

Zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos, escala 1:25.000 para el municipio de Suratá,
Santander, aplicando métodos
estadísticos bivariados y multivariados (pesos de evidencia y análisis discriminante)

Nayleth Alexandra Rojas Becerra

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez

Geólogo PhD en Ciencias Geológicas

Codirector: Joaquín Andrés Valencia Ortiz

Geólogo MSc en Geología Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

*A mi madre, Martha Becerra,
quien ha sido mi guía, mi inspiración y mi mayor apoyo en la vida.
Su amor infinito, sus sabios consejos y su incondicional apoyo
me han llevado a alcanzar este logro.
Mamá, eres mi motor y mi norte, gracias por estar siempre a mi lado,
por creer en mí y animarme en los momentos en que más lo necesitaba.
Te amo con todo mi corazón.*

Agradecimientos

Al director y codirector de este proyecto, Juan Diego Colegial y Joaquín Valencia, respectivamente, por su valiosa asesoría, guía y conocimiento compartido. Su dedicación y tiempo invertido en resolver las dudas que surgieron durante el proyecto fueron fundamentales para la realización de este.

También quiero expresar mi agradecimiento al profesor Leonardo Palmera por compartir su tiempo y conocimiento para resolver las inquietudes que surgieron durante la realización de la cartografía.

A Alejandro Pulido, por su compañía y colaboración durante el trabajo de campo. Su excelente actitud, apoyo incondicional y motivación constante fueron factores determinantes para el éxito de este proyecto.

A mi madre, Martha Becerra, y mi padre, Javier Rojas, les agradezco por su constante motivación, amor, compañía, paciencia y buenos consejos.

Expreso mi gratitud a la escuela de geología y a todos los profesores que, durante esta etapa, compartieron su experiencia y conocimientos, ayudándome a crecer tanto personal como profesionalmente durante mis años de pregrado.

Por último, pero no menos importante, agradezco a todas las personas que contribuyeron con su granito de arena para ayudarme a superar los retos que tuve que enfrentar para finalmente cumplir este sueño.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Metodología	15
2.1 Efectuar la recopilación bibliográfica y establecer área de trabajo	15
2.2 Síntesis de información.....	16
2.3 Trabajo de campo.....	19
2.4 Procesamiento estadístico bivariado y multivariado.....	19
2.4.1 Evaluación de los supuestos de los métodos.....	21
2.4.2 Modelo Pesos de Evidencia	24
2.4.3 Modelo de Análisis Discriminante.....	27
2.5 Validación de los mapas de susceptibilidad a deslizamientos	31
3. Resultados	32
3.1 Mapas de los factores condicionantes a deslizamientos	32
3.1.1 Mapa de pendientes.....	32
3.1.2 Mapa de curvatura.....	34
3.1.3 Mapa de distancia a drenajes	35
3.1.4 Mapa de distancia a vías	36
3.1.5 Mapa de Subunidades Geomorfológicas	37
3.1.6 Mapa Geológico.....	45

3.1.7 Mapa de Unidades geológicas Superficiales.....	46
3.2 Mapa de inventario de procesos morfodinámicos	55
3.3 Scripts de Python	59
3.3.1 Script pesos de evidencia.....	59
3.3.2 Script análisis discriminante	61
3.4 Mapas de susceptibilidad a deslizamientos.....	62
3.4.1 Mapa de susceptibilidad a deslizamientos mediante pesos de evidencia (WOE).....	62
3.4.2 Mapa de susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis discriminante lineal (LDA)..	65
3.5 Validación de los mapas de susceptibilidad.....	67
3.5.1 Curva de éxito pesos de evidencia.....	67
3.5.2 Curva de éxito Análisis Discriminante	68
4. Discusión.....	70
5. Conclusiones	73
6. Recomendaciones	75
Referencias Bibliográficas	76

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de entrada de los scripts para el procesamiento estadístico.	20
Tabla 2. Subunidades geomorfológicas en el área de estudio.	38
Tabla 3. Unidades geológicas superficiales en el área de estudio	47

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización del área de estudio	13
Figura 2. Metodología del proyecto investigativo	15
Figura 3. Matriz de correlación.....	22
Figura 4. Matrices de covarianza para los grupos con y sin deslizamiento.....	23
Figura 5. Flujograma simplificado para el análisis estadístico bivariado.....	26
Figura 6. Curva de éxito para establecer las categorías de susceptibilidad modelo de pesos de evidencia	27
Figura 7. Diagrama de flujo simplificado del análisis estadístico multivariable realizado usando Python 3.8.10	29
Figura 8. Muestra de entrenamiento antes y después del LDA	30
Figura 9. Curva de éxito para establecer las categorías de susceptibilidad modelo de análisis discriminante lineal.....	31
Figura 10. Muestras del inventario de deslizamientos para validar y entrenar los modelos escala 1:25.000	32
Figura 11. Distribución de ambientes geomorfológicos en el área de estudio	43
Figura 12. Subunidades geomorfológicas en el área de estudio	43
Figura 13. Unidades Geológicas Superficiales en el area de estudio	52
Figura 14. Unidades Geológicas Superficiales en el area de estudio	54
Figura 15. Deslizamientos en el área de estudio.....	56
Figura 16. Deslizamientos en el área de estudio.....	58

Figura 17. Flujograma simplificado del script WOE generado mediante Python 3.8.10	59
Figura 18. Hoja de Excel del mapa curvatura arrojada por el script modelo de pesos de evidencia	60
Figura 19. Flujograma simplificado del script LDA generado mediante Python 3.8.10	61
Figura 20. Curva de éxito categorizada modelo de pesos de evidencia.....	67
Figura 21. Curva de éxito categorizada modelo análisis discriminante.....	69
Figura 22. Comparación con trabajos anteriores	72

Resumen

Título: Zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos, escala 1:25.000 para el municipio de Suratá, Santander, aplicando métodos estadísticos bivariados y multivariados (pesos de evidencia y análisis discriminante)*

Autor: Nayleth Alexandra Rojas Becerra**

Palabras Clave: Análisis discriminante lineal, cálculo de susceptibilidad, deslizamientos, pesos de evidencia, Suratá, Colombia.

Descripción: Suratá es un municipio donde se han registrado gran cantidad de movimientos en masa, siendo los deslizamientos el tipo de movimiento en masa más frecuente en la región. A el día de hoy varias veredas del municipio carecen de estudios relacionados a deslizamientos a escala local. En este trabajo se desarrollaron dos modelos de susceptibilidad a deslizamientos, escala 1:25.000, utilizando Pesos de Evidencia y Análisis Discriminante Lineal teniendo en cuenta factores como: las unidades geológicas superficiales (UGS), subunidades geomorfológicas, distancia a drenajes, distancia a vías, pendiente, curvatura y el inventario de deslizamientos. Los modelos desarrollados incluyeron algunas de las veredas donde no se habían realizado estudios a escala local, se compararon y se evaluó su desempeño. Además, se incorporaron nuevos deslizamientos para contar con una base de datos actualizada. Estos modelos se validaron mediante la curva de éxito y la coherencia entre las categorías de susceptibilidad y la combinación de factores considerados. El modelo de Pesos de Evidencia mostró un área bajo la curva del 80%, lo que indica una buena capacidad para predecir la probabilidad de que ocurra un deslizamiento. Por otro lado, el modelo de Análisis Discriminante presentó un área bajo la curva del 70%, lo que sugiere que su capacidad para pronosticar deslizamientos apenas alcanza un nivel aceptable.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Programa académico Geología. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez. Geólogo PhD en Ciencias Geológicas. Codirector: Joaquín Andrés Valencia Ortiz. Geólogo MSc en Geología Ambiental

Abstract

Title: Zoning of landslide susceptibility, scale 1:25.000 for the municipality of Suratá, Santander, applying bivariate and multivariate statistical methods (weights of evidence and discriminant analysis) *

Author: Nayleth Alexandra Rojas Becerra **

Key Words: linear discriminant analysis, susceptibility calculation, landslides, weights of evidence, Suratá, Colombia.

