parámetros.

Cálculo de Probabilidades

Para cada celda de modelación se determina:

$$P_{inest} = \left(\frac{N_{inest}}{N_{total}} \right) \times 100 \% \quad (12)$$



donde:

- N_{inest} : Número de escenarios que predicen inestabilidad
- N_{total} : Total de escenarios evaluados

Clasificación de Resultados

Los resultados se categorizaron en tres niveles de probabilidad:

Tabla 7: Clasificación de probabilidad de inestabilidad

Nivel	Rango de probabilidad
Baja	$P_{inest} < 25 \%$
Media	$25 \% \leq P_{inest} \leq 85 \%$
Alta	$P_{inest} > 85 \%$

Zonificación morfodinámica mediante análisis estadístico

Con el objetivo de explorar el potencial de las técnicas de machine learning, se propone realizar una zonificación morfodinámica complementaria. Este análisis tiene como finalidad comparar los resultados obtenidos en la modelación física con los generados por el análisis estadístico, evaluando las similitudes y diferencias en dos escalas: a nivel de ladera y de píxel.

En este análisis, se parte de un MDE del área de estudio, del cual se derivan múltiples variables morfométricas, tales como pendiente, orientación, rugosidad, entre otras. Además, se incorporan variables físico-espaciales como la red vial, el drenaje y la clasificación de la cobertura vegetal (presentada en la línea de investigación de Avenidas Torrenciales), lo que permite calcular métricas específicas para cada unidad de ladera y píxel. Adicionalmente, se incluyen variables geométricas para el análisis a nivel de ladera como área, radio de circularidad, perímetro y coeficiente de compacidad, para un análisis con mayor detalle.

Estimación de densidad de Kernel y diagrama de caja

El análisis de la relación entre variables y procesos morfodinámicos se realiza mediante técnicas avanzadas de visualización estadística. La implementación de la estimación de densidad de Kernel (KDE) permite generar funciones de densidad de probabilidad suavizadas, generando una visualización continua y detallada de la distribución de cada parámetro analizado. De manera complementaria, se crean diagramas de caja (box plots) para cada variable en estudio. Estos diagramas proporcionan una representación visual sintetizada que incluye información sobre las medidas de tendencia central, los patrones de dispersión de los datos y la identificación de valores atípicos.

Matriz de correlación entre variables

Adicionalmente, se realiza un análisis de multicolinealidad entre las variables para evaluar el grado de correlación o dependencia lineal entre ellas. Este análisis se presenta por medio de una matriz de correlación

que permite identificar posibles redundancias en la información proporcionada por las variables y ayuda a comprender mejor las relaciones entre los diferentes parámetros. Para seleccionar dichas correlaciones se establece un umbral del coeficiente de Pearson $> 0,75$ y $< -0,75$.

Análisis de varianza (ANOVA)

Método estadístico que permite examinar las diferencias en las medias de dos o más grupos. El objetivo principal de este análisis es identificar variables que muestran diferencias significativas entre los escenarios de presencia y ausencia de procesos morfodinámicos. Se adopta un nivel de significación alfa, comúnmente establecido en 0.05. Esto significa que, si el p-valor obtenido en la prueba ANOVA es inferior al nivel alfa, se concluye que las variables son significativamente diferentes.

Factor de inflación de la varianza (FIV)

Para abordar la colinealidad entre variables similares, se calcula el FIV para cada parámetro; este factor es una de las medidas más usadas para detectar si el grado de multicolinealidad presente en el modelo es preocupante. Los valores de FIV oscilan entre 1 e infinito, y un valor superior a 5 suele considerarse indicativo de colinealidad problemática (Salmerón Gómez and Rodríguez Martínez, 2017). En tal caso, la variable con el FIV más alto será descartada para evitar problemas de multicolinealidad en el análisis.

Modelo XGBoost

Después de descartar las variables que generan multicolinealidad y seleccionar las más representativas, se procede a ejecutar el modelo XGBoost (Extreme Gradient Boosting). Este algoritmo de aprendizaje automático es una versión optimizada de los modelos de árboles de decisión, que combina múltiples árboles simples para formar un modelo más robusto. XGBoost es especialmente efectivo debido a su capacidad para aprender de los errores en cada iteración, mejorando continuamente sus predicciones. Además, incorpora técnicas específicas para evitar el sobreajuste y gestionar datos complejos, al tiempo que optimiza el uso de recursos computacionales, lo que lo hace más rápido y eficiente (Wen et al., 2024).

El objetivo es obtener una zonificación geodinámica de la zona de estudio en términos de probabilidades, permitiendo de esta manera identificar áreas propensas a ocurrencia de procesos morfodinámicos.

Metodología planteada para la modelación de SHALSTAB

Se propone realizar la modelación semanal en las zonas de interés utilizando un MED con una resolución de 2 metros. Sin embargo, para modelaciones a escala regional, como en el caso del Valle de Aburrá, se recomienda emplear un MED remuestreado a 5 metros, debido a las limitaciones computacionales asociadas con áreas extensas.

En cuanto a los límites geológicos y los parámetros geotécnicos, como el ángulo de fricción, la cohesión y el peso unitario, se utilizarán los valores obtenidos en esta investigación (ver Tabla 9) en los casos en que no se disponga de estudios detallados para la zona. En áreas donde existan estudios detallados, la modelación se realizará con base en los resultados de los ensayos de laboratorio reportados en dichos estudios.

Para la permeabilidad de cada unidad geotécnica, se adoptarán los valores proporcionados por la Microzonificación Sísmica, ya que constituyen la única fuente de información disponible para el Valle de Aburrá.

En relación con la precipitación (valor de q), se propone utilizar la precipitación media semanal registrada por los pluviómetros en las zonas donde estos sensores se encuentren a menos de un kilómetro del centroide del área de estudio. En áreas donde no se cumpla esta condición, la representatividad de los datos podría verse afectada. Por ello, en dichas zonas, q se definirá como la precipitación media semanal registrada por el radar en el centroide correspondiente.

Resultados

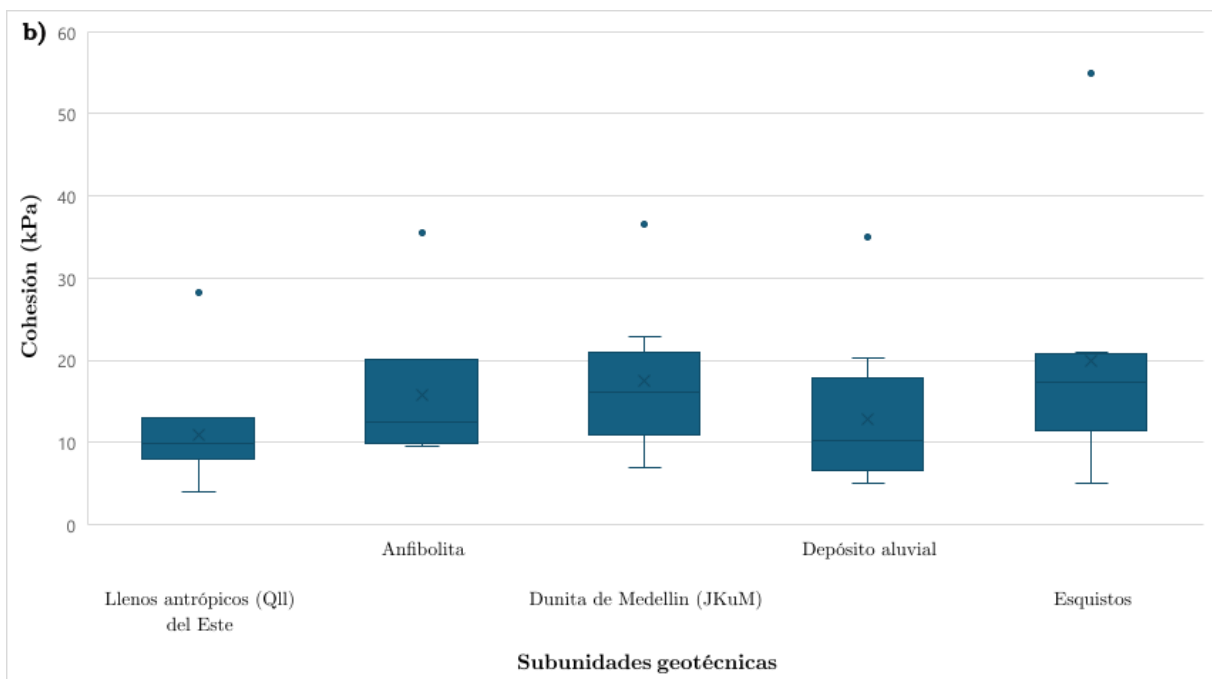
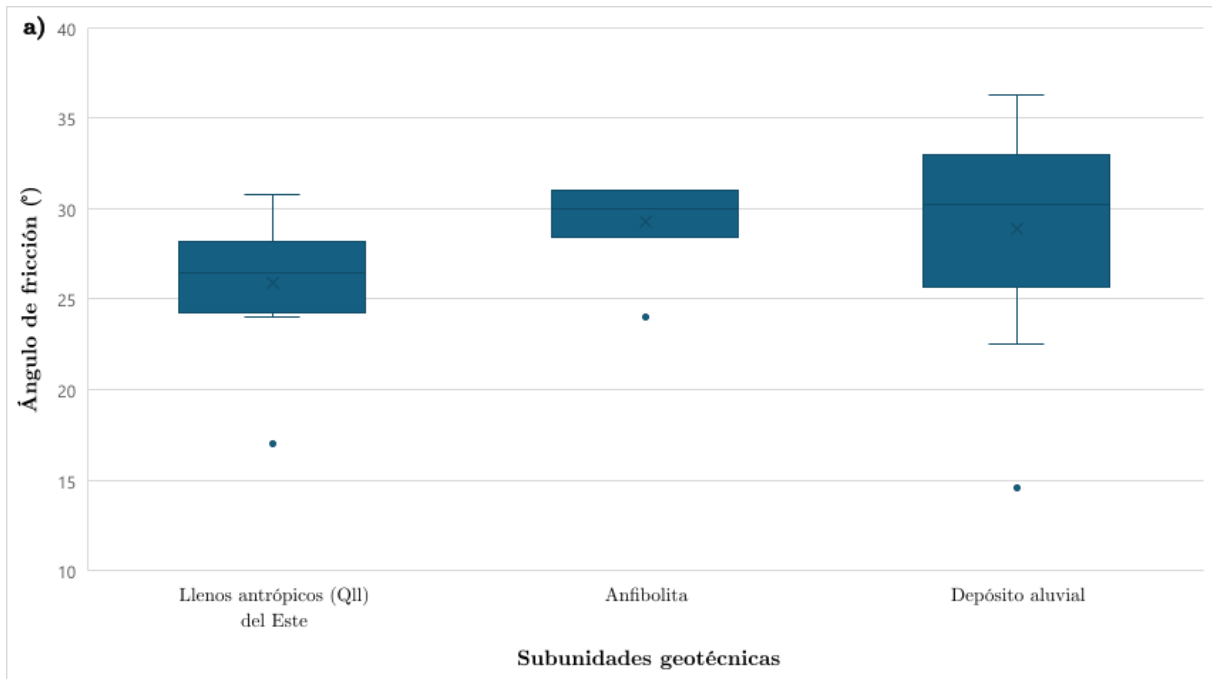
Limpieza y procesamiento de datos geotécnicos

Primer filtro (rango intercuartil) en las subunidades

Este primer filtro permite identificar y excluir parámetros geotécnicos considerados como datos atípicos dentro de las subunidades.

En total, se excluyeron 20 muestras, lo que corresponde a un 5,5 % de la base de datos recopilada. El principal parámetro que contribuye a la eliminación de datos es el peso unitario, en el cual se identificaron 12 datos atípicos. Cabe mencionar que la mayoría de estos datos provienen de la Microzonificación Sísmica del 2016, representando un 40 %. Esto era algo esperado desde la creación de la base de datos, ya que presenta parámetros para diferentes subunidades con cohesión efectiva por encima de 100 kPa y ángulo de fricción por encima de 50° que no son comunes en suelos residuales o en el área de geotecnia.

Los resultados de este proceso de filtrado se pueden observar en los diagramas de cajas presentados en la Figura 8.



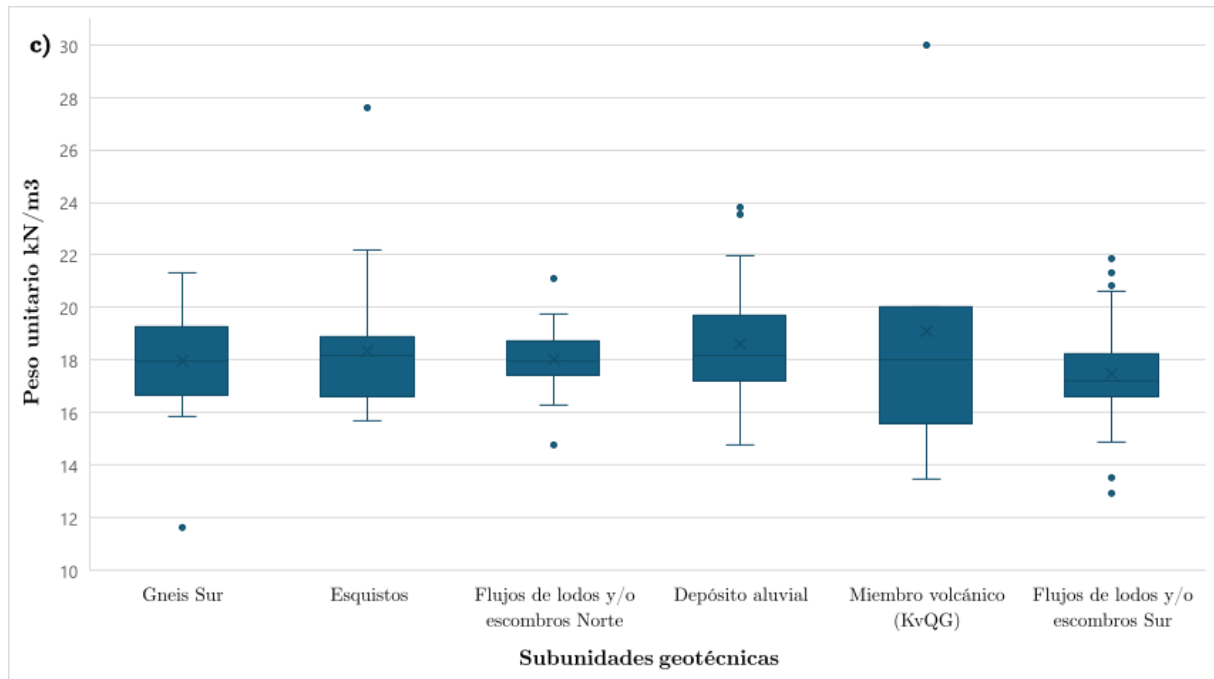


Figura 8: Diagramas de cajas con datos atípicos para: a) Ángulo de fricción, b) Cohesión y c) Peso unitario.

Segundo filtro (prueba T) entre subunidades de una misma unidad

Los resultados de la primera prueba T se presentan en la Tabla 8. Esta tabla muestra los valores p obtenidos para las comparaciones entre las subunidades de una misma unidad. De acuerdo con los criterios establecidos, las subunidades se consideran similares y se agrupan en una única unidad si los valores p de las tres variables (fricción, cohesión y peso unitario) son mayores a 0.05.

Se observa que las subunidades denominadas como llenos antrópicos (Qll) y los flujos de lodos y/o escombros (Qf) pertenecientes a las unidades de los Flujos de Lodos Norte y Sur cumplen con esta condición. Esto indica que no hay diferencias significativas entre estas subunidades en términos de las tres variables evaluadas, permitiendo su agrupación en una sola unidad.

En contraste, aquellas subunidades que no cumplen con el criterio de similitud se mantienen como unidades independientes.

Tabla 8: Resultados prueba t entre subunidades

Unidad	Subunidades comparadas	P-value fricción	P-value cohesión	P-value gamma
Cuarzodiorita y Granodiorita Sur	KcdA vs Stocks	0.028	0.535	0.302
	KcdA vs Granitoides	0.001	0.210	0.096
	Stocks vs Granitoides	0.012	0.199	0.923
Flujos de lodos Norte	Qll vs Qf	0.284	0.226	0.700

Tabla 8: Resultados prueba t (continuación)

Unidad	Subunidades comparadas	P-value fricción	P-value cohesión	P-value gamma
Flujos de lodos Oeste	Qll vs Qf	0.44	0.001	0.835
Flujos de lodos Este	Qll vs Qf	0.572	0.001	0.829
	Qll vs Qd	0.001	0.133	0.338
	Qf vs Qd	0.021	0.418	0.211
Flujos de lodos Sur	Qll vs Qf	0.20	0.899	0.584

Tercer filtro (prueba T) entre unidades

Los resultados de este filtro se visualizan en las matrices de correlación presentadas en las Figuras 9, 10 y 11. En estas matrices, los valores p mayores a 0.05 se destacan en color blanco, indicando las unidades que podrían ser unidas debido a su similitud estadística. En contraste, los valores p menores a 0.05 se destacan en beige, representando las unidades que no pueden ser unidas debido a diferencias significativas en las variables evaluadas.

Un resumen de este filtro se observa en la matriz de concordancia de importancia (Figura 12) que presenta una comparación de los resultados de las pruebas de significancia estadística (pruebas t) entre los tres parámetros de las unidades. La matriz indica con un "SI" cuando las comparaciones entre dos unidades para los tres parámetros resultan en no significancia (mayor que 0.05), sugiriendo que no hay diferencias estadísticamente significativas entre esos grupos para ninguna de las tres propiedades. En caso contrario, se indica con "NO" (pintado de color beige).

Cuarto filtro (unión final iterativa)

Este filtro permite identificar y agrupar las unidades que presentan similitudes estadísticamente significativas en sus parámetros geotécnicos. Para verificar la normalidad de las distribuciones de cada parámetro por zona, se presentan gráficos de densidad de Kernel (13).

Las unidades geotécnicas 1 y 2 presentan distribuciones normales en las tres variables estudiadas, lo que valida el uso de sus medias y desviaciones estándar para representar sus parámetros geotécnicos. Sin embargo, la unidad geotécnica 3, conformada por granitoides, muestra distribuciones con alta curtosis y asimetría significativa principalmente en las variables de phi efectivo y cohesión, indicando que no sigue una distribución normal.