Description: Suratá is a municipality where many mass movements have been recorded, with landslides being the most frequent type of mass movement in the region. To date, several villages in the town lack studies related to landslides on a local scale. In this work, two landslide susceptibility models were developed at a scale of 1:25.000, using Weights of Evidence and Linear Discriminant Analysis, considering factors such as: surface geological units, geomorphological subunits, distance to drainage, distance to roads, slope, curvature, and landslide inventory. The models developed included some of the villages where no local scale studies had been carried out, and their performance was compared and evaluated. In addition, new landslides were incorporated to have an updated database. These models were validated using the success curve and the consistency between the susceptibility categories and the combination of factors considered. The Weights of Evidence model showed an area under the curve of 80%, indicating a good ability to predict the probability of landslide occurrence. On the other hand, the Discriminant Analysis model showed an area under the curve of 70%, suggesting that its ability to predict landslides barely reaches an acceptable level.

*Degree Work

** School of Physicochemical Engineering. School of Geology. Geology academic program. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez. Geologist PhD in Geological Sciences. Co-director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz. Geologist MSc in Environmental Geology

Introducción

En el municipio de Suratá los deslizamientos son eventos frecuentes debido a sus condiciones climáticas, topográficas y geológicas. Los deslizamientos, según Ingeominas (2002), se refieren a un desplazamiento descendente, con una componente horizontal apreciable, a lo largo de una o varias superficies de falla o zonas de corte, que pueden coincidir con superficies preexistentes o generarse durante el movimiento. Suratá se localiza en la provincia de Soto Norte, al noreste del departamento de Santander, sobre el flanco occidental de la Cordillera Oriental, noreste de Colombia, Según la clasificación climática de Köppen, tiene el clima Cfb (Mesotermal templado sin estación seca) (Ideam, n.d.) La lluvia cae sobre todos los meses del año. La temperatura media anual en Suratá es 23° y la precipitación media anual es 2054 mm.

El área de estudio se sitúa al sur del municipio de Suratá, cubre un área de 150Km², al norte limita con el Río Cachirí, esta acotada por las coordenadas 1°116.000 E - 1°128.000 E y 1°317.000 N - 1°305.000 N. Se ubica entre las planchas 109-II-B, 110-I-A, 109-II-D y 110-I-C escala 1:25.000 del (IGAC, 2013) (figura 1). Geológicamente se encuentra entre las cuencas sedimentarias del Catatumbo y del Valle Medio del Magdalena Medio, que tienen como basamento el Macizo de Santander (CDMB, 2006).

Las unidades litoestratigráficas que afloran en la zona de estudio de más antigua a más reciente son: Neis de Bucaramanga, Formación Silgara, Tonalita, Granito de pescadero, Grupo Girón, Formación Los Santos, Formación Rosa Blanca, Formación La Paja, Formación Tablazo, Formación Simití, Formación Galembo, Formación Umir, depósitos de terraza, depósitos coluviales y depósitos aluviales.

Estructuralmente el área de estudio se ve influenciada por la falla de Suratá, la cual es una falla inversa con desplazamiento rumbo lateral derecho que presenta un rumbo predominante N15°E y sigue el curso del río Suratá (Royero & Clavijo, 2001), esta falla pone en contacto rocas metamórficas del Paleozoico con rocas sedimentarias del Cretácico superior.

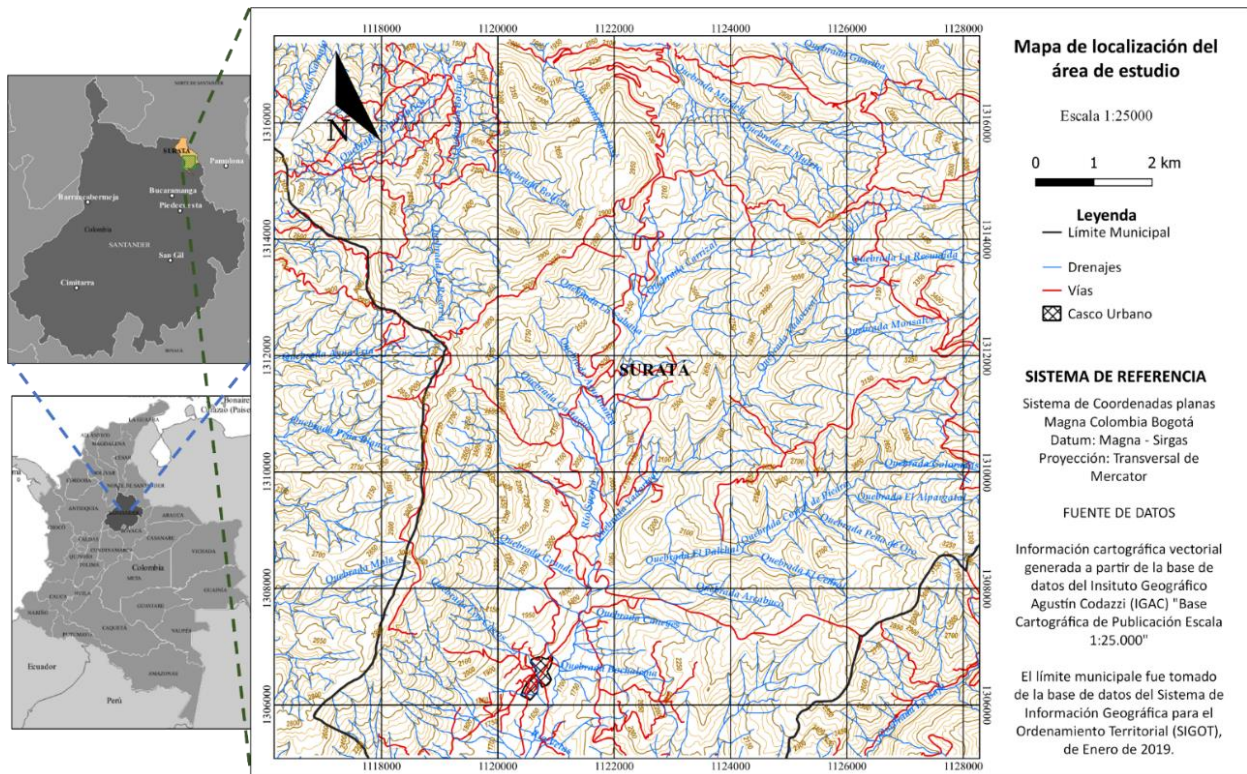
En Suratá se han llevado a cabo varios estudios de susceptibilidad y amenaza de movimientos en masa, Natalia Fajardo y Lenny Mejía (2017) generaron un mapa de susceptibilidad a escala 1:10.000 para el municipio de Suratá utilizando un método estadístico multivariado de regresión logística. Para la zona también existen los mapas de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:100.000 de las planchas 109 y 110 generados por el SGC (2014) mediante el método heurístico denominado Análisis Jerárquico de Procesos (AHP). Aunque el trabajo del SGC (Servicio Geológico Colombiano) cubre todo el municipio de Suratá, no tiene suficiente detalle para la toma de decisiones. Por otro lado, el trabajo de Fajardo y Mejía proporciona más detalles, pero no incluye varias veredas del municipio.

Esta investigación ofrece una visión a mediana escala considerando zonas que no habían sido estudiadas previamente a escala local para el análisis de susceptibilidad, permitiendo así la identificación de las zonas críticas que requieren estudios más detallados sobre la estabilidad de las laderas. Por tanto, el objetivo de esta investigación es generar mapas de susceptibilidad a deslizamientos a escala 1:25.000 en el municipio de Suratá. Para ello, se aplicarán el método bivariado de pesos de evidencia (WOE) y el método multivariado de análisis discriminante lineal (LDA), considerando diversos factores que inciden en la susceptibilidad a los deslizamientos, tales como la pendiente, las Unidades Geológicas de Superficie (UGS), las Subunidades Geomorfológicas, el inventario de deslizamientos, la distancia a las vías y los drenajes, y la curvatura del terreno. Para simplificar el modelo, no se incluirá la variable de uso del suelo, ya que

este aspecto no está directamente relacionado con la geología sino con la pedología. Además, se comparan diferentes metodologías y se evalúa su desempeño en el área en cuestión. Asimismo, se incluyen los nuevos deslizamientos registrados en la zona en el inventario, lo que permite contar con una base de datos actualizada para realizar los cálculos de susceptibilidad.

Figura 1

Mapa de localización del área de estudio



1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Cálculo y cartografía de la susceptibilidad a deslizamientos con base en análisis estadísticos bivariados y multivariados (Pesos de Evidencia y Análisis Discriminante) escala 1:25.000 para el área de estudio que comprende parte del municipio de Suratá y se ubica entre las planchas 109-II-B, 110-I-A, 109-II-D y 110-I-C.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar las variables para determinar la susceptibilidad a deslizamientos en el área de estudio, partiendo de herramientas informáticas, como bases de datos de imágenes, tanto satelitales como aéreas y recursos bibliográficos.

Realizar los mapas de las variables a escala 1:25.000 en base a la fotointerpretación.

Calcular la susceptibilidad a deslizamientos, a escala 1:25.000, en el municipio de Suratá, aplicando métodos cuantitativos bivariados como el modelo de pesos de evidencia, y multivariados como el análisis discriminante.

Elaborar los mapas de susceptibilidad a deslizamientos a partir de análisis estadísticos bivariados y multivariados (pesos de evidencia y análisis discriminante)

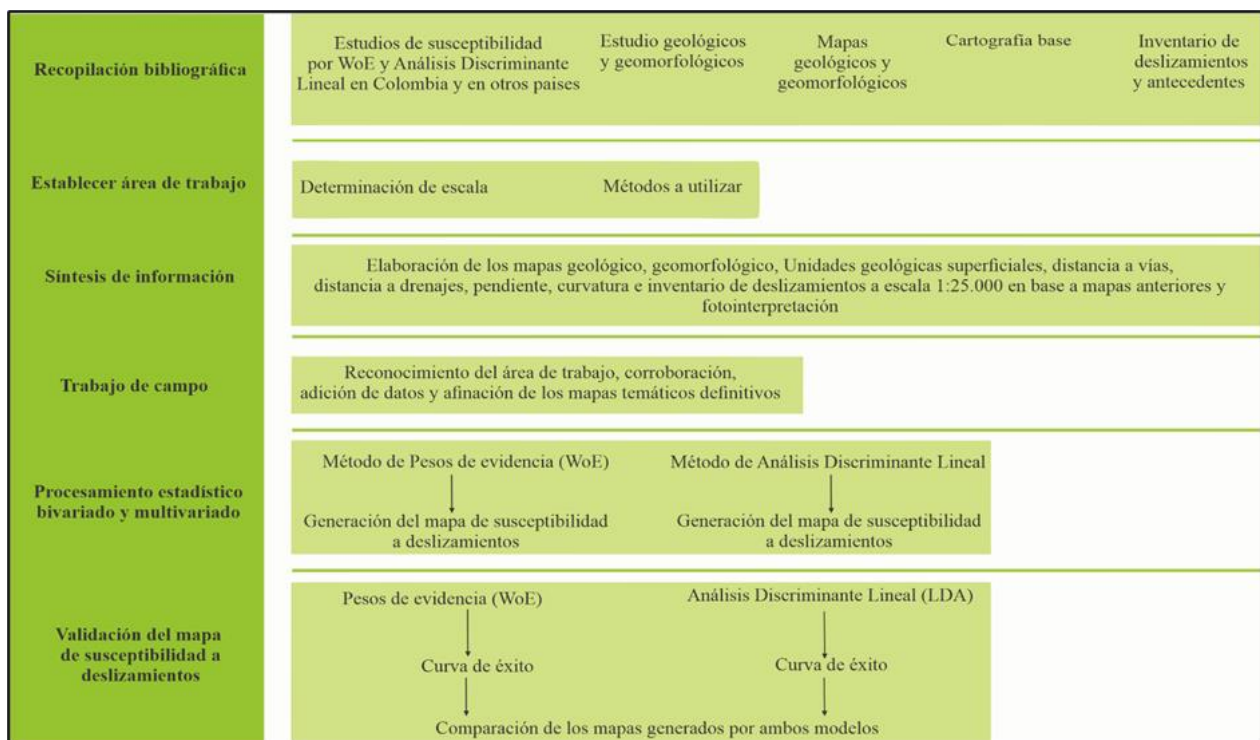
Comprobar la coherencia de los datos obtenidos en el procesamiento con los datos del terreno.

2. Metodología

El desarrollo de este trabajo implica 5 etapas, las cuales se destacan en la figura 2, encontrándose a continuación.

Figura 2

Metodología del proyecto investigativo.



2.1 Efectuar la recopilación bibliográfica y establecer área de trabajo

Se adquiere, consulta y selecciona información referente a Deslizamientos, ¿que son? ¿Cómo se clasifican? ¿Cuál es su morfología?, mapas temáticos requeridos para el análisis de susceptibilidad, Deslizamientos en Suratá e investigaciones que se hayan realizado previas a este estudio. Se investigaron diferentes metodologías para realizar el análisis de susceptibilidad a

Deslizamientos. La recopilación de dicha información deriva en la definición del área de estudio, escala de trabajo, inventario de deslizamientos (Obtenido mediante el Sistema de información de movimientos en masa, SIMMA), hallazgo de imágenes satelitales (Google Earth, Sentinel-2) y fotografías aéreas tomadas con diferentes sensores que reflejan la superficie de la tierra, de alta, media y baja resolución adquiridas del geo visor del IGAC (Colombia en Mapas), obtención de la base de datos cartográfica escala 1:25000 del Instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC), elección de las metodologías de análisis y la metodología de evaluación a emplear, descarga del Modelo de Elevación Digital (DEM) a utilizar, se optó por seleccionar el DEM Alos Palsar ALPSRP262140130, que cuenta con resolución radiométrica de 16 bits y resolución espacial de 12,5 m, dicha elección se fundamenta en la cobertura total del DEM para el área de estudio además, el SGC (2017) expone que, el modelo digital de elevación Alos Palsar es uno de los más utilizados a escalas medias, tiene cubrimiento nacional, alta resolución y además es de fácil adquisición.

2.2 Síntesis de información

Esta fase consiste en generar los mapas temáticos preliminares (Geológico, Geomorfológico, Pendientes, Curvatura, Distancia a drenajes, Unidades geológicas superficiales, distancia a vías e inventario a deslizamientos) escala 1:25.000 mediante fotointerpretación (Google Earth), estudios anteriores y SIG (Sistemas de Información Geográfica) QGIS, a partir de los cuales se define el contexto geológico-geomorfológico regional y se planea el proceso de validación en campo.

El mapa de pendientes se genera mediante la herramienta de análisis ráster, pendiente, de la caja de herramientas del software QGIS versión 3.16.10-Hannover. Para producir este mapa se parte del DEM Alos Palsar ALPSRP262140130 obtenido del portal ASF Data Search Vertex; Para reclasificar el mapa de pendientes se usan los rangos que expone la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000 del SGC (2017), y se reclasifica el mapa con la calculadora ráster.