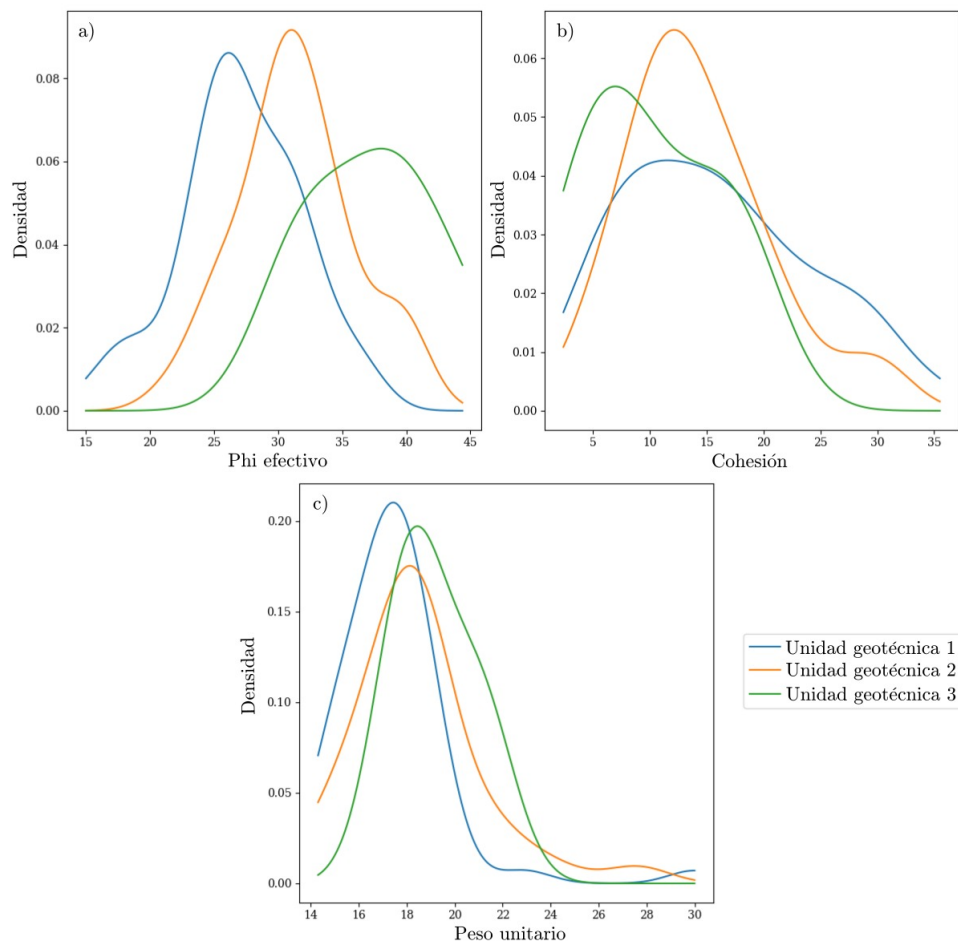


Figura 13: Densidad de Kernel para: a) Phi efectivo, b) Cohesión y c) Peso unitario.

Los resultados finales se presentan en la Tabla 9, donde se muestran tres nuevas unidades geotécnicas obtenidas como resultado de las combinaciones realizadas. Los valores de los parámetros geotécnicos en esta tabla se calculan como la media de las unidades geotécnicas originales que fueron agrupadas, además se presenta la desviación estándar para cada uno de estos parámetros.

Tabla 9: Unidades geotécnicas finales

Unidad geotécnica antigua	Unidad geotécnica nueva	Phi	Cohesión	Gamma
Batolito Antioqueño Cuarzodiorita y Granodiorita Norte Depósitos aluviales Diorita Dunita Flujos Este Flujos Norte Flujos Oeste Flujos Sur Gneis Norte Llenos antrópicos Este Llenos antrópicos Oeste Migmatita	Zona geotécnica 1	$\bar{x} = 27,11$ $\sigma = 4,72$	$\bar{x} = 15,94$ $\sigma = 8,28$	$\bar{x} = 17,48$ $\sigma = 2,39$
Rocas volcánicas Anfibolita Depósitos aluviotorrenciales Depósitos de deslizamiento Este Esquistos Gabro Gneis Sur Stock	Zona geotécnica 2	$\bar{x} = 31,39$ $\sigma = 4,47$	$\bar{x} = 14,35$ $\sigma = 6,34$	$\bar{x} = 18,50$ $\sigma = 2,67$
Granitoide	Zona geotécnica 3	$\bar{x} = 37,22$ $\sigma = 4,96$	$\bar{x} = 10,33$ $\sigma = 5,87$	$\bar{x} = 19,17$ $\sigma = 1,72$

En la Figura 14 observa la distribución espacial de estas zonas geotécnicas finales, cabe destacar que la zona 3 conformada por los granitoides no se encuentra espacialmente localizada en el Valle de Aburrá por ende no aparece en el mapa.

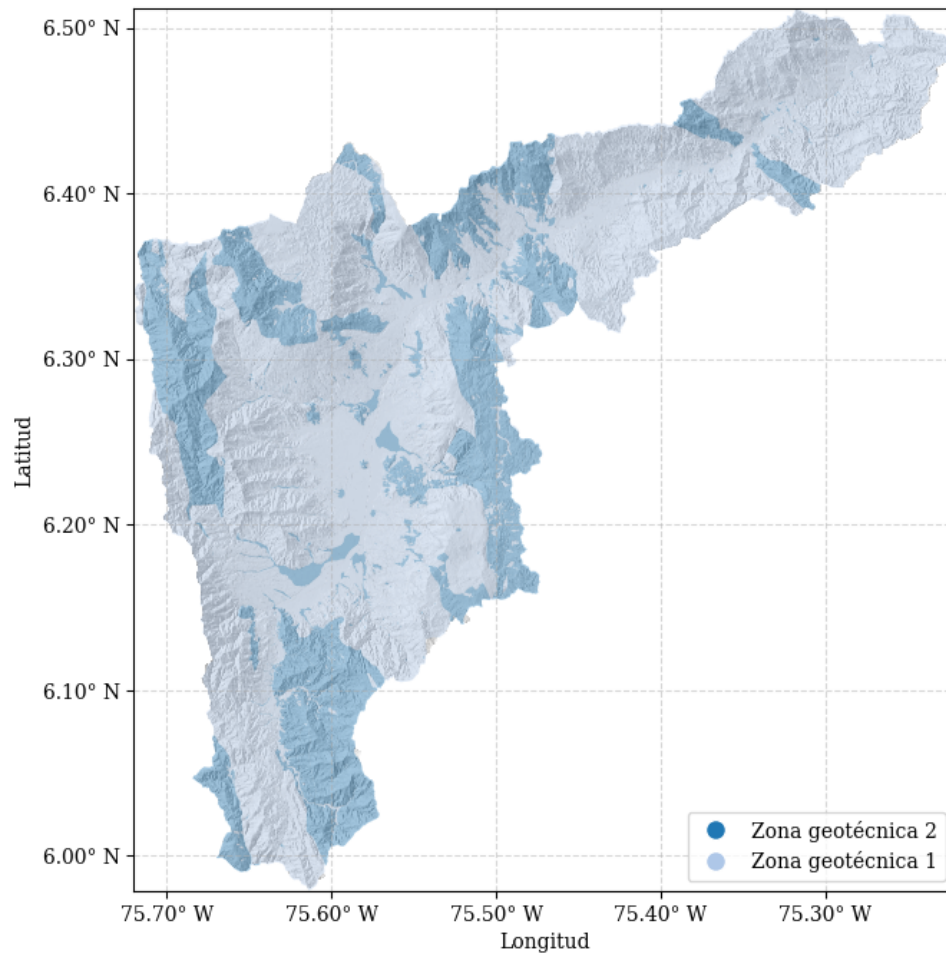


Figura 14: Unidades geotécnicas finales.

Los parámetros geotécnicos presentados requieren validación mediante perforaciones a lo largo de la línea de investigación. Los primeros ensayos de laboratorio, realizados en flujos de lodo y escombros de la cuenca La Despensa (zona piloto), proporcionan resultados que validan el análisis estadístico previo. Específicamente, las muestras analizadas, correspondientes a los Flujos Sur, presentaron valores efectivos de cohesión entre 20 y 23 kPa, ángulos de fricción entre 29° y 32°, y pesos unitarios entre 14.2 y 17.3 kN/m³. Estos valores se encuentran dentro del rango establecido por las desviaciones estándar calculadas en el análisis estadístico inicial.

Delimitación de unidades de ladera

Como se describió en la metodología, la modelación física se enfoca en la cuenca La Despensa, donde se realiza una delimitación detallada de unidades de ladera. El proceso incluye una optimización de los parámetros de entrada de la herramienta mediante variaciones dentro de los rangos típicos reportados en la literatura según los valores recomendados por Alvioli et al. (2016).

Se prueban diversas combinaciones de parámetros con el objetivo de lograr una subdivisión adecuada de



la cuenca. En total, se evalúan 12 conjuntos diferentes de parámetros de entrada que se visualizan en la Tabla 10.

Tabla 10: Combinación de parámetros usadas en la herramienta r.slopeunits para delimitación de la cuenca La Despensa

Combinación	tresh	areamin	cvmin	rf	maxiterarion
1	500,000	10,000	0.2	10	1,000
2	500,000	5,000	0.2	10	1,000
3	300,000	10,000	0.3	10	1,000
4	150,000	5,000	0.3	5	1,000
5	50,000	10,000	0.2	10	100
6	30,000	1,000	0.2	10	100
7	30,000	10,000	0.5	10	100
8	35,000	10,000	0.5	10	100
9	35,000	5,000	0.5	10	1,000
10	30,000	8,000	0.6	10	1,000
11	25,000	8,000	0.6	10	1,000
12	25,000	10,000	0.2	10	100

La delimitación se logró mediante la combinación de dos conjuntos, destacados en amarillo en la Tabla 10. Esta combinación fue necesaria debido a las diferencias en la morfometría, topografía y la densidad de cobertura vegetal entre las partes alta y baja de la cuenca. En la parte alta, las laderas tienen mayor pendiente y una cobertura vegetal densa, lo que hacía que una combinación de parámetros adecuada para la parte baja resultara en unidades demasiado grandes.

Después de seleccionar las combinaciones, se llevó a cabo una redelimitación heurística para ajustar las unidades originales utilizando información topográfica, divisorias y líneas de drenaje que r.slopeunits no pudo detallar posiblemente debido a la cobertura vegetal densa mencionada anteriormente.

En la Figura 15 se presenta la distribución espacial de las unidades de ladera finales. Esta distribución incluye un total de 77 unidades, cuyos tamaños varían desde 0,45 hectáreas hasta 9,4 hectáreas, con una media de 1,25 hectáreas.

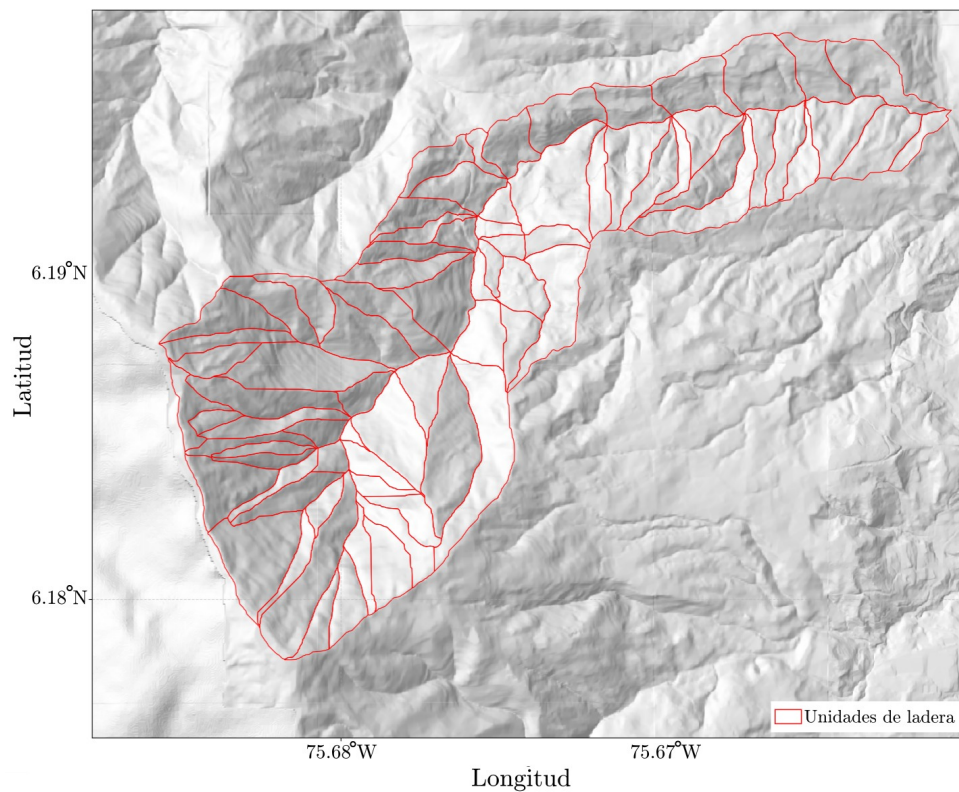


Figura 15: Unidades de ladera delimitadas en la cuenca La Despensa.

Geomorfología de la cuenca

La delimitación geomorfológica, según lo presentado por Universidad de los Andes (2016), se muestra en la Figura 16a donde la cuenca de la quebrada La Despensa exhibe diversas geoformas asociadas tanto a procesos estructurales como denudacionales. Las geoformas estructurales se encuentran vinculadas al sistema de Fallas Romeral y se extienden desde la parte media de la cuenca hasta su zona superior. En esta área, se localiza el valle superior del bloque Romeral, caracterizado por la presencia de lomos (L) y rasgos morfotectónicos (RMT). Por otro lado, desde la parte media de la cuenca hasta su parte inferior, predominan superficies suaves, correspondiente a depósitos altamente incisados (SSDAI).

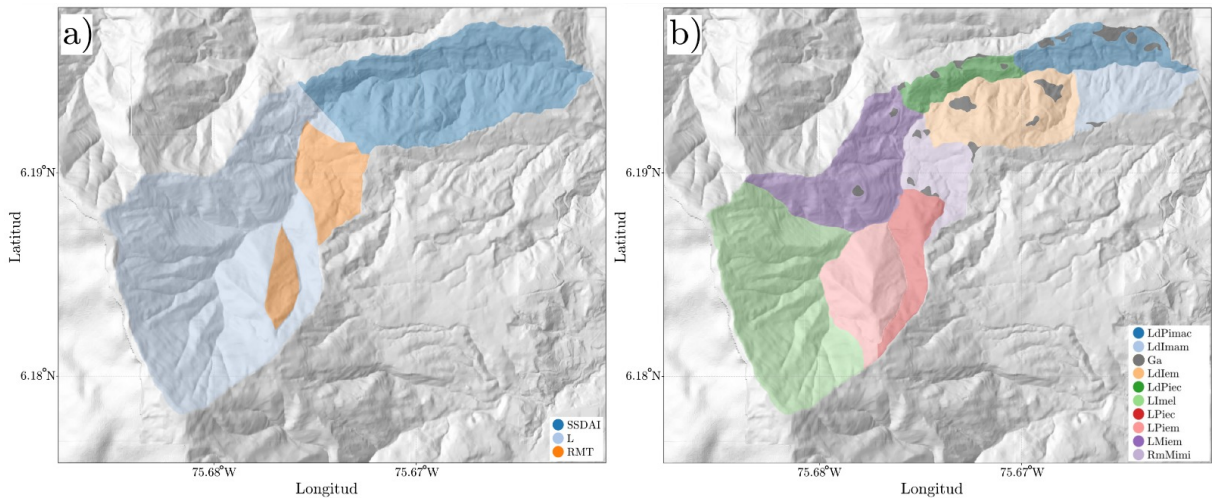


Figura 16: Mapa de unidades geomorfológicas de la cuenca La Despensa tomado de a) Universidad de los Andes (2016) y b) editado con trabajo de campo. SSDAI: superficie suave en depósito altamente incizada, L: lomos. RMT: rasgos morfotectónicos

En este trabajo se logra una división más detallada en subunidades, como se muestra en la Figura 16b. La Tabla 11 describe la clasificación utilizada. Es importante destacar que, dado que la zona de estudio es muy local, las categorías de unidad fisiográfica, unidad de relieve y macrounidad geomorfológica son las mismas para cada subunidad: Cordillera Central, Noroccidente de la Cordillera Central y Valle de Aburrá, respectivamente.

Unidad	Subunidad	Código
Lomos en depósito	Lomos en depósito poco incizados de pendientes muy abruptas y de longitud corta	LdPimac
	Lomos en depósito poco incizados de pendientes escarpadas y longitud corta	LdPiec
	Lomos en depósito incizados de pendientes muy abruptas y de longitud moderada	LdImam
	Lomos en depósito incizados de pendientes escarpadas y de longitud moderada	LdIem
Lomos	Lomos moderadamente incizados de pendientes escarpadas y de longitud moderada	LMiem
	Lomos incizados de pendientes muy escarpadas y de longitud larga	LImel
	Lomos poco incizados de pendientes escarpadas y de longitud corta	LPiec
	Lomos poco incizados de pendientes escarpadas y de longitud moderada	LPiem
Rasgos morfotectónicos	Rasgos morfotectónicos moderadamente incizados de pendientes muy inclinadas	RmMimi
Geoforma antrópica	Geoforma antrópica	Ga

Tabla 11: Unidades y subunidades geomorfológicas

Descripción de unidades y subunidades geomorfológicas

Lomos

Geoformas caracterizadas por filos alargados y estrechos situados a distintas alturas, con una orientación predominante hacia el eje fluvial principal. La parte superior o tope de los lomos puede presentar diversas formas, determinadas por el grado de incisión del drenaje en la zona (Universidad de los Andes, 2016;

SGC, 2015). Se caracteriza por ser un sistema con índice de relieve bajo, cimas alargadas, de topos agudos a redondeados que siguen la tendencia estructural regional, laderas cortas a moderadamente largas, de forma cóncava a rectas y pendientes inclinadas a abruptas.