Para analizar la curvatura del terreno, se genera un mapa de curvatura de plano siguiendo la metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017). La curvatura de plano es un factor relevante para entender la concentración o dispersión del drenaje superficial, lo que a su vez puede estar relacionado con la generación de movimientos en masa. Para generar este mapa se utiliza la herramienta "curvature" del software SAGA Q-GIS, que genera el mapa a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM).

Para generar el mapa de distancia a drenajes y distancia a vías, primero se descarga la red de drenajes y las vías escala 1:25.000 de la base de datos del IGAC, posteriormente se convierten a formato ráster. Teniendo las capas en formato ráster, con la herramienta "proximity raster" de la caja de herramienta de procesos de Q-GIS se genera un mapa de proximidad que muestra la distancia desde el centro de cada píxel hasta el centro del píxel más cercano identificado como drenaje o vía.

Con la finalidad de identificar las fallas presentes en la zona se generan mapas de sombra a partir del DEM mediante la herramienta de Ráster Análisis, Mapa de sombras Hillshade, con la ayuda de dichos mapas y Google Earth se trazan las fallas y lineamientos estructurales. Algunas características observadas para determinar las fallas fueron: facetas triangulares, escarpe de falla, drenaje controlado y lineamientos.

De acuerdo con la escala de trabajo, para la geomorfología, se debe elaborar un mapa de subunidades geomorfológicas, estas “se definen con base en contrastes morfológicos y morfométricos en relación con el tipo de material o disposición estructural de los materiales. Igualmente, se definen por el contraste dado por las formaciones superficiales asociadas a procesos morfodinámicos actuales de meteorización, erosión, transporte y acumulación bien definidos.” (SGC, 2012).

Se elaboró el mapa geológico utilizando como referencia el mapa geológico de las planchas 109 y 110 del Servicio Geológico Colombiano en escala 1:100.000 y técnicas de fotointerpretación. Para la identificación de las diferentes unidades geológicas, se emplearon imágenes Sentinel-2 y Google Earth, considerando características como la topografía, tipo de drenaje, color, tono, vegetación, uso del suelo y cárcavas.

El mapa preliminar de Unidades geológicas superficiales se elabora tomando como base el mapa geológico, fotointerpretación y estudios anteriores que brinden información acerca de los suelos y rocas presentes en el área, así como de su origen, composición, meteorización, resistencia, entre otras características físicas y de comportamiento geomecánico.

En la realización del inventario de procesos morfodinámicos, se consultó el SIMMA, trabajos anteriores y noticias a fin de mapear los deslizamientos registrados en la zona de estudio, además dentro del inventario se reconocen e incluyen los deslizamientos y rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad del área por fotointerpretación a partir de Google Earth e imágenes Sentinel-2 con resolución de 10m para una posterior revisión de campo.

2.3 Trabajo de campo

Se realiza un análisis en el área de estudio de manera presencial, en el cual se verifican, corrigen y complementan los datos obtenidos en el procesamiento con los datos del terreno y se anexan los datos recogidos mediante esta práctica con el fin de elaborar y digitalizar los mapas temáticos definitivos y generar la base de datos por medio de la cual se sustenta el modelo de susceptibilidad. Los deslizamientos identificados en el trabajo de campo se inventariaron tomando como guía lo expuesto por el PMA: GCA. (2007).

2.4 Procesamiento estadístico bivariado y multivariado

El procesamiento de datos estadísticos se realiza mediante el lenguaje de programación Python, para ambos métodos se usó 80% de los datos del inventario de procesos para entrenar los modelos y 20% para validar. Los métodos estadísticos para trabajar se seleccionaron con base en el artículo “Recommendations for the quantitative analysis of landslide” (Corominas et al., 2014) el cual sugiere los métodos estadísticos basados en datos para escala local y regional, es decir desde 1:5.000 hasta 1:250.000. La selección del método se basa principalmente en la posibilidad de obtener los datos de entrada requeridos y adecuar los datos ya disponibles.

Los scripts generados mediante Python para el procesamiento estadístico se realizan con el fin de que cualquier persona que cuente con los parámetros de entrada de los scripts tabla 1, pueda generar un modelo de susceptibilidad a deslizamientos usando pesos de evidencia o análisis discriminante lineal mediante el lenguaje de programación Python.

Para la generación de los scripts se utiliza Python 3.8.10 y las librerías numpy, os, xlswriter, osgeo, pandas, sklearn, math, seaborn, scipy.stats y matplotlib y el módulo argparse.

Tabla 1

Parámetros de entrada de los scripts para el procesamiento estadístico.

Parámetros de entrada	Obligatorio	Descripción
ruta de salida	si	Aquí se exportarán los resultados producidos por el script.
Ruta de cada uno de los mapas temáticos	si	Pueden ingresarse n cantidad de mapas temáticos todos deben estar en formato ráster, en el mismo sistema de coordenadas de referencia, alineados, con la misma resolución y las clases deben estar representadas por un número.
Ruta del mapa con la muestra del inventario de procesos morfodinámicos que se utilizara para el entrenamiento.	si	debe estar en formato ráster, en el mismo sistema de coordenadas de referencia y con la misma resolución que los mapas temáticos.
Valor nulo o valor de no dato	no	Valor nulo de los mapas si este existe, debe ser el mismo para todos, por defecto es "-1".

Nota. El consumo del procesamiento dependerá de la resolución de los mapas, así como de la cantidad de mapas ingresados.

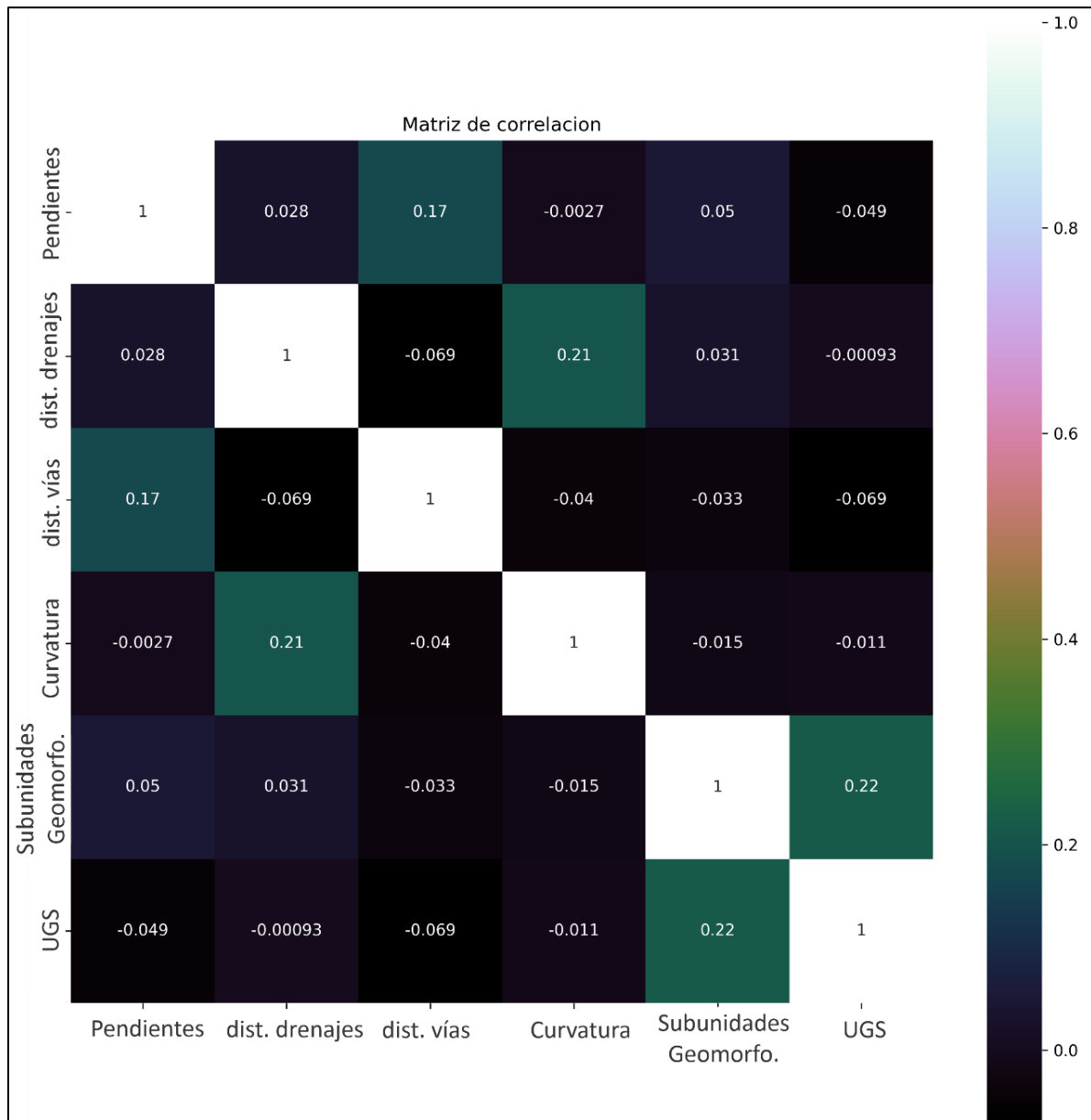
2.4.1 Evaluación de los supuestos de los métodos

Este trabajo utiliza métodos estadísticos que tienen supuestos específicos. Para el modelo de pesos de evidencia, el único supuesto es que los factores son condicionalmente independientes entre sí (SGC, 2017). Por otro lado, el modelo de análisis discriminante tiene varios supuestos: los casos son independientes, las variables predictoras tienen una distribución normal multivariante y las matrices de varianza-covarianza dentro de cada grupo son iguales, además de que ningún caso pertenece a más de un grupo y todos los casos son miembros de un grupo (IBM, 2021).

Verificar que se cumplen estos supuestos ayuda a garantizar la precisión y confiabilidad del modelo. Para verificar que los factores sean condicionalmente independientes se genera una matriz de correlación mediante Python utilizando la librería biblioteca Matplotlib, de la figura 3 se observa que todas las variables muestran valores de correlación cercanos a cero lo cual indica que estas variables son independientes entre ellas.

Figura 3

Matriz de correlación

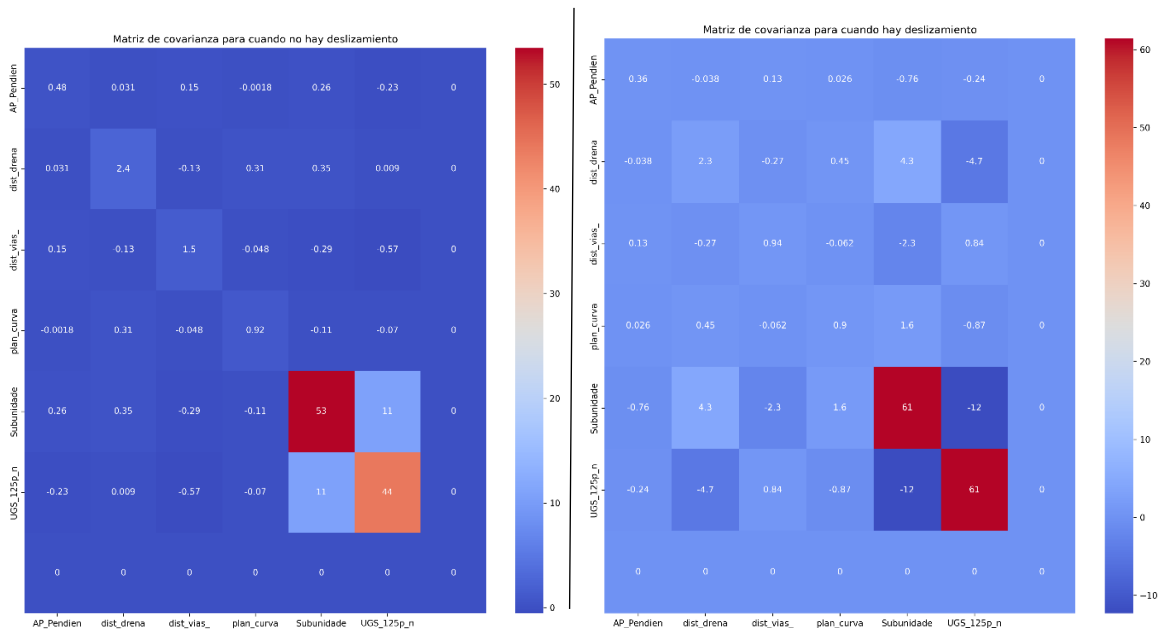


Para verificar si una variable tiene distribución normal o no, se usó la prueba de Shapiro-Wilks la cual indico que ninguno de los factores predictores tiene una distribución normal multivariante.

Para verificar si las matrices de varianza dentro de cada grupo son iguales se utilizó la prueba Bartlett la cual indicó que los grupos no tienen la misma varianza. Para corroborar si las matrices de covarianza dentro de cada grupo son iguales se realizó la matriz de covarianza de cada grupo que se observa en la figura 4, determinando que las matrices de covarianza son diferentes para cada grupo.

Figura 4

Matrices de covarianza para los grupos con y sin deslizamiento.



Nota. Las matrices de covarianza nos proporcionan información sobre cómo se relacionan entre sí las variables; La diagonal principal de la matriz indica la dispersión en los datos en cada variable; Las entradas fuera de la diagonal representan la covarianza entre variables. Si la covarianza entre dos variables es positiva, esas variables tienden a aumentar o disminuir juntas. Si la covarianza es negativa, significa que las variables tienden a moverse en direcciones opuestas.

Después de verificar los supuestos, se ha observado que el modelo de pesos de evidencia cumple con todos, mientras que el modelo de análisis discriminante lineal solo cumple algunos de ellos. Aunque el LDA presenta algunas violaciones a los supuestos, se ha decidido aplicar el modelo para evaluar su capacidad de clasificación en este caso particular y además determinar la robustez del modelo en presencia de violaciones a los supuestos.

2.4.2 Modelo Pesos de Evidencia

Este método fue desarrollado por el servicio geológico canadiense. Sabto (1991) (citado en V. Westen, 1993) aplicó la metodología para el análisis de riesgos para Deslizamientos. Según el SGC (2017), el método evalúa mediante pesos las asociaciones que se repiten entre los factores condicionantes de deslizamientos y los terrenos inestables. De acuerdo con Aristizábal y Giraldo et al., (2019), Esta metodología está fundamentalmente basada “En calcular los pesos de las clases que conforman las variables condicionantes.” (p. 45).