La unidad se encuentra ubicada hacia el occidente de la cuenca abarcando un 66,74 % del área total. De acuerdo con la pendiente, la longitud de las laderas y el grado de insición; se definen cuatro subunidades que se pueden observar en la siguiente imagen:

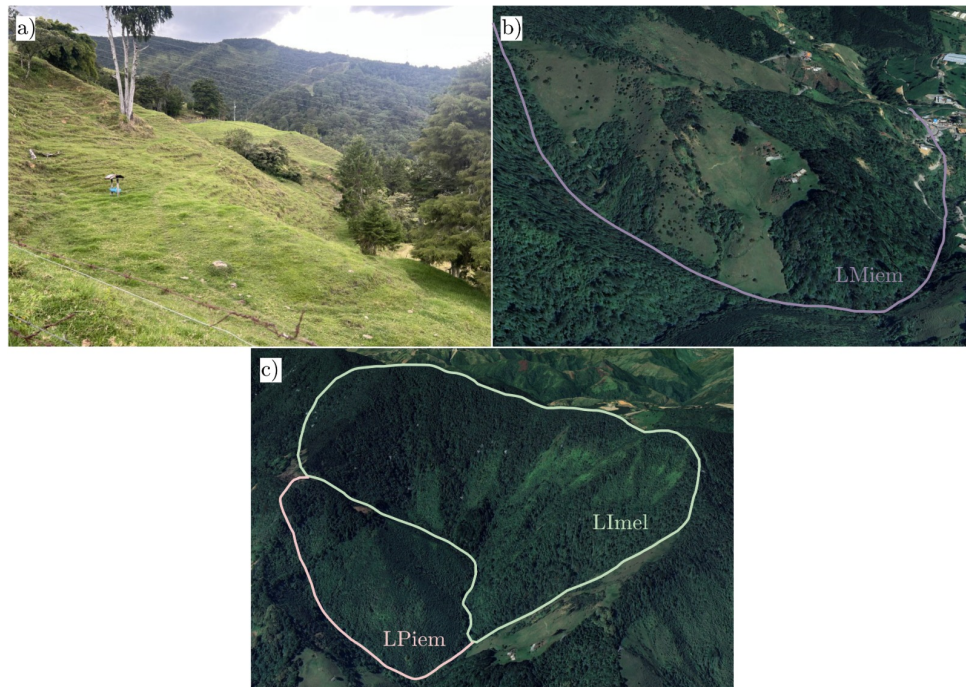


Figura 17: Unidad geomorfológica lomos. Subunidades: a) LPiec; b) LMiem; c) LImel y LPiem.

Lomos en depósito

Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada moldeadas sobre depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y/o escombros, es la forma de las curvas de nivel lo que le da a la identidad de superficie suave en depósitos a esta unidad, son lobuladas y subparalelas tanto en las superficies más planas como en los topos de los lomos de las unidades más incisadas.

Esta unidad se encuentra hacia la parte baja ocupando el 25,6 % de la cuenca; en este trabajo se encuentra dividida en cuatro subunidades que se visualizan en la Figura 18.



Figura 18: Unidad geomorfológica lomos en depósito. Subunidades: a) LdImam; b) LdIem; c) LdPimac y d) LdPiec.

Rasgos morfotectónicos



Figura 19: Rasgo morfotectónico moderadamente incisados de pendientes muy inclinadas.

Son pequeños cuerpos que coinciden con zonas de rasgos tectónicos como lineamientos, fallas y contactos geológicos (Universidad de los Andes, 2016). La unidad ocupa un 5,1 % del área total y se localiza hacia la parte media de la cuenca donde se encuentra concentrada una gran cantidad de viviendas.

Geoformas antrópicas

Están definidas por ser unas unidades recientes y en su totalidad han sido creadas por el hombre a modo de llenos antrópicos. Estas geoformas se localizan como rellenos sanitarios (Universidad de los Andes, 2016). La unidad es la que se encuentra en menor proporción en el área de estudio (2,5 %).



Figura 20: Subnidad geoforma antrópica.

Geología de la cuenca

La geología para la zona de estudio según Universidad de los Andes (2016) (Figura 21a) se dividen en cuatro unidades geológicas. Abarcando mayor área se encuentra el miembro volcánico del Complejo Quebrada Grande (KvQG), que se extiende desde la parte media de la cuenca hasta la parte más alta, por otra parte se presenta el miembro volcanicosedimentario de este mismo Complejo pero localizado únicamente en la parte media de la zona de estudio. Asimismo, se observa una franja en la zona intermedia de la cuenca, que corresponde a los Gabros de Romeral (JgR). Por último con una extensión considerable en la parte baja de la cuenca, se presentan depósitos de flujos y/o lodos con diferentes edades (NQFII y NFpreI) determinadas por su meteorización, su grado de incisión y altura respecto al fondo de las vaguadas (Universidad de los Andes, 2016).

Unidades geológicas

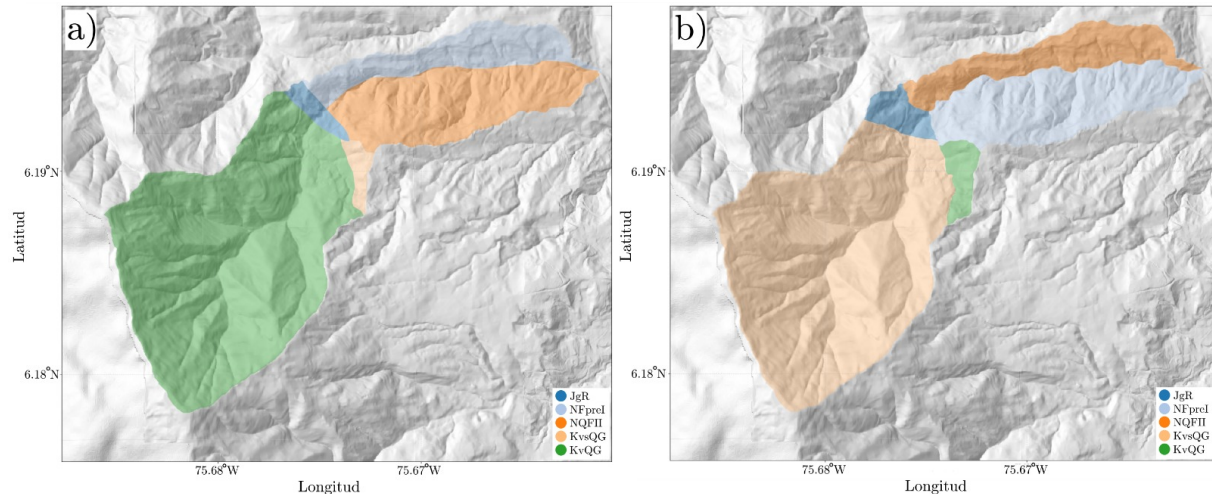


Figura 21: Mapa de unidades geológicas de la cuenca La Despensa. Tomado de a) Universidad de los Andes (2016) y b) editado con recorridos de campo. JgR: Gabros de Romeral; NFprel y NQFII: depósitos de flujos y/o lodos; KvsQG: Miembro volcánicosedimentario de Quebrada Grande. KvQG: Miembro volcánico de Quebrada Grande.

Las unidades geológicas identificadas por Universidad de los Andes (2016) fueron validadas en esta investigación, ya que se observa una coincidencia general con la distribución espacial que plantea el estudio consultado. No obstante, se lleva a cabo una redelimitación de los contactos geológicos entre las distintas unidades para mejorar su precisión, tomando en cuenta nuevas observaciones en campo y actualizaciones en la interpretación geológica de la zona (Figura 21b).

Unidades geológicas superficiales (UGS)

La distribución espacial de cada UGS en la cuenca se observa en la Figura 22.

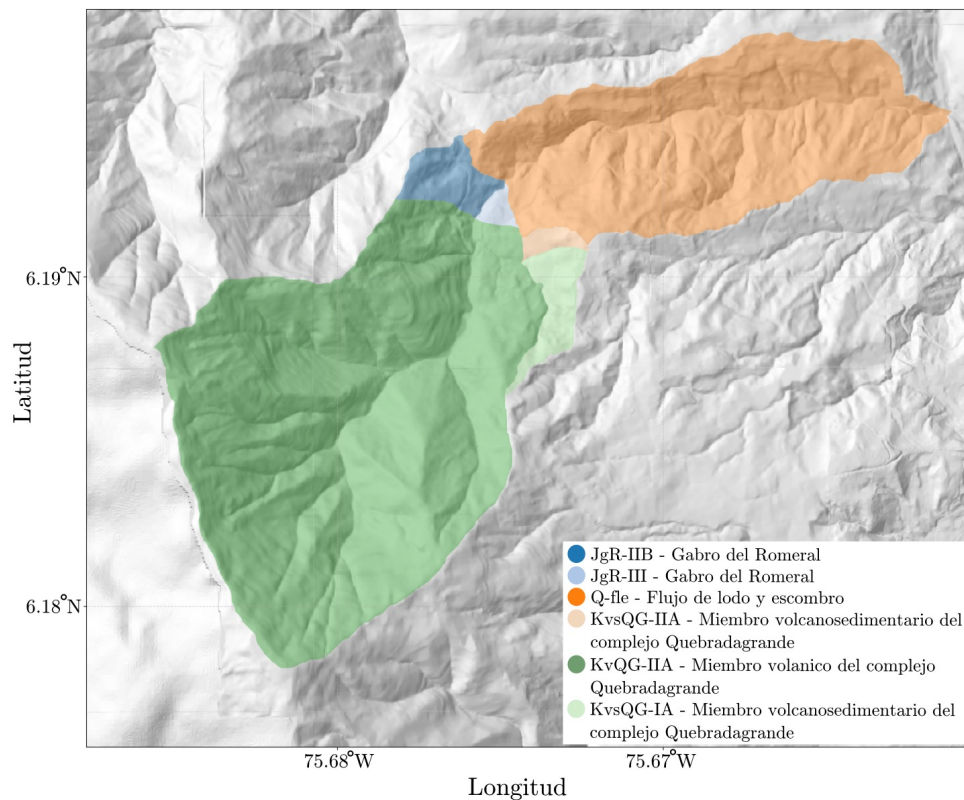


Figura 22: Mapa de UGSs de la cuenca La Despensa.

Suelo residual de roca volcánica

La unidad geológica superficial no pudo ser observada directamente en campo debido a que se extiende a lo largo de toda la parte alta de la cuenca, donde no existe un acceso vehicular y el recorrido a pie es complicado por las altas pendientes y la densa cobertura vegetal, sin embargo, según Universidad de los Andes (2016) esta unidad aflora en el sector presentando una fuerte meteorización representada por el horizonte V (Deere and Patton, 1971).

Los suelos originados son limo arcillosos con algo de arena de color rojo a naranja rojizo. Se observan concentraciones de óxidos de manganeso en los planos de las diaclasas. Tienen una plasticidad de media a baja y una consistencia de media a alta (Universidad de los Andes, 2016) .

Suelo residual de roca volcanosedimentaria

Se localiza hacia la parte media de la cuenca. En general se presenta como una transición entre el horizonte IA - IB (Deere and Patton, 1971) representado por un suelo arcillo-limoso de color café amarillento sin presencia de estructuras que se puedan asociar a la roca parental. En la Figura 23, se observa la transición entre la capa rica en materia orgánica (horizonte IA) y el horizonte IB.

Esta unidad superficial posee una consistencia blanda con una resistencia al corte no drenada entre 20

y 40 kN/m² (Weltman and Head, 1983) y una resistencia a la compresión simple de 0.0025 y 0.05 kPa (ISRM, 1981). El suelo corresponde con una clasificación “CL” según el sistema unificado de clasificación de suelos.

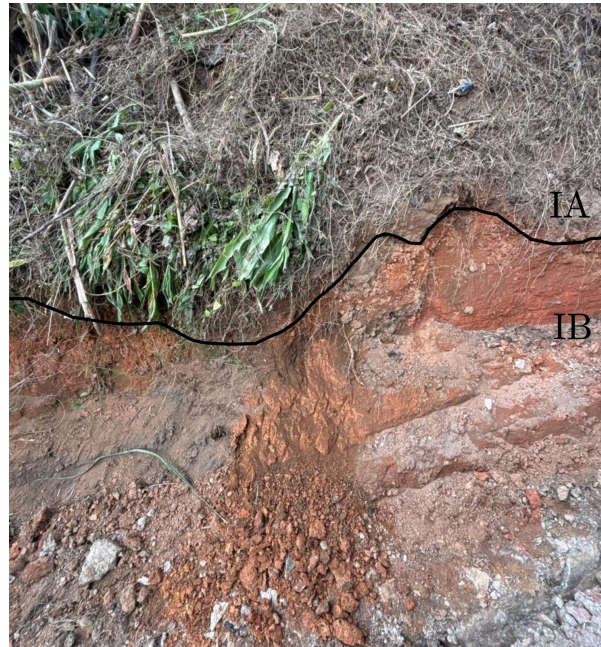


Figura 23: Suelo residual de roca volcanosedimentaria del complejo Quebrada Grande.

Rocas volcanosedimentarias blandas



Figura 24: Roca volcanosedimentaria del complejo Quebrada Grande.

Esta unidad se encuentra conformada por rocas volcanosedimentarias del complejo Quebradagrande, se presenta como una roca altamente meteorizada (horizonte IIA según Deere and Patton (1971)) con fragmentos embebidos en una matriz de suelo limo-arenosa correspondiente al 35-40 % del volumen total (Figura 24).

De acuerdo a las observaciones realizadas y a la tabla de índice de campo para la resistencia a la compresión simple tomada de ISRM (1981) los valores varían entre 1 y 5 MPa, una calidad de macizo rocoso mala y un índice de resistencia geológica (GSI por sus siglas en inglés Geological Strength Index) que se encuentra entre 20-30 (Marinos and Hoek, 2000).

Rocas ígneas intermedias

Esta UGS se encuentra ubicada en la parte media de la cuenca, constituida por gabro compuesto mineralógicamente por piroxeno, anfíboles y feldespatos. La roca se presenta débilmente decolorada ubicandose en el horizonte III según Deere and Patton (1971) (Figura 25).



Figura 25: Roca ígnea del grupo Romeral, horizonte III.

Presenta una resistencia a la compresión simple entre 50 y 100 MPa (ISRM, 1981), en cuanto a la calidad del macizo rocoso este material presenta una calidad buena y un índice de resistencia geológica (GSI) entre 60 - 70 (Marinos and Hoek, 2000).

Rocas ígneas blandas

La UGS se localiza en la parte norte de la zona media de la cuenca, al igual que la unidad anterior se encuentra asociada a los gabros de Complejo del Romeral, sin embargo, presenta una meteorización

mayor ubicándose en el horizonte IIB con un macizo altamente decolorado y con presencia de oxidaciones (Figura 26).



Figura 26: Roca ígnea del grupo Romeral, horizonte IIB.

El material observado presenta una compresión simple entre 25 y 50 Mpa, una calidad mala del macizo rocoso y un GSI entre 30 y 40 según Marinos and Hoek (2000).

Flujos de lodos y escombros

Se presentan como depósitos matriz soportados (relación matriz/bloques: 70 % - 30 %), la matriz presenta un color café rojizo y tamaño de granos arcillolimosos. Se componen principalmente de bloques y fragmentos de rocas ígneas, además, estos se presentan mayormente con formas subangulares y subredondeados con tamaños que varían entre 10 y 50 centímetros. Estos depósitos se extienden sobre la parte baja de la cuenca (Figura 27).

El suelo presenta un rango aproximado de resistencia a la compresión simple de 0.05 - 0.10 Mpa y una resistencia al corte no drenada entre 20 - 40 kN/m².

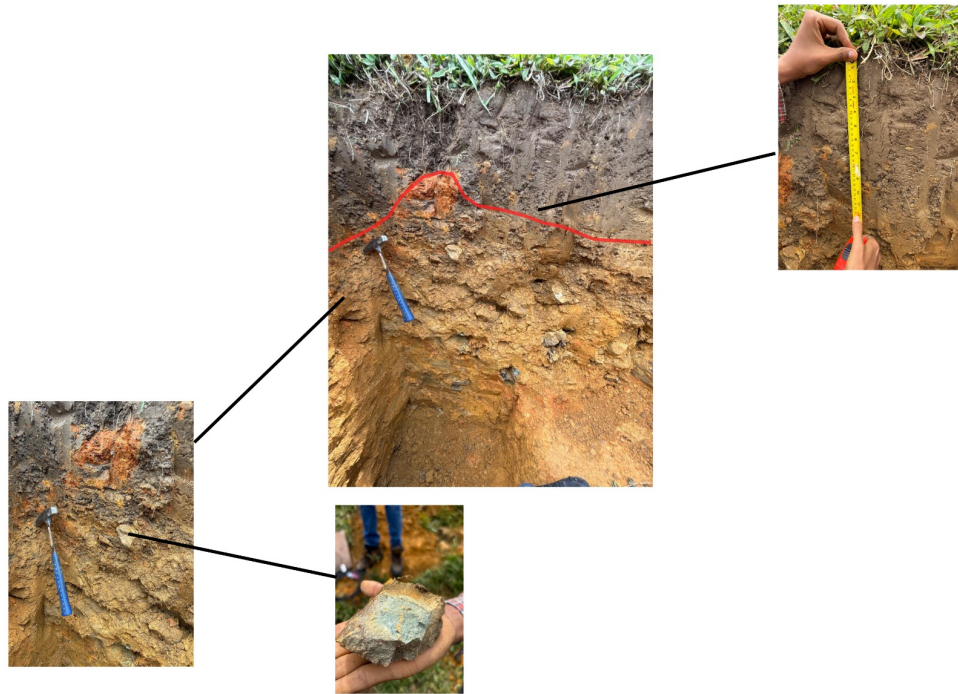


Figura 27: Depósito de flujo de lodos y escombros.

Inventario de procesos morfodinámicos

En la Figura 28 muestra la distribución espacial de los 88 procesos morfodinámicos presentes en la cuenca según el inventario elaborado por el Área Metropolitana. Se observa una concentración significativa de estos procesos en la parte baja de la cuenca.

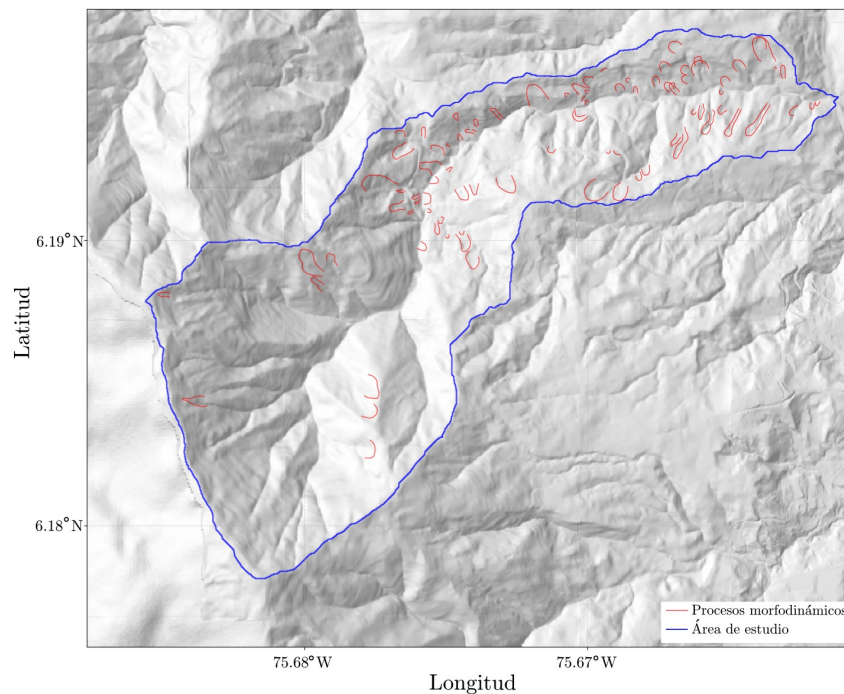


Figura 28: Procesos morfodinámicos presentes en la cuenca La Despensa tomados del convenio entre el AMVA y UNAL

Posteriormente, el inventario se amplía con 47 nuevos procesos identificados a partir de la revisión de imágenes satelitales capturadas entre 2018 y 2024, utilizando las plataformas Planet Labs y Google Earth. Además, se añaden 21 procesos adicionales mediante recorridos de campo, permitiendo también la validación de los eventos ya digitalizados y la identificación de eventos no detectables a través de imágenes satelitales. Algunos de estos procesos se ilustran en las imágenes que se presentan a continuación.