Según (Aristizábal-Giraldo et al., 2019) Los pesos asignados a cada clase pueden ser tanto positivos ($W+$) como negativos ($W-$). Los pesos positivos ($W+$) indican que este factor favorece los movimientos en masa y su magnitud indica su correlación. El peso negativo ($W-$) indica que la presencia del factor contribuye a que no se presenten deslizamientos (SGC, 2017). Si el peso es cero, quiere decir que la clase analizada no es de interés para el movimiento en masa. Los pesos son definidos en la ecuación 1:

Ecuación 1*Cálculo pesos de evidencia*

$$W_{+} = \ln\left(\frac{npix1 * (npix3 + npix4)}{(npix1 + npix2) * npix3}\right)$$

$$W_{-} = \ln\left(\frac{npix2 * (npix3 + npix4)}{(npix1 + npix2) * npix4}\right)$$

Donde, npix1: número de píxeles con deslizamientos en la clase; npix2: número de píxeles con deslizamientos en el mapa menos número de píxeles con deslizamientos en la clase; npix3: píxeles en la clase menos número de píxeles con deslizamientos en la clase; y npix4: número total de píxeles en el mapa menos número de píxeles con deslizamiento en el mapa menos número de píxeles en la clase más número de píxeles con deslizamientos en la clase. Para cada clase, se calcula el Peso de Contraste o peso final (W_f) como se muestra en la ecuación 2:

Ecuación 2*Cálculo peso de contraste o peso final*

$$W_f = w_{+} - w_{-}$$

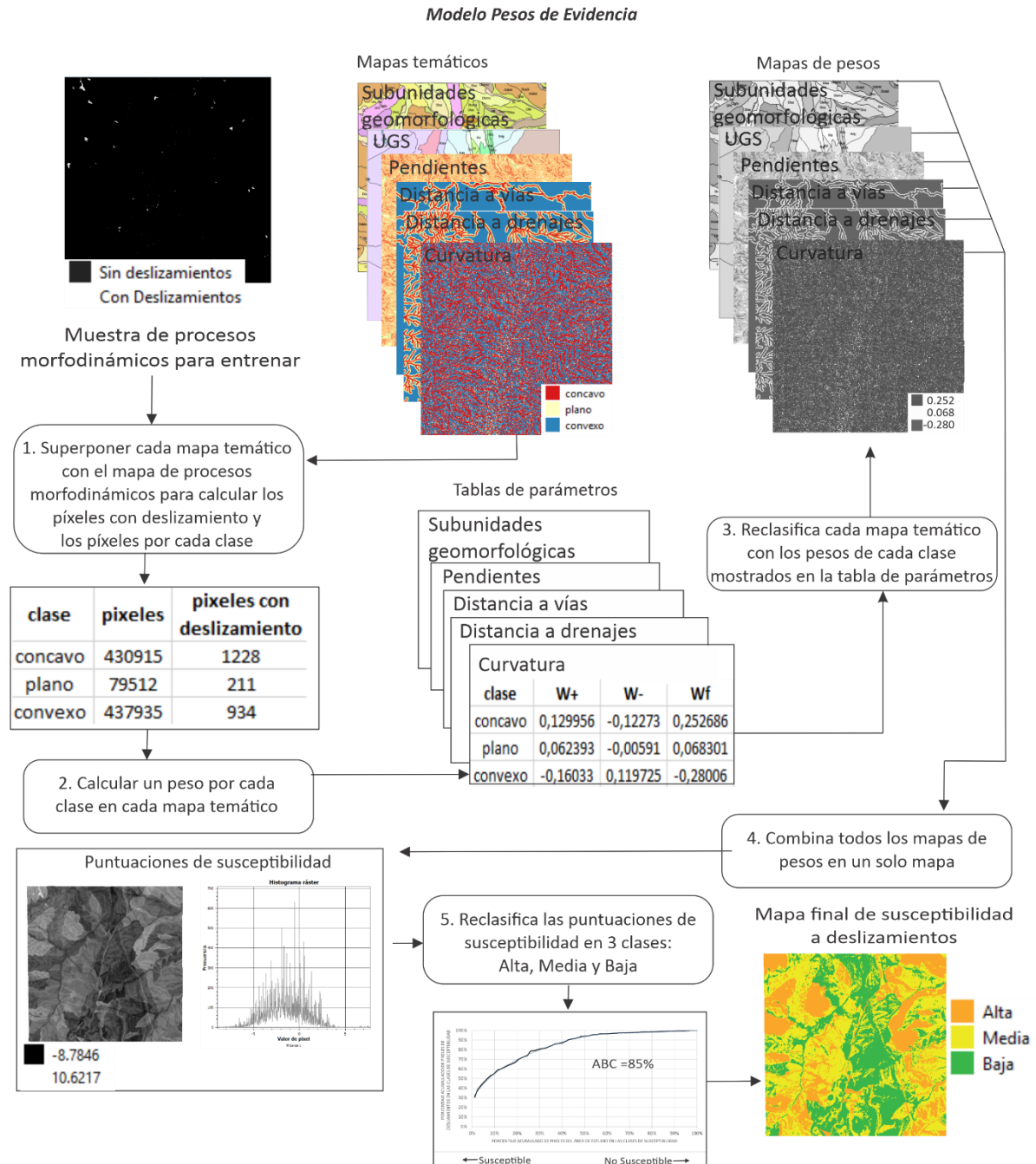
Donde W_f será cero cuando la clase no afecta; positivo, cuando existe una asociación positiva; y negativo, cuando existe una asociación negativa a la distribución de los fenómenos de movimientos en masa tipo deslizamiento (Aristizábal-Giraldo et al., 2019).

El análisis estadístico se realizó en Python 3.8.10, utilizando como guía la obra de Van Westen, del año 2002. La figura 5 muestra el flujograma simplificado del análisis realizado para este estudio, el cual se divide en 5 pasos de los cuales todos se realizan mediante el script de Python

a excepción del último en el cual se realiza la curva de éxito para establecer las categorías de susceptibilidad.

Figura 5

Flujograma simplificado para el análisis estadístico bivariado.

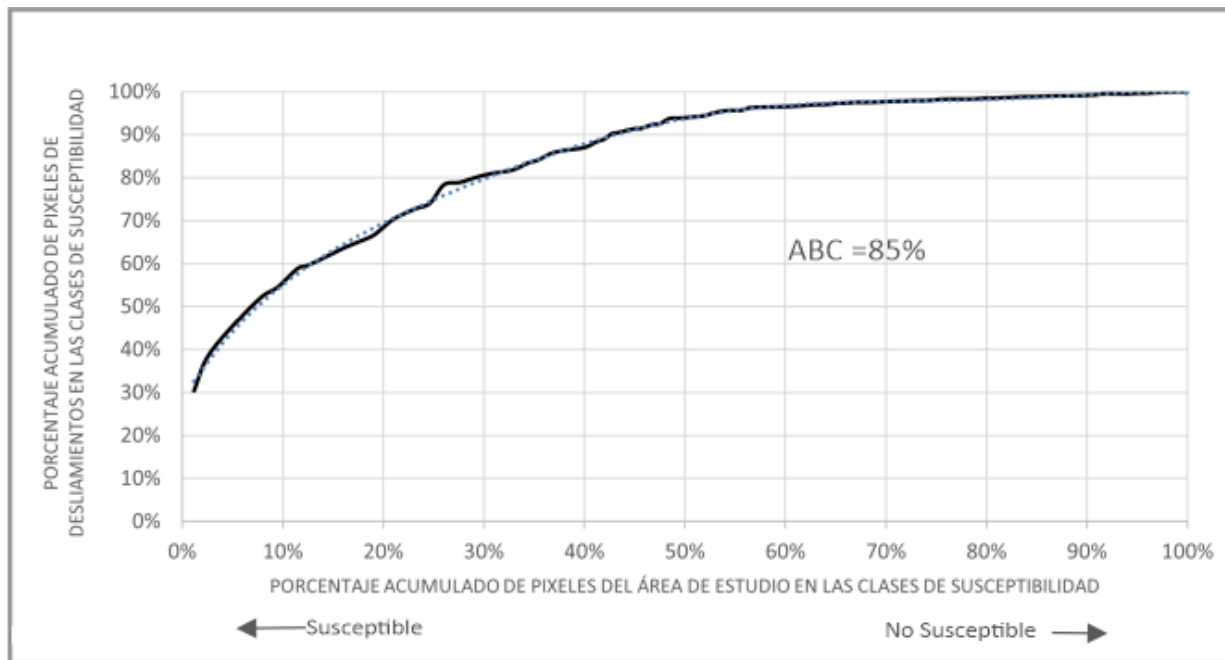


Nota. La categorización para el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento se realiza según Westen (citado en SGC, 2017)

La curva de éxito para establecer las categorías de susceptibilidad mostrada en la figura 6 se construye usando la muestra de entrenamiento del inventario de procesos la cual fue de 80%. El área bajo la curva (ABC) indica la calidad de ajuste de los datos, en este caso el ABC fue de 85% lo cual muestra que la función tiene buena capacidad para describir la distribución de los movimientos en masa.