Figura 29: Procesos morfodinámicos identificados a lo largo de los recorridos de campo

Se obtienen un total de 156 procesos registrados que se observan en la Figura 30, es importante mencionar que más del 80 % se localizan en la parte baja de la cuenca. Es importante señalar que los procesos del inventario del Área Metropolitana están delimitados por sus coronas. Dado que se requiere puntos para la implementación de machine learning en lugar de líneas, se opta por representar cada proceso mediante el punto medio de su corona.

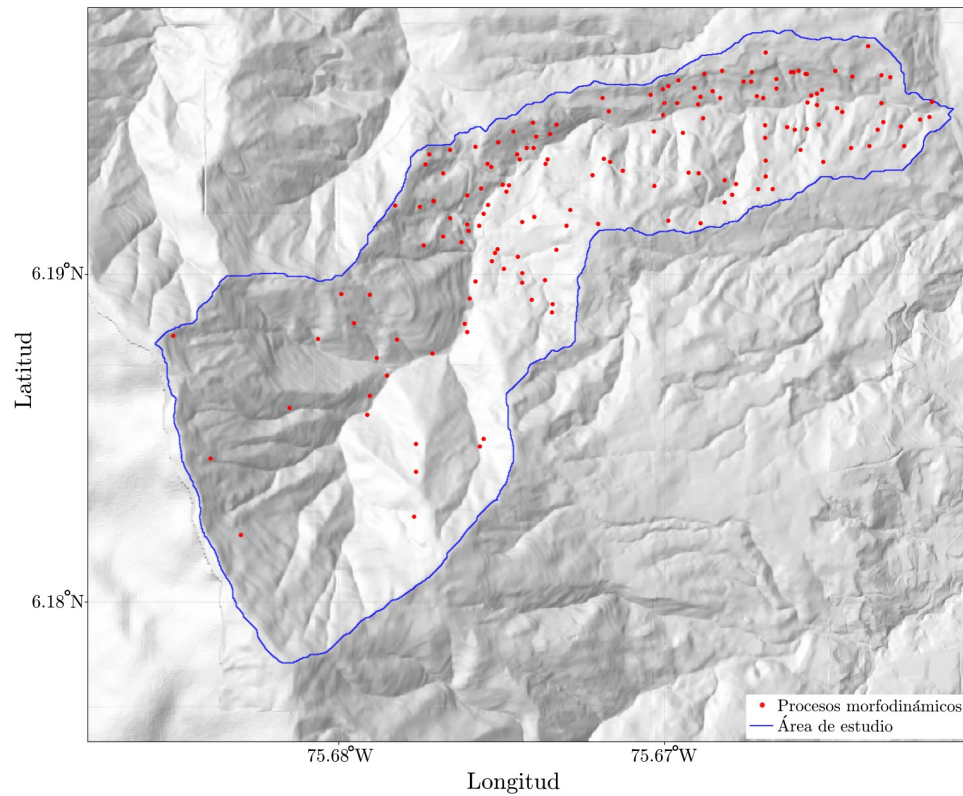


Figura 30: Procesos morfodinámicos finales identificados en la cuenca La Despensa

En la Figura 31 se presenta un resumen de la distribución de estos procesos por fuentes consultadas.

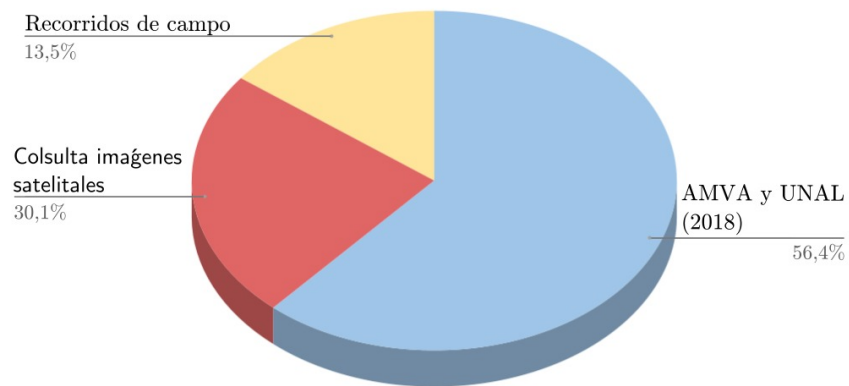


Figura 31: Distribución de los procesos morfodinámicos presentes en la cuenca La Despensa discriminados por fuente de consulta.

Modelación

El modelo SHALSTAB

Se logra una adecuada implementación del modelo SHALSTAB en el área piloto utilizando tanto los parámetros geotécnicos originales de la Microzonificación Sísmica del 2016 como las unidades geotécnicas finales obtenidas a partir del análisis estadístico de dichos parámetros. Las categorías comunes para todos los resultados del modelo son las condiciones de estabilidad incondicional y las condiciones de inestabilidad incondicional. Las zonas estables incondicionalmente representan las condiciones del terreno que no se espera que presenten ninguna inestabilidad, incluso en condiciones saturadas o durante eventos extremos de precipitación. Estas zonas están asociadas principalmente con pendientes muy bajas. Por otro lado, las zonas inestables incondicionalmente representan las condiciones del terreno en las que se espera una falla en cualquier momento, independientemente de las condiciones de precipitación y saturación del suelo. Estas zonas están relacionadas con pendientes altas en las que los parámetros de resistencia del suelo no son suficientes para mantener la estabilidad.

Índice de estabilidad $\log(q/T)$

Las Figuras 32a y 32b muestran las condiciones de susceptibilidad según el índice de estabilidad $\log(q/T)$ para la cuenca La Despensa a escala de pixel y de ladera respectivamente. Este índice tiene una relación directamente proporcional con la estabilidad, siendo los valores más bajos indicativos de las condiciones más críticas de inestabilidad, mientras que los valores más altos indican condiciones más estables.

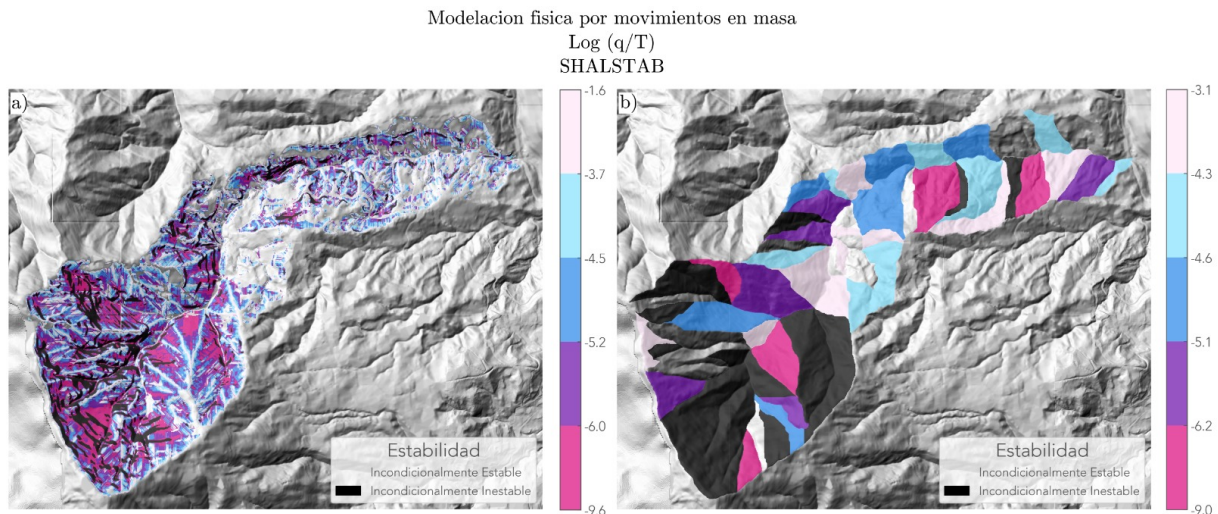


Figura 32: $\log(q/T)$ para la cuenca La Despensa. a) Escala de pixel y b) Escala de ladera

Estabilidad ante un escenario de precipitación

En las Figuras 33 y 34 se presentan las condiciones de estabilidad ante un escenario de precipitación de 15 mm/día a escala de pixel y unidad de ladera respectivamente, donde se observa la gran diferencia en el modelo con el uso de los parámetros originales establecidos en la Microzonificación Sísmica (Figura 33a y Figura 34a) vs los parámetros obtenidos del análisis estadístico (Figura 33b y Figura 34b); además en la Tabla 12 se detallan los porcentajes que abarca cada una de las condiciones de estabilidad en la cuenca.

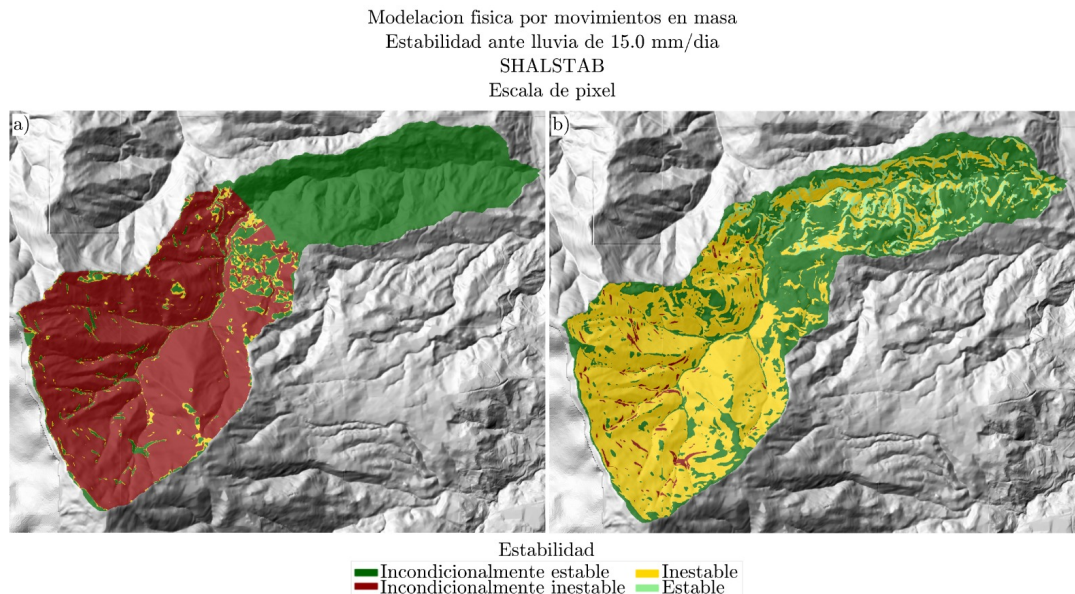


Figura 33: Estabilidad a escala de pixel ante una precipitación en estado estacionario de 15 mm/día en la cuenca La Despensa. a) Parámetros geotécnicos originales, b) Parámetros geotécnicos resultantes del análisis

Tabla 12: Distribución de áreas en condiciones de susceptibilidad ante un evento de precipitación de 15 mm/día en la cuenca La Despensa a escala de pixel.

Condición	Parámetros geotécnicos originales	Parámetros geotécnicos resultantes del análisis
Incondicionalmente estables	37.22 %	38.96 %
Incondicionalmente inestables	59.13 %	1.59 %
Inestables	3.58 %	53.98 %
Estables	0.07 %	5.47 %

A escala de ladera se observa en la Figura 34 estas mismas condiciones de estabilidad y en la Tabla 13 se detallan las diferencias entre la modelación con parámetros originales y procesados.

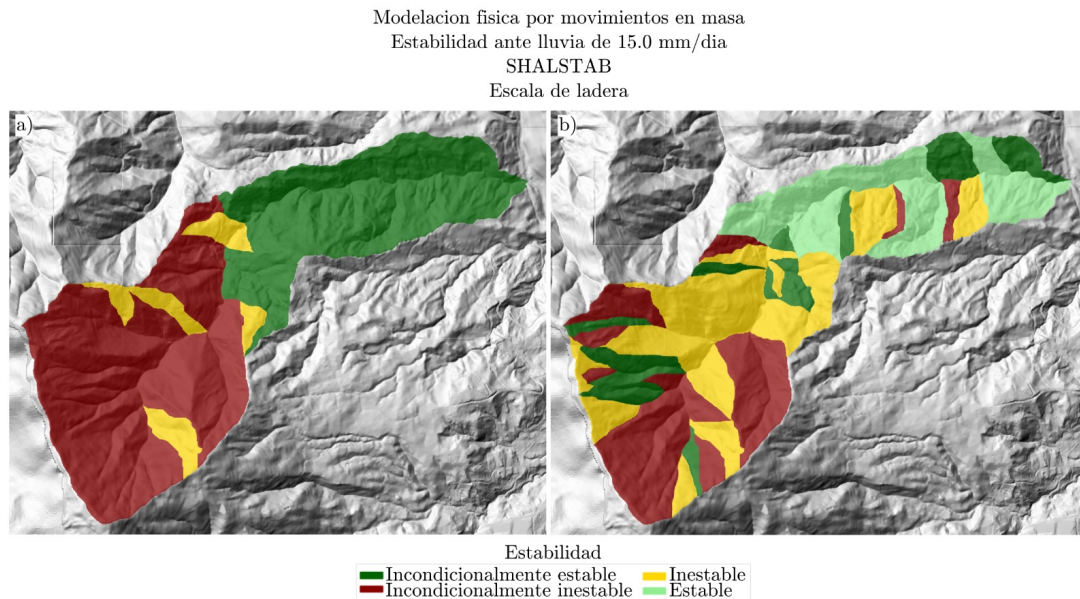


Figura 34: Estabilidad a escala de ladera ante una precipitación en estado estacionario de 15 mm/día en la cuenca La Despensa. a) Parámetros geotécnicos originales, b) Parámetros geotécnicos resultantes del análisis

Tabla 13: Distribución de áreas en condiciones de susceptibilidad ante un evento de precipitación de 15 mm/día en la cuenca La Despensa a escala de ladera.

Condición	Parámetros geotécnicos originales	Parámetros geotécnicos resultantes del análisis
Incondicionalmente estables	38.70 %	8.33 %
Incondicionalmente inestables	53.23 %	1.50 %
Inestables	8.07 %	84.17 %
Estables	0.00 %	6.00 %

Lluvia crítica

La Figura 35 muestra la lluvia crítica requerida para generar condiciones de inestabilidad en cada celda y unidad de ladera. Se observa que los valores más bajos de lluvia corresponden a las áreas con mayor potencial de falla, y por lo tanto, se encuentran cercanas a las zonas incondicionalmente inestables en las pendientes más altas.

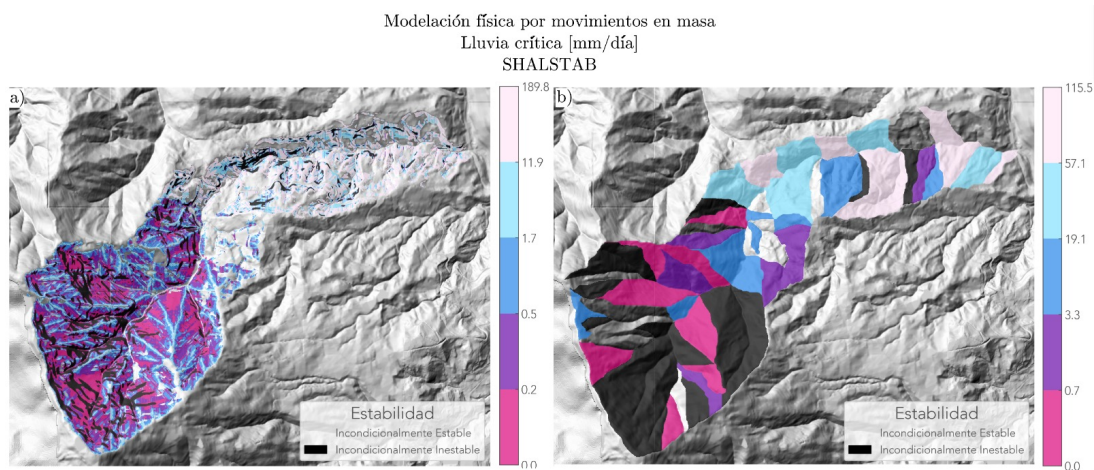


Figura 35: Lluvia crítica.

Modelación probabilística de estabilidad

El análisis se focalizó en el sector de Las Playas, ubicado en San Antonio de Prado, utilizando como entrada la precipitación promedio semanal (radar) registrada previa al evento de deslizamiento. Los resultados del modelo probabilístico muestran una clara correspondencia entre las predicciones y el evento real ocurrido.

Como se observa en la Figura 36, la zona donde se registró el deslizamiento (destacada en azul) presenta probabilidades de inestabilidad superiores al 85 %.