Figura 6

Curva de éxito para establecer las categorías de susceptibilidad modelo de pesos de evidencia.



2.4.3 Modelo de Análisis Discriminante

El análisis discriminante es uno de los métodos estadísticos multivariados más utilizados. Tiene como objetivo encontrar la mejor discriminación de dos grupos, dividiendo de la manera

más optima las unidades del terreno en grupos estables (sin deslizamientos registrados) e inestables (con deslizamientos registrados) (Figura 8) con base en los factores condicionantes de deslizamientos (Londoño-Linares, 2017). Para separar óptimamente las unidades del terreno en cada grupo, los factores se combinan de forma lineal en una función discriminante que maximizará las diferencias entre los grupos:

Ecuación 3

Función discriminante

$$D=d_iV_i+\dots+d_pV_p$$

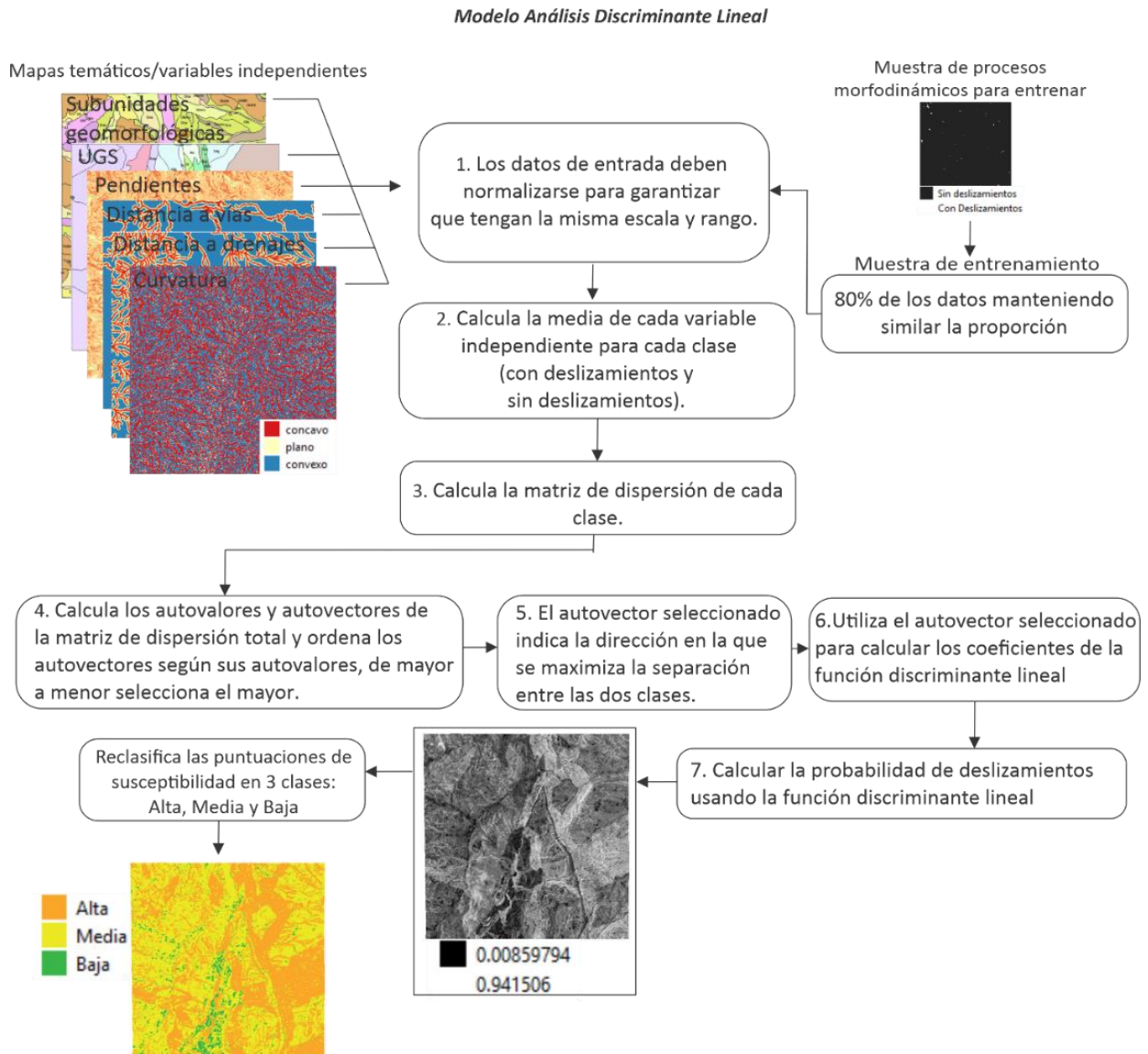
donde V_i son las variables independientes de mayor significado estadístico en el proceso discriminante que son, por ejemplo: mapa de pendientes, mapa de UGS, etc; d_i son los coeficientes de clasificación estimados y D el valor discriminante de la función. (França, 2012)

El Análisis discriminante lineal que se observa en la figura 7 se implementó mediante scikit-learn, la cual es una biblioteca de aprendizaje automático de código abierto para el lenguaje de programación Python. Fue fundada por David Cournapeau en 2007, y actualmente es mantenida por una gran comunidad de desarrolladores (Pedregosa et al., 2011). La biblioteca es gratuita y de uso libre. Además, está diseñada para integrarse con otras bibliotecas de análisis de datos de Python que también se usaron en este proyecto, como NumPy, SciPy y Pandas.

Figura 7

Diagrama de flujo simplificado del análisis estadístico multivariable realizado usando Python

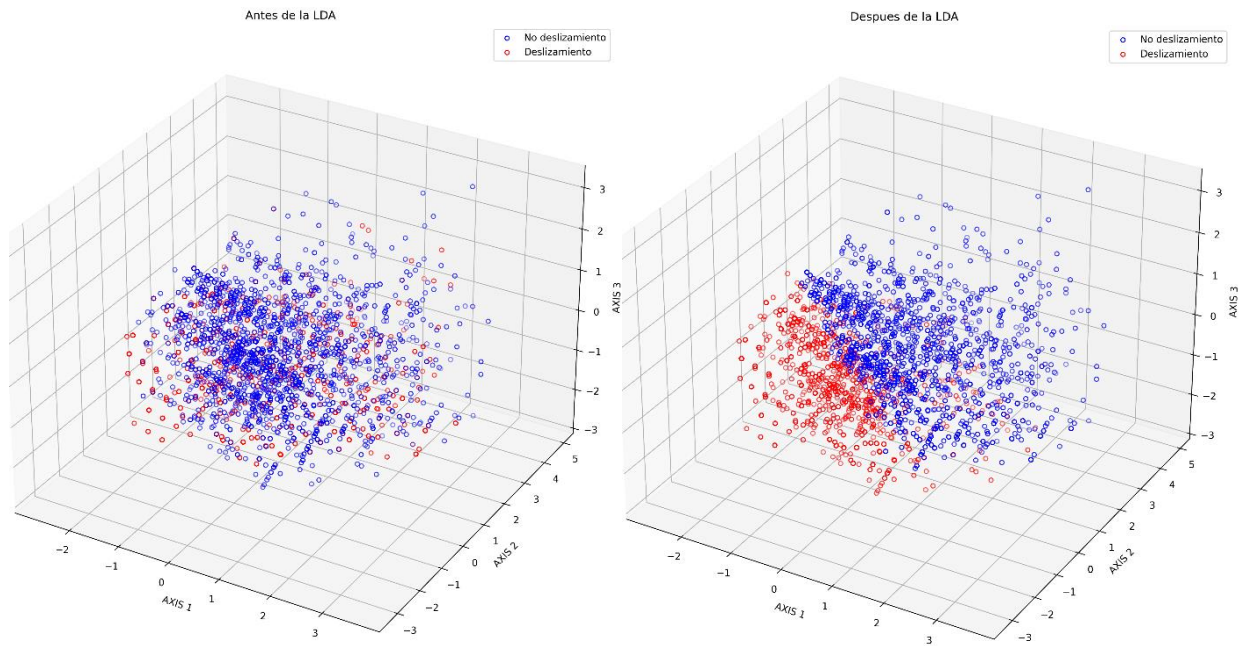
3.8.10.