Probabilidad de inestabilidad Precipitación promedio: 2.57 mm/día Las Playas

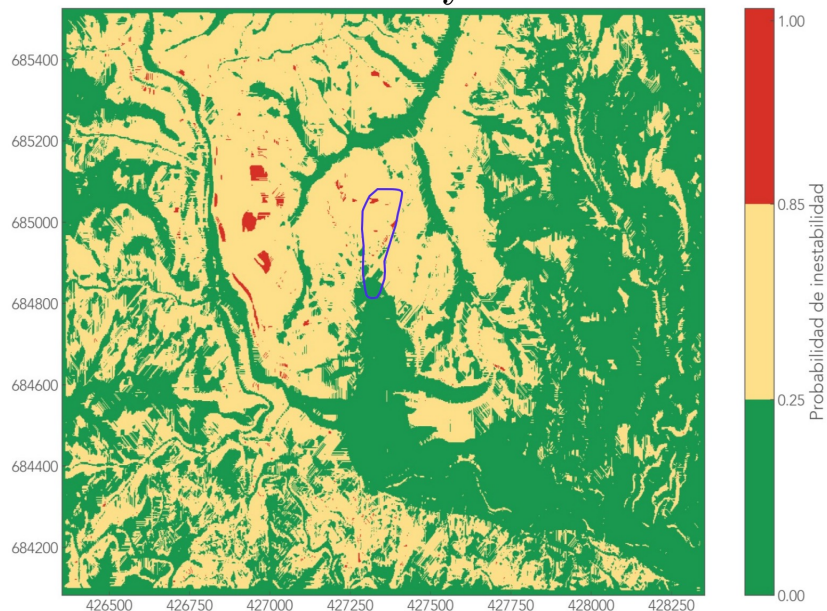


Figura 36: Mapa de probabilidad de inestabilidad en el sector Las Playas. La zona azul corresponde al área del deslizamiento.

Validación de la modelación probabilística con eventos de temporada de lluvia en el mes de mayo

Como complemento a la validación puntual realizada en el sector Las Playas, se efectuó un análisis adicional sobre tres zonas del Valle de Aburrá que registraron movimientos en masa durante eventos recientes de lluvia intensa. Estas zonas corresponden a:

- San Isidro, Sabaneta
- Loma Los Balsos, Medellín
- Los Olivares, Itagüí

En los sectores de San Isidro y Loma Los Balsos se observó una alta correspondencia entre los sitios afectados y las zonas con mayor probabilidad de inestabilidad (valores superiores al 85 %), lo cual respalda la capacidad del modelo para identificar zonas susceptibles en condiciones similares (Figura 37).

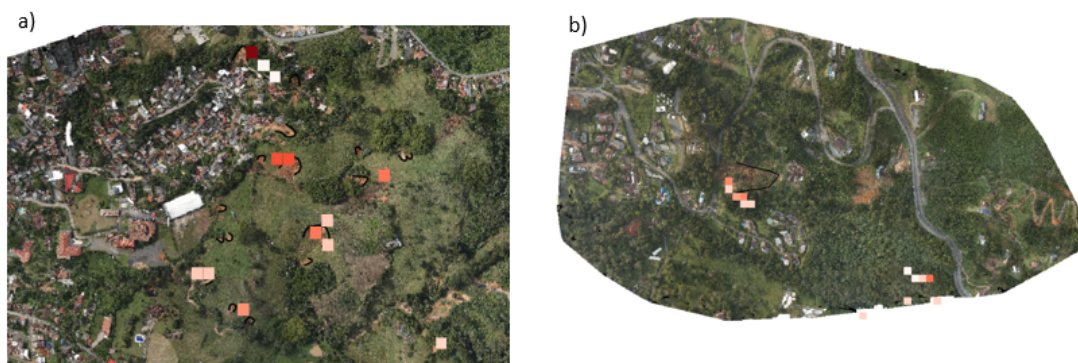


Figura 37: Casos efectivos de validación del modelo probabilístico, a) San Isidro, Sabaneta y b) Loma Los Balsos, Medellín

Sin embargo, en la Figura 38 se aprecia que en el sector de Los Olivares no se observa una efectividad clara entre las predicciones del modelo y los eventos registrados, lo que señala la necesidad de cambiar el enfoque actual. Una posible causa es la variabilidad en las características del suelo: algunos sectores presentan suelos más finos con respuestas lentas a la infiltración, otros presentan materiales más granulares, afectando la acumulación de agua. Además, el uso de la lluvia acumulada semanal previa al evento (seleccionada de manera arbitraria) puede no ser adecuada para todos los tipos de suelo, ya que las respuestas hidrológicas difieren significativamente. Por tanto, se propone ajustar la temporalidad de la lluvia de entrada en función del tipo de suelo dominante, para mejorar la precisión predictiva del modelo en diferentes contextos geotécnicos.



Figura 38: Caso fallido del modelo probabilístico en Los Olivares, Itagüí

Zonificación morfodinámica mediante análisis estadístico

Estimación de densidad de Kernel y diagrama de caja

Las Figuras 39 y 40 presentan una serie de gráficos de Estimación de Densidad de Kernel (KDE) y diagramas de caja (boxplots) para cada una de las variables para ambos análisis. Estos gráficos KDE proporcionan una visualización suavizada de la distribución de los datos, permitiendo una comparación intuitiva entre las unidades de ladera y pixeles en donde se han desarrollado procesos morfodinámicos (representadas en rojo) y en las que no se han desarrollado (en azul). Los diagramas de caja complementarios ofrecen una visión resumida de la mediana, los cuartiles y los valores atípicos para cada variable.

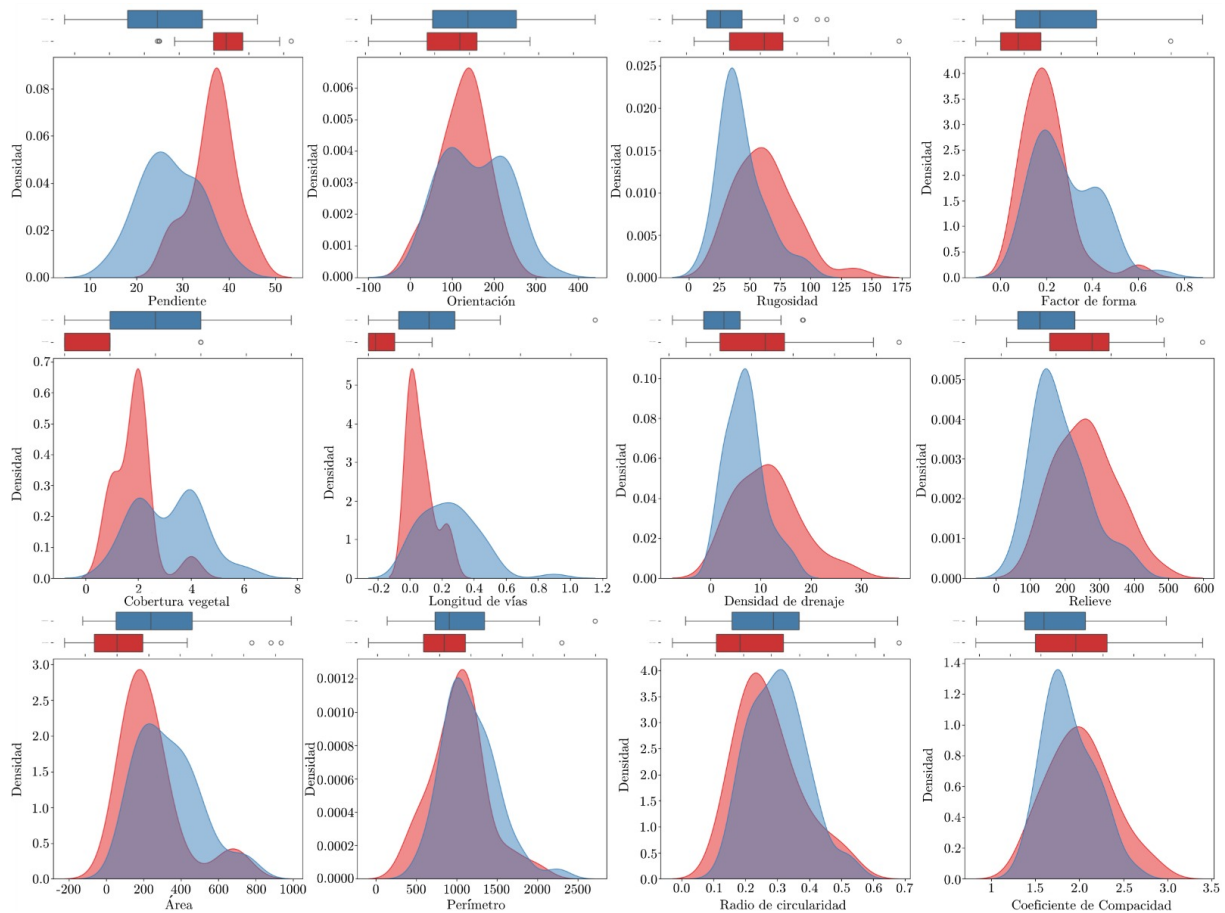


Figura 39: Estimación de densidad de Kernel y diagramas de caja para cada variable en análisis a escala de unidad de ladera.

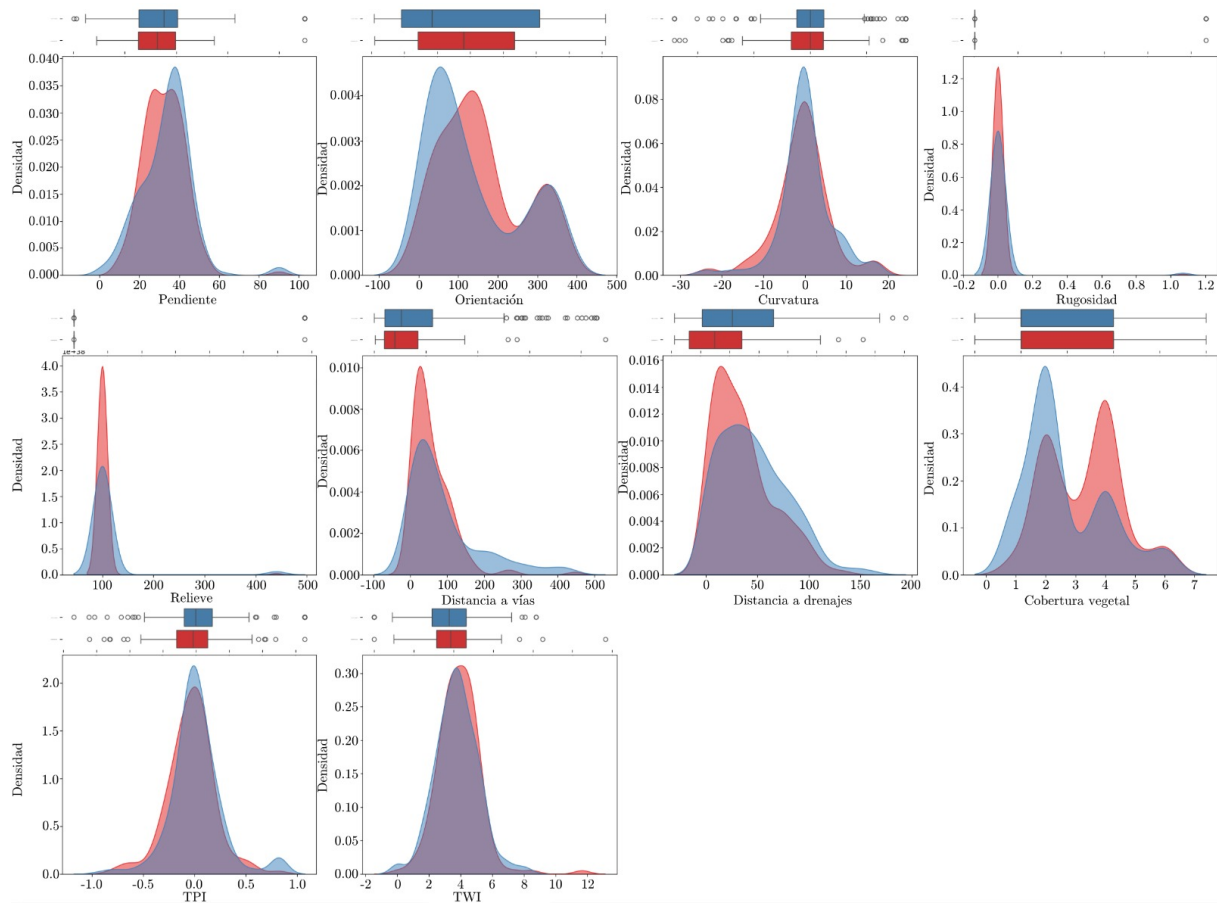


Figura 40: Estimación de densidad de Kernel y diagramas de caja para cada variable en análisis a escala de pixel.

A continuación, se presenta un análisis detallado de las distribuciones observadas en estos gráficos KDE de cada variable en cada uno de los análisis.

Análisis a escala de ladera (Figura 39)

- **Pendiente:** Las unidades con procesos morfodinámicos (azul) muestran una distribución bimodal con picos alrededor de 20° y 30°. Las unidades sin procesos (rojo) tienen una distribución unimodal con un pico más pronunciado cerca de los 40°, indicando pendientes generalmente más pronunciadas.
- **Orientación:** Las unidades con procesos morfodinámicos presentan una distribución bimodal con picos alrededor de 75° y 250°, mostrando una mayor variabilidad en orientaciones. En contraste, las unidades sin procesos exhiben una distribución unimodal con un pico pronunciado cerca de 150°, indicando una orientación más consistente. La distribución de las unidades con procesos se extiende más hacia orientaciones mayores (hasta 400°), mientras que las unidades sin procesos se concentran principalmente entre 0° y 250°.
- **Rugosidad:** Exhibe valores de rugosidad generalmente más altos para las unidades sin presencia

de procesos, con un pico pronunciado cerca de 60 y extendiéndose hasta 175. Las unidades con procesos en cambio muestran valores más bajos, concentrados alrededor de 40.

- **Factor de forma:** Presenta una distribución bimodal para unidades con presencia de procesos con picos pronunciados en 0.2 y 0.5. Las unidades sin procesos muestran una distribución más estrecha con un pico más pronunciado cerca de 0.2, indicando que aquellas unidades de ladera donde se presentan procesos tienden a ser mas unifomes.
- **Cobertura Vegetal:** Presenta una distribución unimodal para áreas sin procesos morfodinámicos, generando un pico en zonas de plantación forestal. En contraste, las unidades con procesos muestran una distribución bimodal en la que se observan que las coberturas en las que se producen mayor cantidad de procesos son las 2 y la 4, es decir, plantación forestal y pasto disperso.
- **Longitud de Vías:** Exhibe una distribución unimodal asimétrica positiva para ambas categorías. Las áreas con presencia de procesos tienden a tener mayo cantidad de vías, mientras aquellas unidades en las que no se producen tienden a tener muy pocas construcciones de vías.
- **Densidad de Drenaje:** Muestra una distribución unimodal para ambas categorías, con formas muy similares, se observa que la ocurrencia de procesos morfodinámicos ocurre ante una menor presencia de drenajes.
- **Relieve:** Muestra una distribución unimodal para ambas categorías, con formas muy similares, se observa que la ocurrencia de procesos morfodinámicos ocurre ante una menor presencia de drenajes.
- **Área:** Las distribuciones son bastante similares, con una ligera tendencia hacia áreas más grandes para las unidades con procesos morfodinámicos.
- **Perímetro:** Ambas distribuciones son similares y unimodales, con un ligero desplazamiento hacia valores más altos para las unidades con procesos morfodinámicos.
- **Radio de circularidad:** Las unidades con procesos morfodinámicos tienden a tener valores más altos, con un pico alrededor de 0.3-0.4. Las unidades sin procesos tienen una distribución más estrecha con valores generalmente más bajo, sin embargo, amabas distribuciones son similares.
- **Coefficiente de compacidad:** Las unidades sin procesos morfodinámicos muestran una tendencia hacia valores más altos de coeficiente de compacidad, con una distribución que se extiende hasta aproximadamente 2.5-3.0, mientras que las unidades con procesos se concentran en valores más bajos.

Las distribuciones unimodales en variables como pendiente y rugosidad sugiere que estas podrían ser indicadores de susceptibilidad a procesos morfodinámicos. En contraste, las distribuciones bimodales en variables como orientación y cobertura vegetal para áreas con procesos morfodinámicos indican la presencia de subgrupos o categorías. Además, las distribuciones con formas similares pero desplazadas, como la rugosidad y relieve sugieren una tendencia con un solapamiento considerable entre las dos categorías. Por otro lado, las distribuciones casi idénticas en coeficiente de compacidad, perímetro y área indican que estas variables podrían no ser discriminantes fuertes para la susceptibilidad a procesos morfodinámicos cuando se consideran por sí solas.

Análisis a escala de pixel (Figura 40)

- **Pendiente:** Las distribuciones para ambas categorías son unimodales y bastante similares, con un pico alrededor de los 35-40°. Sin embargo, las unidades con procesos morfodinámicos muestran una

distribución ligeramente más amplia, extendiéndose hasta los 60° , mientras que las unidades sin procesos tienen una distribución más concentrada. Copy

- **Orientación:** Se observa una distribución bimodal para las unidades con procesos morfodinámicos, con picos alrededor de 50° y 300° . Las unidades sin procesos muestran una distribución más compleja con dos picos principales cerca de los 100° y 300° , siendo el segundo pico más pronunciado. La distribución se extiende aproximadamente desde -100° hasta 400° .
- **Curvatura:** Ambas categorías muestran una distribución unimodal simétrica centrada cerca de 0, con colas que se extienden desde -30° hasta 20° . Las unidades con procesos morfodinámicos presentan una distribución ligeramente más amplia.
- **Rugosidad:** Las distribuciones son muy similares para ambas categorías, mostrando una forma unimodal concentrada cerca de 0, con una cola que se extiende hasta aproximadamente 1.2. La superposición entre ambas distribuciones es casi completa.
- **Relieve:** Las distribuciones son unimodales para ambas categorías, con un pico pronunciado alrededor de 100-150. Las unidades con procesos morfodinámicos muestran una distribución ligeramente más amplia, extendiéndose hasta valores cercanos a 500.
- **Distancia a vías:** Ambas categorías presentan una distribución asimétrica positiva, con un pico pronunciado cerca de 0. Las unidades con procesos morfodinámicos muestran una cola más larga, extendiéndose hasta aproximadamente 500 metros, mientras que las unidades sin procesos tienen una distribución más concentrada.
- **Distancia a drenajes:** Las distribuciones son asimétricas positivas para ambas categorías. Las unidades con procesos morfodinámicos muestran una distribución más amplia que se extiende hasta aproximadamente 200 metros, mientras que las unidades sin procesos tienen una distribución más concentrada en valores menores.
- **Cobertura vegetal:** Se observa una distribución multimodal para ambas categorías, con tres picos principales alrededor de los valores 1, 3 y 5. Las unidades con procesos morfodinámicos muestran picos más pronunciados en estos valores, mientras que las unidades sin procesos tienen una distribución más uniforme.
- **TPI:** Las distribuciones son unimodales y simétricas para ambas categorías, centradas cerca de 0, con una ligera asimetría hacia valores positivos. La superposición entre ambas distribuciones es considerable.
- **TWI:** Ambas categorías muestran una distribución unimodal con un pico pronunciado alrededor de 4-5. Las distribuciones son casi idénticas, con una ligera asimetría positiva y colas que se extienden hasta aproximadamente 12.

En general a nivel de pixel, se observa que muchas de las variables muestran distribuciones similares entre las unidades con y sin procesos morfodinámicos, con diferencias sutiles en la forma y extensión de las distribuciones. Las variables que muestran mayores diferencias son la orientación, la distancia a vías y drenajes, y la cobertura vegetal.

Matriz de correlación entre variables

En la Figura 41 se observa que en el análisis a nivel de ladera las correlaciones más significativas en la matriz son: una correlación muy alta (0.98) entre Relieve y Factor de forma, una fuerte correlación

(0.85) entre Perímetro y Área, una correlación perfecta negativa (-1.00) entre Radio de Circularidad y Coeficiente de Compacidad, y correlaciones moderadas a fuertes del Factor de forma con Radio de Circularidad (0.79) y Coeficiente de Compacidad (-0.79). Por su parte en la Figura 42 se visualiza a nivel de píxel, correlaciones significativas: una correlación perfecta (1.00) entre Rugosidad y Pendiente, una correlación alta (0.91) entre Relieve y Rugosidad, TPI y Cobertura vegetal y Relieve y Rugosidad.

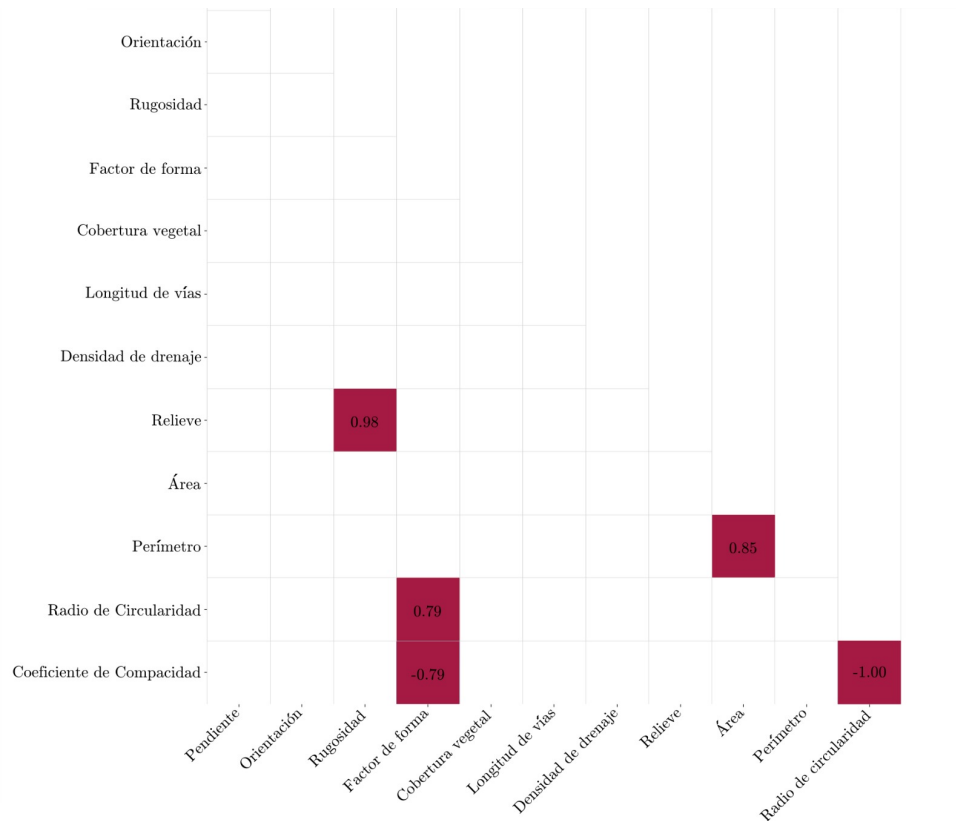


Figura 41: Matriz de correlación entre variables usadas para el análisis morfodinámico de las unidades de ladera.

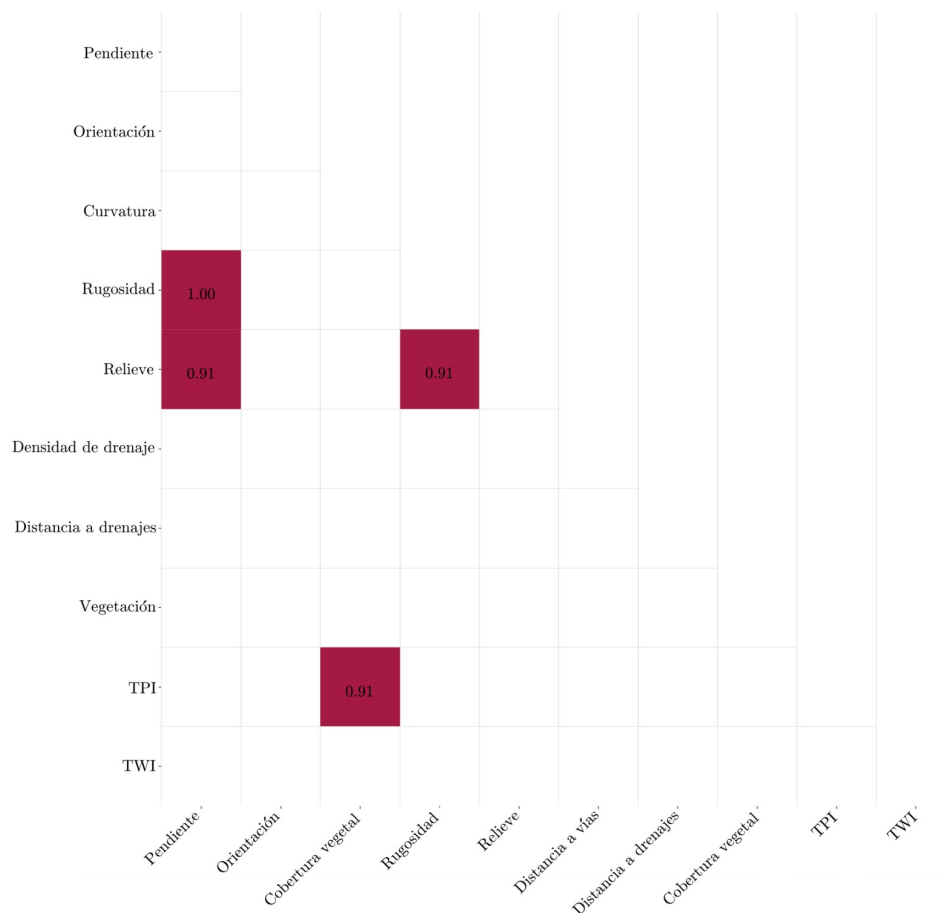


Figura 42: Matriz de correlación entre variables usadas para el análisis morfodinámico a escala de pixel.

Estas altas correlaciones indican multicolinealidad entre dichas variables, lo que sugiere la necesidad de seleccionar cuidadosamente qué variables retener para el análisis posterior, utilizando pruebas ANOVA y el factor FIV para tomar decisiones informadas y evitar redundancia en los modelos.

Análisis de varianza (ANOVA)

En la tabla 14 se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para todas las variables. Las variables que fueron descartadas son aquellas que mostraron un valor de p superior a 0.05, lo que indica que no presentan diferencias significativas entre los grupos. Estas variables se encuentran en la tabla resaltadas en amarillo.



Tabla 14: Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para las variables usadas en el análisis morfo-dinámico a ambas escalas.

Variable	Análisis ladera valor p	Análisis pixel valor p
Pendiente	$4,95 \times 10^{-9}$	$3,50 \times 10^{-2}$
Orientación	$8,89 \times 10^{-2}$	$4,10 \times 10^{-2}$
Curvatura		$1,80 \times 10^{-1}$
Rugosidad	$2,84 \times 10^{-4}$	$3,90 \times 10^{-1}$
Factor de forma	$6,28 \times 10^{-3}$	
Relieve	$3,82 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-1}$
Área	$2,59 \times 10^{-2}$	
Perímetro	$1,04 \times 10^{-1}$	
Radio de circularidad	$2,06 \times 10^{-1}$	
Coefficiente de compacidad	$9,73 \times 10^{-2}$	
Cobertura vegetal	$3,16 \times 10^{-6}$	4×10^{-6}
Densidad de drenaje	$2,41 \times 10^{-4}$	
Distancia a vías		$2,03 \times 10^{-4}$
Distancia a drenajes		$1,18 \times 10^{-3}$
Longitud de vías	$4,42 \times 10^{-6}$	
TPI		$3,80 \times 10^{-2}$
TWI		$3,46 \times 10^{-1}$

De esta manera en el análisis de ladera se descartan 3 de las variables que presentaban altas correlaciones: perímetro, radio de circularidad y coeficiente de compacidad, además, la orientación cuyo valor de p es de 0.089. Por su parte a escala de pixel las variables descartadas son curvatura, rugosidad, relieve y el TWI (Figura 41).

Factor de inflación de la varianza (FIV)

La determinación de este factor se calcula con especial atención en las variables rugosidad y relieve en el análisis de unidad de ladera, las cuales muestran una alta correlación en el análisis previo (Figura 41). Se procede a calcular el FIV de ambas variables y del resto de las variables restantes. Una vez obtenido dicho factor, se descarta la variable con el FIV más alto, lo que contribuye a reducir la multicolinealidad y a mejorar la estabilidad del modelo estadístico. Cabe mencionar que para el análisis a nivel de pixel esta prueba no fue necesaria ya que con la prueba anterior se lograron descartar las variables que presentan altas correlaciones.

Los valores FIV para cada variable se presentan en la Tabla 15 , donde se observa resaltadas de color amarillo las variables a descartar.

Tabla 15: Valores de FIV para las variables restantes del análisis morfodinámico de las unidades de ladera.

Variable	FIV
Pendiente	4.65
Rugosidad	23.37
Factor de forma	4.12
Relieve	38.84
Área	6.59
Cobertura vegetal	1.46
Densidad de drenaje	1.26
Longitud de vías	2.04

Como se puede observar las variables descartadas son relieve y área, ambas con valores por encima de 5. Cabe mencionar, que para descartar entre rugosidad y relieve (variables con correlación alta) se toma aquella que tenga un FIV mayor.

Modelo XGBoost

El modelo XGBoost se implementa inicialmente utilizando todas las variables disponibles, sin realizar una discriminación previa. Este enfoque inicial produce resultados que no concuerdan con la realidad observada en el terreno. El modelo muestra un rendimiento subóptimo, con una precisión (accuracy) por debajo de 0.70, lo que indica una capacidad limitada para predecir correctamente la susceptibilidad a procesos morfodinámicos en la cuenca.

La baja precisión y la falta de correspondencia con las condiciones reales del terreno sugieren que el modelo está sobreajustado o que está considerando variables que no son relevantes para la predicción de la susceptibilidad. Este resultado inicial subraya la importancia de realizar una selección cuidadosa de las variables predictoras.

Tras la discriminación de variables basada en los análisis ANOVA y FIV previamente descritos, se procede a entrenar un nuevo modelo XGBoost utilizando únicamente las variables seleccionadas. Este enfoque más refinado produce una mejora significativa en el rendimiento del modelo. La precisión del modelo optimizado supera el 0.90 para el análisis a escala de ladera y mayor a 0.75 a nivel de pixel, lo que representa un aumento sustancial en comparación con los modelos iniciales.

En la Figura 43 se observa el mapa que representa la probabilidad de ocurrencia de procesos morfodinámicos a nivel de ladera.

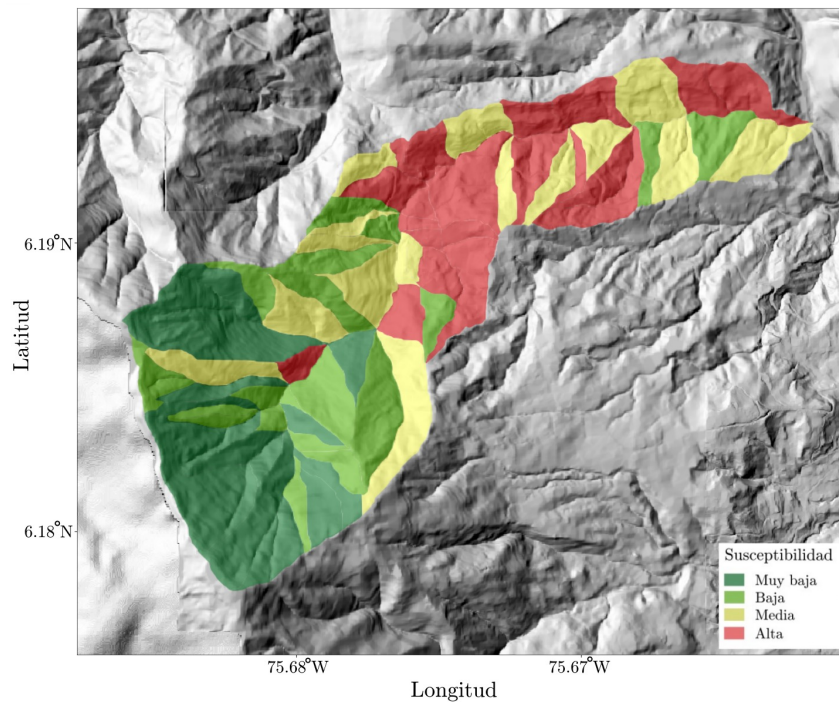


Figura 43: Mapa de zonificación morfodinámica a escala de ladera usando modelo XGBoost

Los umbrales definidos para determinar las 3 categorías en el mapa a escala de pixel se basa en las métricas obtenidas de la Curva ROC. Esta curva es un gráfico cartesiano bidimensional que describe el rendimiento y la eficacia de un modelo, mostrando la tasa de verdaderos positivos (eje y: TPR) contra la tasa de falsos positivos (eje x: 1-TNR) para diferentes escenarios de probabilidad.

Por ejemplo, un TPR del 95 % indica que el modelo identifica correctamente el 95 % de las áreas donde efectivamente ocurrieron deslizamientos. En otras palabras, de cada 100 zonas que presentaron deslizamientos en la realidad, el modelo es capaz de identificar correctamente 85 de ellas como áreas susceptibles. Por otro lado, el TNR evalúa la capacidad del modelo para identificar correctamente las áreas sin deslizamientos, es decir, la proporción de zonas correctamente clasificadas como estables (que no superan el umbral de susceptibilidad) entre todas las áreas observadas sin deslizamientos. En este caso, un TNR del 95 % significa que de cada 100 zonas que en realidad no presentaron deslizamientos, el modelo clasifica correctamente 85 de ellas como áreas no susceptibles. En la 45 se visualiza la susceptibilidad a escala de pixel con los dos umbrales definidos por la Curva ROC, que se muestran en el gráfico de la Figura 44.

Las categorías de susceptibilidad quedan finalmente distribuidas de la siguiente manera:

- **Susceptibilidad Baja:** < 0.23
- **Susceptibilidad Media:** $0.25 - 0.84$
- **Susceptibilidad Alta:** > 0.84

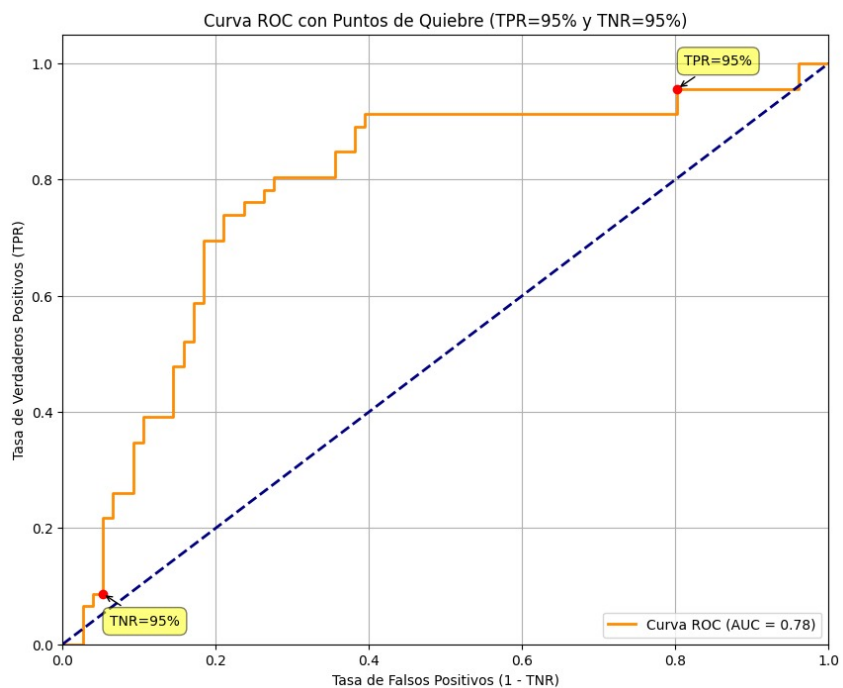


Figura 44: Curva ROC del rendimiento del modelado a nivel de pixel. Los puntos representan los umbrales hallado con un TPR de 95 %, y TNR de 95 %.

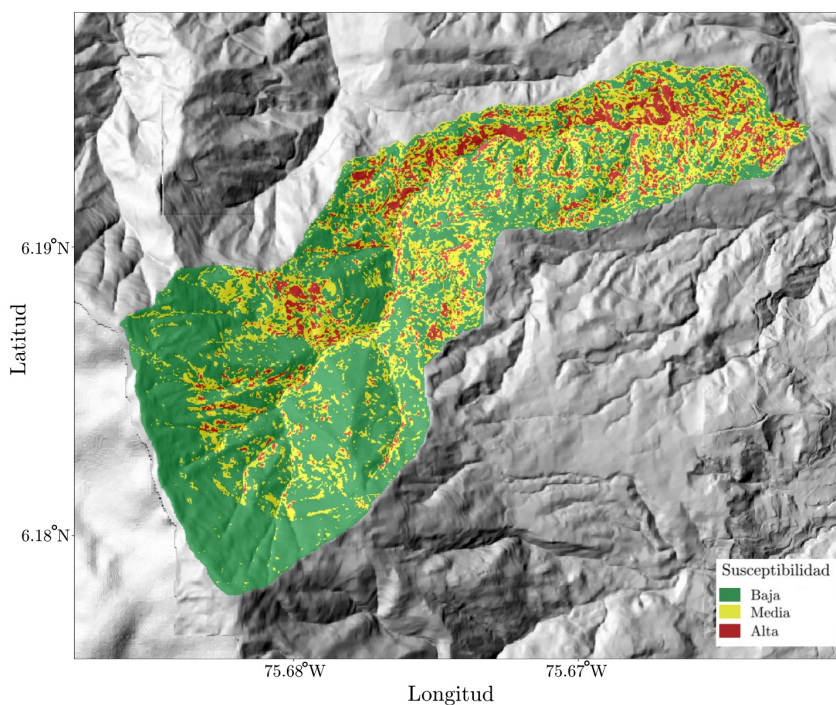


Figura 45: Mapa de zonificación morfodinámica a escala de pixel usando modelo XGBoost

Estos mapas, generados a partir del modelo XGBoost optimizado, ofrecen una visualización clara y detallada de la distribución espacial de la susceptibilidad en toda el área de estudio. Las variaciones en la probabilidad se representan mediante una escala de colores, permitiendo una rápida identificación de las zonas de mayor riesgo.

Los resultados obtenidos tanto a escala de ladera como a nivel de pixel muestran patrones de distribución de susceptibilidad notablemente similares, lo que refuerza la consistencia del modelo XGBoost en ambas escalas de análisis. En la distribución espacial se observa que la zona occidental (parte alta de la cuenca) presenta predominantemente una susceptibilidad muy baja a baja, caracterizada por los tonos verdes en ambos mapas. Esta tendencia experimenta una transición gradual hacia el oriente, donde se evidencia un incremento en la susceptibilidad. La parte oriental de la cuenca (zona baja) exhibe las condiciones de mayor susceptibilidad, representada por los tonos rojos, particularmente en la región noreste del área de estudio. Esta distribución sugiere que los procesos morfodinámicos tienen una mayor probabilidad de ocurrencia en las zonas bajas de la cuenca, mientras que las zonas altas presentan condiciones más estables.

Metodología planteada para la modelación de SHALSTAB

En esta sección se analizan dos eventos con el objetivo de evaluar el comportamiento del modelo ante un evento cuya fecha de ocurrencia es conocida con precisión.

Sector de Las Playas (San Antonio de Prado)

Este evento que tuvo lugar el 13 de julio de 2022 se encuentra identificado de color azul en la Figura 46). La lluvia se considera como la precipitación media semanal previa registrada por el pluviómetro 2, ubicado en la Escuela Rural La Verde, la cual corresponde a 2.57 mm/día . Por su parte, los parámetros geotécnicos usados fueron los analizados en esta línea de investigación.

En la Figura 46 se presentan las condiciones de estabilidad estimadas para el día en que ocurrió el evento. Se observa que la ladera donde se registró el deslizamiento presentaba amplias zonas clasificadas como inestables e incondicionalmente inestables.

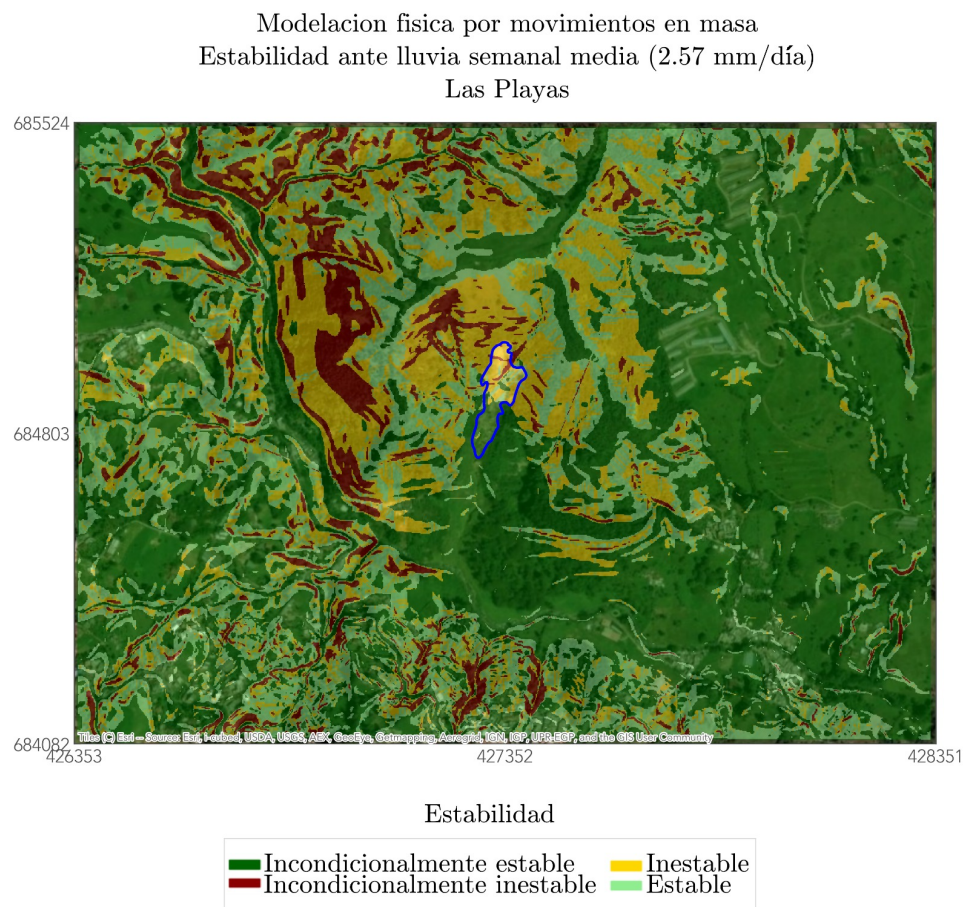


Figura 46: Estabilidad en el sector Las Playas ante una lluvia semanal media antes del evento

En la Figura 47 se muestra la lluvia crítica estimada para la zona de estudio. A partir de este raster, se extrajo el valor de la lluvia crítica en el punto correspondiente a la corona del deslizamiento, obteniendo un valor de 12.33 *mm/día*. Este valor representa el umbral de precipitación necesario para desencadenar inestabilidad en dicha área.

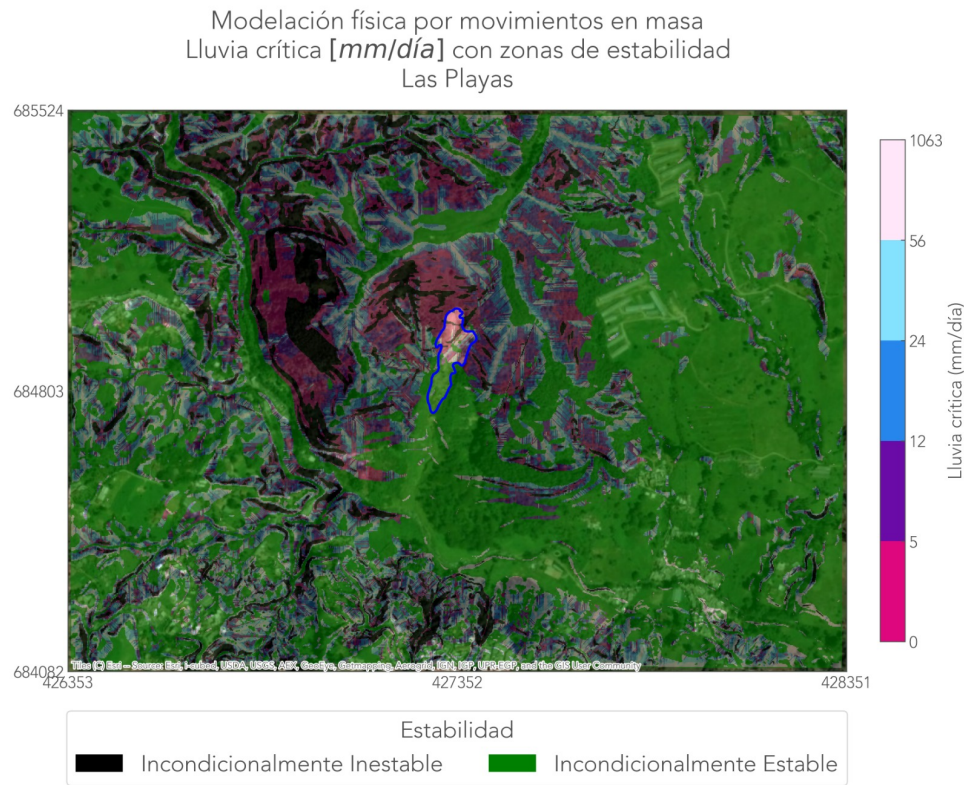


Figura 47: Lluvia crítica ($mm/día$) en el sector de Las Playas

Determinación del período crítico de lluvia

Una vez calculada la lluvia crítica, se procede a realizar una búsqueda en el histórico de precipitaciones capturadas por el pluviómetro utilizando un promedio móvil. El objetivo es identificar un período en el que la lluvia acumulada fuera igual o superior al valor crítico (12.33 mm/día). Este análisis permite determinar el momento en que las condiciones de saturación del suelo alcanzan un umbral capaz de generar deslizamientos.

El promedio móvil alcanzó el valor crítico el 28 de marzo de 2022, es decir, un período de 107 días hacia atrás donde se acumula una lluvia total de 1343.23 mm. Esto permite confirmar que la lluvia crítica no solo depende de la intensidad de las precipitaciones, sino también de su acumulación a lo largo de un período de tiempo.

Por otra parte, para evaluar la singularidad del evento, se analiza las precipitaciones en una ventana de 107 días a lo largo del histórico del pluviómetro (Figura 48). Este análisis permite identificar que el valor crítico de 1343.23 mm no había sido alcanzado antes del 28 de marzo de 2022.

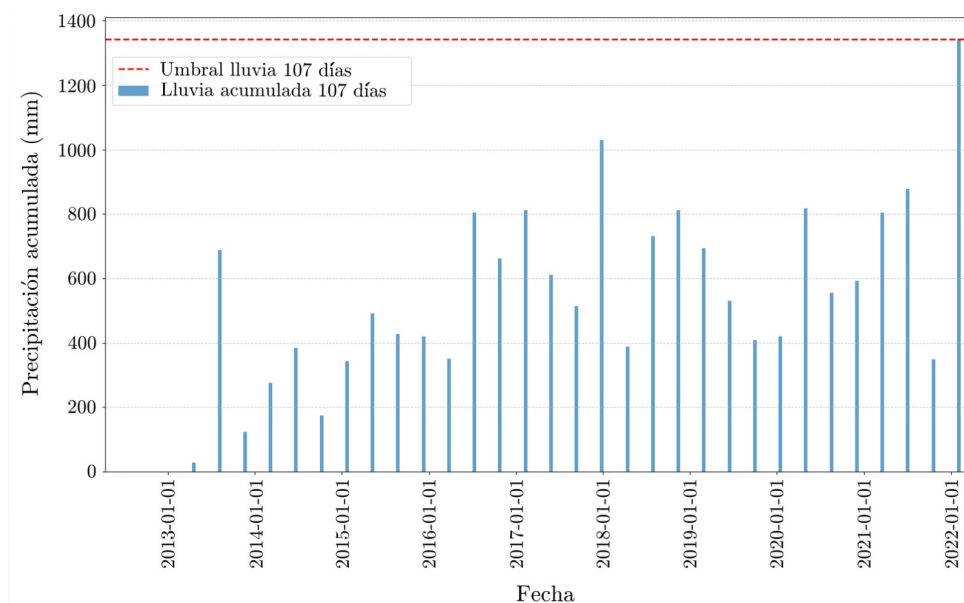


Figura 48: Acumulados de precipitación en ventanas de 107 días para el sector de Las Playas

Vereda San Andrés (Girardota)

Este evento que tuvo lugar entre la noche del 27 y 28 de mayo de 2023 a diferencia del caso anterior dio lugar a la ocurrencia de diversos movimientos en masa. La lluvia se considera como la precipitación media semanal previa registrada por el pluviómetro 66, ubicado en la I.E San Andres (Sede El Socorro), la cual corresponde a 13.94 mm/día .

En la Figura 49 se presentan las condiciones de estabilidad estimadas para el día en que ocurrió el evento.

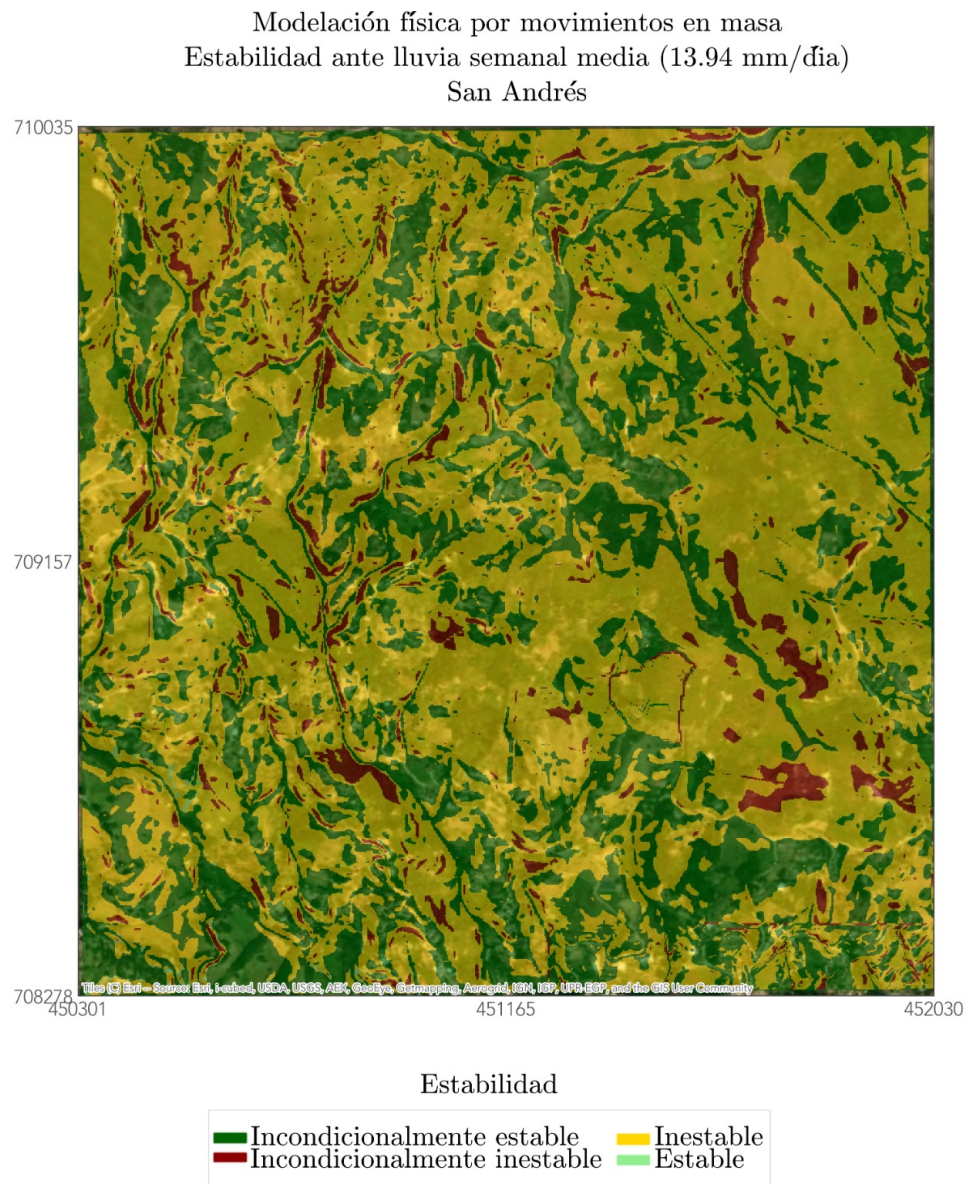


Figura 49: Estabilidad en San Andrés ante una lluvia semanal media antes del evento

En la Figura 50 se muestra la lluvia crítica estimada para la zona de estudio. A partir de este raster, se extrajo el valor de la lluvia crítica en el punto correspondiente a una de las coronas de los deslizamientos obteniendo un valor de 13.95 *mm/día*. Este valor representa el umbral de precipitación necesario para desencadenar inestabilidad en dicha área.

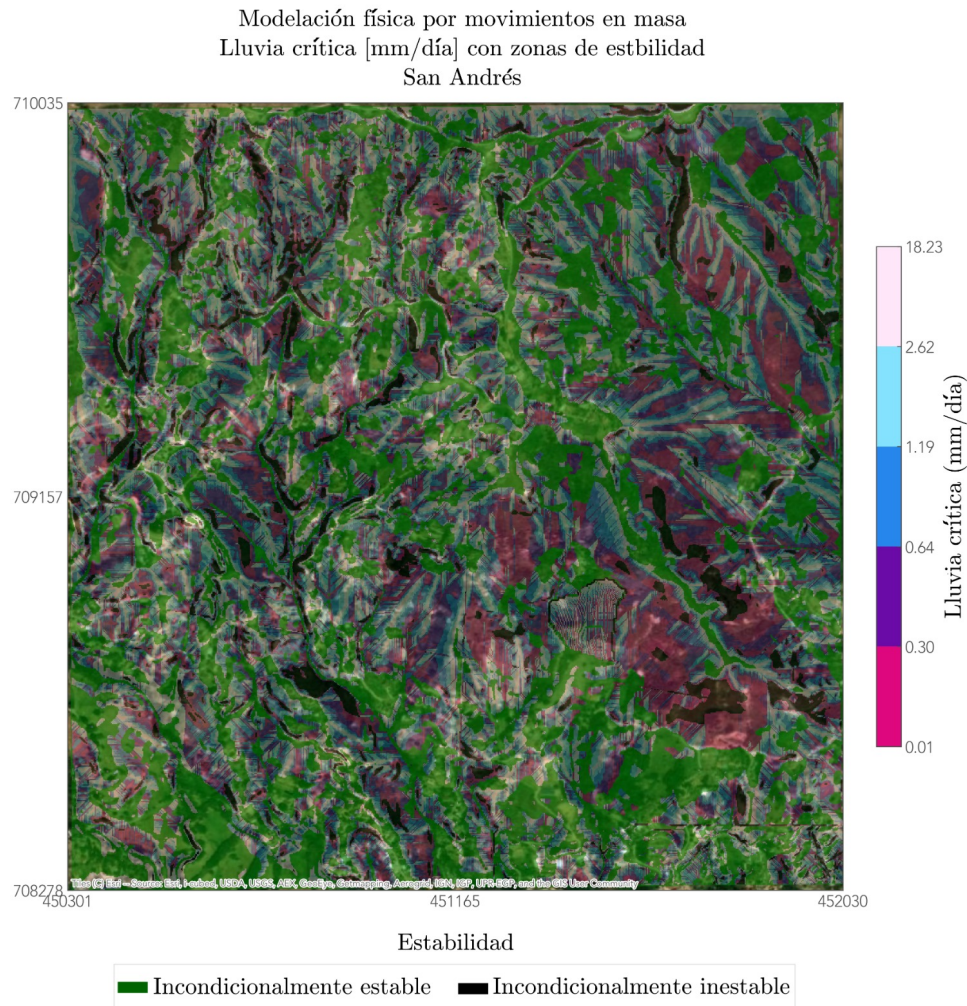


Figura 50: Lluvia crítica (mm/día) en a vereda San Andrés

Determinación del período crítico de lluvia

Al igual que en el caso del sector de Las Playas, se procede a realizar una búsqueda en el histórico de precipitaciones capturadas por el pluviometro con el objetivo de identificar un período en el que la lluvia acumulada fuera igual o superior al valor crítico (13.95 mm/día). Este análisis permite determinar el momento en que las condiciones de saturación del suelo alcanzan un umbral capaz de generar deslizamientos.

El promedio móvil alcanzó el valor crítico el 19 de mayo de 2023, es decir, un período de 9 días hacia atrás donde se acumula una lluvia total de 236.81 mm.

Por otra parte, para evaluar la singularidad del evento, se analiza las precipitaciones en una ventana de 9 días a lo largo del histórico del pluviometro (Figura 51). Este análisis permite identificar que el valor crítico de 236.81 mm no había sido alcanzado antes del 19 de mayo.

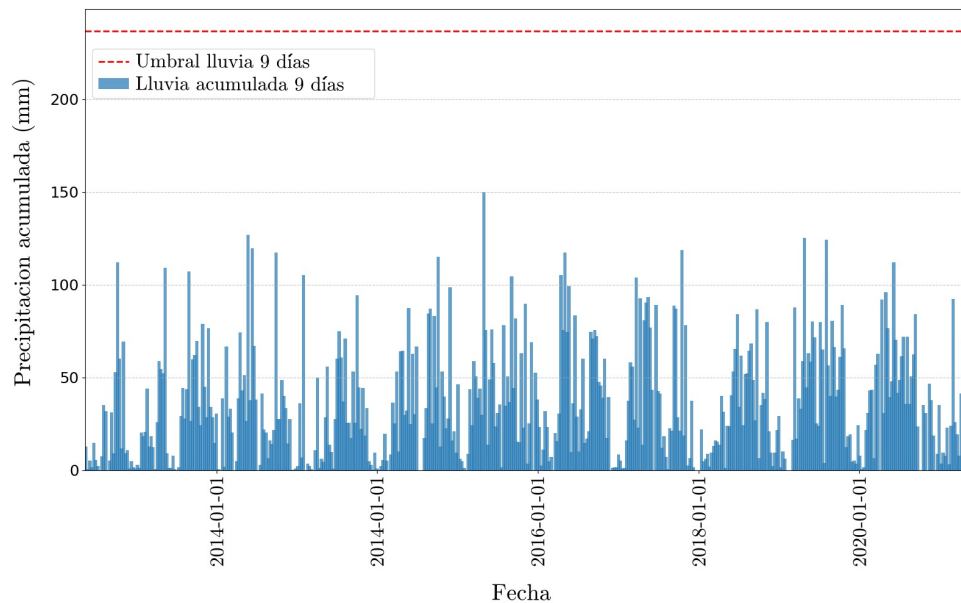


Figura 51: Acumulados de precipitación en ventanas de 9 días para la vereda San Andrés

Discusión y Conclusiones

A partir del texto presentado, se puede sintetizar el trabajo realizado hasta el momento en la modelación física de movimientos en masa inducidos por lluvia utilizando el modelo SHALSTAB. Si bien se trata de una investigación en curso, los avances logrados sugieren el potencial de esta metodología para el análisis de esta amenaza natural. Adicionalmente, la incorporación de técnicas de machine learning ha permitido establecer una zonificación morfodinámica en el área de estudio, complementando el enfoque físico tradicional.

Una parte fundamental de esta línea de investigación es el análisis estadístico de los parámetros geotécnicos (insumo necesario para la modelación física), que permite generar menor variabilidad espacial uniendo unidades que, a pesar de ser geológicamente diferentes, estadísticamente son geotécnicamente muy similares. Lo anterior se logra a través de un proceso de limpieza de datos y la aplicación de filtros donde se eliminan datos atípicos y se agrupan subunidades. La validez de este enfoque ha sido corroborada mediante perforaciones y ensayos de laboratorio realizados en la cuenca La Despensa, donde los parámetros obtenidos para una unidad geotécnica se ajustan satisfactoriamente a los rangos estadísticos establecidos.

De manera complementaria, se realizaron trabajos de campo enfocados en la descripción detallada de las unidades geológicas y geomorfológicas dentro del área de estudio. Esto principalmente porque la información existente, proveniente de fuentes secundarias, presenta una escala regional que resultaba inadecuada para los objetivos del estudio.

El modelo SHALSTAB, al combinar un enfoque hidrológico y geotécnico, ha demostrado ser una herramienta prometedora para evaluar la susceptibilidad a los movimientos en masa en función de las condiciones topográficas, de suelo y de precipitación. Su implementación por razones explicadas en el texto se da en la cuenca La Despensa donde se obtienen resultados iniciales satisfactorios, identificando zonas potencialmente estables e inestables bajo diferentes escenarios de lluvia.

Uno de los productos preliminares más relevantes es el índice de estabilidad $\log(q/T)$, el cual podría ser

un indicador valioso de las condiciones de susceptibilidad, donde valores más bajos estarían asociados a un mayor riesgo de inestabilidad. Asimismo, la capacidad del modelo para estimar la lluvia crítica que generaría movimientos en masa en cada celda del área de estudio representa un avance prometedor para la evaluación de amenazas y potencial generación de alertas tempranas.

Además, se delimitan las unidades de ladera en la zona de estudio utilizando la herramienta *r.slopeunit*. Sin embargo, es importante destacar que estas unidades originales requieren una subdivisión heurística posterior. Este ajuste se realiza incorporando información topográfica detallada, así como considerando las divisorias de aguas y las líneas de drenaje.

El propósito fundamental de esta delimitación es evolucionar desde la modelación celda a celda, que se ha venido utilizando en la línea de investigación, hacia una modelación de SHALSTAB a escala de unidad de ladera, que presenta resultados más acordes con la realidad del terreno. El proceso de modelación a nivel de unidad de ladera resulta más complejo que a nivel de píxel, principalmente en la delimitación de dichas unidades por lo mencionado anteriormente con respecto al tiempo y la redelimitación que se debe hacer. En áreas extensas donde la delimitación abarca diferentes cuencas y no una sola como es la zona piloto (cuenca La Despensa), el proceso se vuelve significativamente más largo. Adicionalmente, existe un problema en casos donde una ladera presenta dos unidades geológicas diferentes, lo que dificulta la asignación de parámetros geotécnicos uniformes a cada unidad (requerimiento del modelo).

Por otra parte, se ha implementado un enfoque que combina técnicas de machine learning con análisis estadísticos avanzados para estimar la probabilidad de inestabilidad en unidades de ladera previamente delimitadas. Este proceso requiere de un inventario de procesos morfodinámicos, construido a partir de información secundaria que ha sido validada y complementada con imágenes satelitales y visitas de campo.

Seguidamente, para lograr la zonificación a escala de ladera y de píxel se utiliza un MDE como base para derivar múltiples variables morfométricas, e incorporar además variables físico-espaciales y geométricas (estas últimas en el caso de las unidades de ladera). El análisis incluye la aplicación de técnicas de visualización estadística como la estimación de densidad de Kernel y diagramas de caja, un análisis de multicolinealidad mediante una matriz de correlación, análisis de varianza (ANOVA), y el cálculo del factor de inflación de la varianza (FIV) para abordar la colinealidad entre variables.

La implementación del modelo XGBoost (Extreme Gradient Boosting) permite obtener una zonificación geodinámica en términos de probabilidades, logrando identificar áreas propensas a la ocurrencia de procesos morfodinámicos con mayor precisión y eficiencia computacional. Los resultados de ambas escalas de análisis (ladera y píxel) muestran una notable concordancia en los patrones de distribución de la susceptibilidad, revelando una clara diferenciación espacial entre la zona occidental y oriental de la cuenca La Despensa. Esta consistencia en los resultados entre ambas escalas de análisis valida la robustez del modelo implementado, aunque el análisis a nivel de píxel proporciona una caracterización más detallada de la variabilidad espacial en comparación con el análisis por laderas, que ofrece unidades más homogéneas manteniendo el mismo patrón general de distribución de la susceptibilidad.

Al comparar los resultados obtenidos mediante el modelo físico SHALSTAB y la zonificación morfodinámica por XGBoost, se evidencian diferencias significativas en la distribución espacial de la susceptibilidad. El modelo SHALSTAB, al basarse en principios físicos y geomecánicos, asigna una susceptibilidad media a alta en zonas de pendientes pronunciadas (parte alta de la cuenca), debido a su enfoque en la relación entre geometría del terreno y estabilidad. En cambio, el modelo XGBoost, al apoyarse en el aprendizaje a partir del inventario histórico de movimientos en masa, genera una zonificación que refleja los patrones observados de ocurrencia, resultando en una susceptibilidad baja en las zonas altas donde históricamente no se han registrado eventos significativos.

La integración de ambos enfoques permite una evaluación más completa: mientras SHALSTAB identifica zonas potencialmente inestables desde una perspectiva mecánica, el análisis estadístico valida estas

predicciones con la evidencia histórica y considera factores adicionales como la intervención antrópica y cambios en el uso del suelo.

Como validación, se modelan dos eventos en el sector Las Playas (San Antonio de Prado) y vereda San Andrés (Girardota) ocurridos el 13 de julio de 2022 y 27 de mayo del 2023 respectivamente, utilizando la precipitación media de la semana previa. Los resultados muestran amplias zonas inestables coincidiendo con los sitios de deslizamientos. Además, se calcula una lluvia crítica para cada sector y se analiza su recurrencia en el histórico de precipitaciones, identificando un período de acumulación de 107 (Las Playas) y 9 días (San Andrés) en el que se alcanza un umbral de 1343.23 mm y 236.81 mm respectivamente antes de los eventos. Este análisis confirma la importancia de considerar acumulados en la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa.

Adicionalmente, se implementó una variante probabilística del modelo SHALSTAB, incorporando la incertidumbre en los parámetros geotécnicos clave: cohesión (c'), ángulo de fricción interno (ϕ) y peso unitario (γ). Para cada parámetro se consideraron cinco posibles valores (valor original, $\pm 1\sigma$ y $\pm 2\sigma$), lo cual genera un total de 124 combinaciones únicas. Este enfoque permite evaluar la estabilidad de cada celda bajo múltiples condiciones, disminuyendo de esta manera la incertidumbre que genera la selección de un único parámetro geotécnico.

La validación de este modelo probabilístico se realizó en tres zonas del Valle de Aburrá que registraron deslizamientos durante la temporada de lluvias de mayo. En los sectores de San Isidro (Sabaneta) y Loma Los Balsos (Medellín), se evidenció una alta concordancia entre las zonas clasificadas con alta probabilidad de inestabilidad y los sitios reales de los eventos. No obstante, en el sector de Los Olivares (Itagüí), el modelo no logró capturar adecuadamente las zonas afectadas. Esta diferencia sugiere que el periodo de acumulación de lluvia semanal usado como entrada —seleccionado de forma arbitraria— podría no ser representativo para todos los tipos de suelo. Dado que suelos más finos tienden a retener agua por periodos más largos que suelos granulares, se plantea como línea futura de trabajo ajustar la ventana temporal de precipitación de entrada al modelo según las propiedades del suelo. Esta adaptación permitiría mejorar la precisión espacial y temporal del modelo probabilístico, fortaleciendo su aplicación para la evaluación de amenazas y la generación de alertas tempranas.

Si bien estos resultados iniciales son alentadores, es importante continuar la investigación para refinar la implementación del modelo, ajustar los parámetros de entrada y validar los resultados con datos de campo. Esto permitirá aprovechar el potencial del modelo SHALSTAB como una herramienta robusta para la comprensión y predicción de los movimientos en masa inducidos por lluvia, lo cual es fundamental para la planificación territorial y la gestión del riesgo en áreas propensas a esta amenaza natural.

Trabajos futuros

Los trabajos futuros de esta investigación se estructuran en dos escalas principales de desarrollo:

- A escala regional, se propone mejorar los insumos requeridos por SHALSTAB, enfocándose específicamente en el balance hídrico mediante la incorporación de variables como evapotranspiración y escorrentía, así como en el análisis y espacialización del espesor del suelo. Adicionalmente, se plantea explorar otros modelos de estabilidad que puedan complementar los resultados obtenidos con SHALSTAB.
- A escala local, se contempla evaluar la estabilidad de manera detallada a partir de modelos físicos no solo para procesos superficiales sino también para movimientos profundos. Un aspecto importante será estimar la propagación a partir del área fuente o área crítica, lo que permitirá realizar una

evaluación del impacto potencial de estos procesos y de esta manera contribuir con la optimización y priorización de recursos de los entes gestores del riesgo.

Referencias

- Alvioli, M., Marchesini, I., Reichenbach, P., Rossi, M., Ardizzone, F., Fiorucci, F., and Guzzetti, F. (2016). Automatic delineation of geomorphological slope units with r.slopeunits v1.0 and their optimization for landslide susceptibility modeling. *Geoscientific Model Development*, 9(11):3975–3991.
- Aristizabal, E., Aristizabal, E., Marín, R., and Guzmán, J. (2019). Implementación del modelo trigs con análisis de confiabilidad para la evaluación de la amenaza a movimientos en masa superficiales detonados por lluvia. *TecnoLógicas*, 22(44):111–129.
- Bioexplora S.A.S (2023). Estudio básico de amenazas naturales municipio de caldas-antioquia. Informe técnico.
- Carvajal, J., Jimenez, D., Cortés, R., Romero, F., Moreno, J., and Calderón, Y. (2005). Propuesta metodológica para el desarrollo de la cartografía geomorfológica para la zonificación geomecánica. Informe técnico.
- Catani, F., Segoni, S., and Falorni, G. (2010). An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*, 46.
- Chang, Z., Catani, F., Huang, F., Liu, G., Meena, S. R., Huang, J., and Zhou, C. (2023). Landslide susceptibility prediction using slope unit-based machine learning models considering the heterogeneity of conditioning factors. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(5):1127–1143.
- Consorcio Territorial Medellín (2016). Elaboración de estudios de riesgo de detalle por movimiento en masa, según lo establece el plan de ordenamiento territorial vigente, a través de la inversión de recursos de planeación local de presupuesto participativo en la comuna 90 de la ciudad de medellín. Informe técnico.
- Consulcivl S.A.S (2017). Estudio de suelos para la caracterización geotécnica, la definición del sistema de fundación y las recomendaciones geotécnicas para el correcto manejo de las obras asociadas a la ampliación de la sede de operaciones de emvarias localizada en el barrio la toscana del municipio de medellín (antioquia). Informe técnico.
- Deere, D. and Patton, F. (1971). Slope stability in residual soils. *Proceedings of the Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1:87–170.
- Dietrich, W. E., de Asua, R. R., Coyle, J., Orr, B., and Trso, M. (1998). A validation study of the shallow slope stability model, shalstab, in forested lands of northern california. *Stillwater Ecosystem, Watershed & Riverine Sciences*. Berkeley, CA.
- Echeverry, J. (2019). *Correlación de parámetros de resistencia con propiedades índice y de clasificación para suelos producto de la meteorización en el Valle de Aburrá y municipios aledaños*. PhD thesis, Universidade Nacional.
- EGEA Ingeniería S.A.S (2015). Estudios geológicos-geotécnicos para el desarrollo del api poblado country club ejecutivos medellín. Informe técnico.
- Grupo de sismología de Medellín (1999). Instrumentación y microzonificación sísmica del Área urbana de medellín. Informe técnico.

- Grupo de sismología de Medellín (2002). Microzonificación sísmica de los municipios del valle de aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones. Informe técnico.
- Hidalgo and Vega (2014). Estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismos y lluvia en el valle de aburrá, Colombia. *Revista EIA*, 11(22):103–117.
- Hidalgo, A. (2013). *Incertezas, vulnerabilidade e avaliação de risco devido a deslizamento em estradas*. PhD thesis, Universidade De Brasília.
- INCIGAM (2022). Plan parcial carabineros z2r48 medellín-antioquia. Informe técnico.
- ISRM (1981). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, 15:99–103.
- King, A. and Eckersley, R. (2019). *Descriptive Statistics I: Univariate Statistics*.
- Marinos, P. and Hoek, E. (2000). GSI: A geological friendly tool for rock mass strength estimation. In *Proceedings of the GeoEng 2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, pages 1422–1446, Melbourne.
- Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water resources research*, 30(4):1153–1171.
- O'Loughlin, E. M. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, 22(5):794–804.
- Osorio and Hincapié (1990). Propiedades geomecánicas de las formaciones comprendidas entre los barrios san diego, poblado, buenos aires y los caunces, de la ciudad de medellín. *Revista Universidad Eafit*, 26(80):19–43.
- Quintero, A., Valencia, Y., and Lara, L. (2017). Geotechnical variations on a tropical soil produced by municipal solid waste leachate. *Revista UNAL*, 41:40–47.
- Salmerón Gómez, R. and Rodríguez Martínez, E. (2017). Métodos cuantitativos para un modelo de regresión lineal con multicolinealidad. aplicación a rendimientos de letras del tesoro. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 24:169–189.
- SGC (2015). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Informe técnico.
- SGC (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000. Informe técnico.
- Ugoni, A. and Walker, B. (1995). The t test: An introduction. *Biomed Central*, 4(2):37–40.
- UNAL (2018). Estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de Caldas, La Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa, para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial.
- Universidad de Antioquia (2021). Estudio de suelos para la construcción de varias obras en la universidad de antioquia sede recinto quirama. Informe técnico.
- Universidad de los Andes (2016). Estudio de microzonificación sísmica del valle de aburrá. Informe técnico.
- Universidad Eafit (2017). Aunar esfuerzos para realizar estudios de riesgo de detalle por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales, con sus respectivas medidas de intervención, en zonas clasificadas con condición de riesgo en el marco del pot del municipio de medellín. Informe técnico.

- Weltman, A. and Head, J. (1983). *Site Investigation Manual*. CIRIA special publication. Construction Industry Research and Information Association.
- Wen, H., Liu, B., Di, M., Li, J., and Zhou, X. (2024). A shap-enhanced xgboost model for interpretable prediction of coseismic landslides. *Advances in Space Research*.
- Yan, G., Lu, D., Li, S., Liang, S., Xiong, L., and Tang, G. (2024). Optimizing slope unit-based landslide susceptibility mapping using the priority-flood flow direction algorithm. *CATENA*, 235:107657.