Nota. La categorización para el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento se realiza según Westen (citado en SGC, 2017)

Figura 8

Muestra de entrenamiento antes y después del LDA

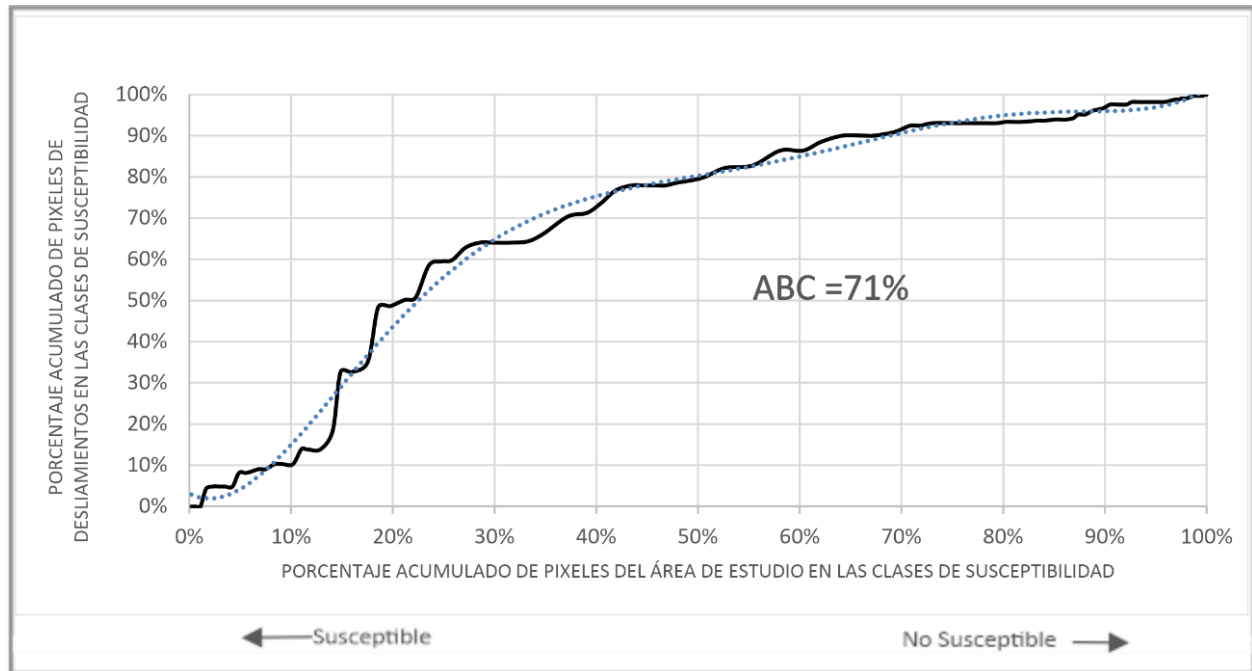


Nota. Las imágenes representan en tres dimensiones la relación de la muestra de entrenamiento con cada uno de los factores condicionantes.

La curva de éxito para establecer las categorías de susceptibilidad mostrada en la figura 9 se construye usando la muestra de entrenamiento del inventario de procesos (80%). El área bajo la curva (ABC) fue de 71% lo cual indica que el modelo apenas alcanza a tener un porcentaje aceptable de ajuste y tiene una capacidad moderada para distinguir entre áreas con deslizamientos y sin deslizamientos en los datos de entrenamiento.

Figura 9

Curva de éxito para establecer las categorías de susceptibilidad modelo de análisis discriminante lineal.



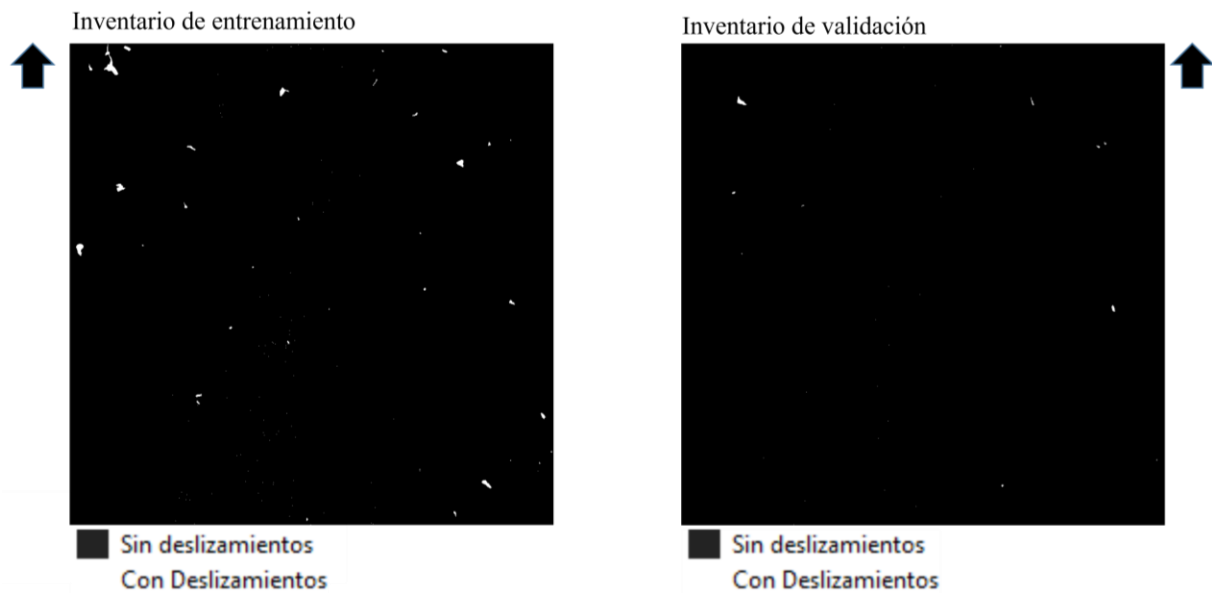
2.5 Validación de los mapas de susceptibilidad a deslizamientos

En este apartado se construye la curva de éxito con base en la “Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000” propuesta por el SGC (2017). La curva de éxito se realiza tanto para el modelo de análisis discriminante como para el modelo pesos de evidencia con la muestra del inventario de procesos morfodinámicos guardada para validar (Figura 10) la cual corresponde al 20%.

Además de la curva de éxito, los resultados de los mapas también se evalúan en función de la coherencia que exista entre las categorías de susceptibilidad y la combinación de factores que se contemplan en ellas.

Figura 10

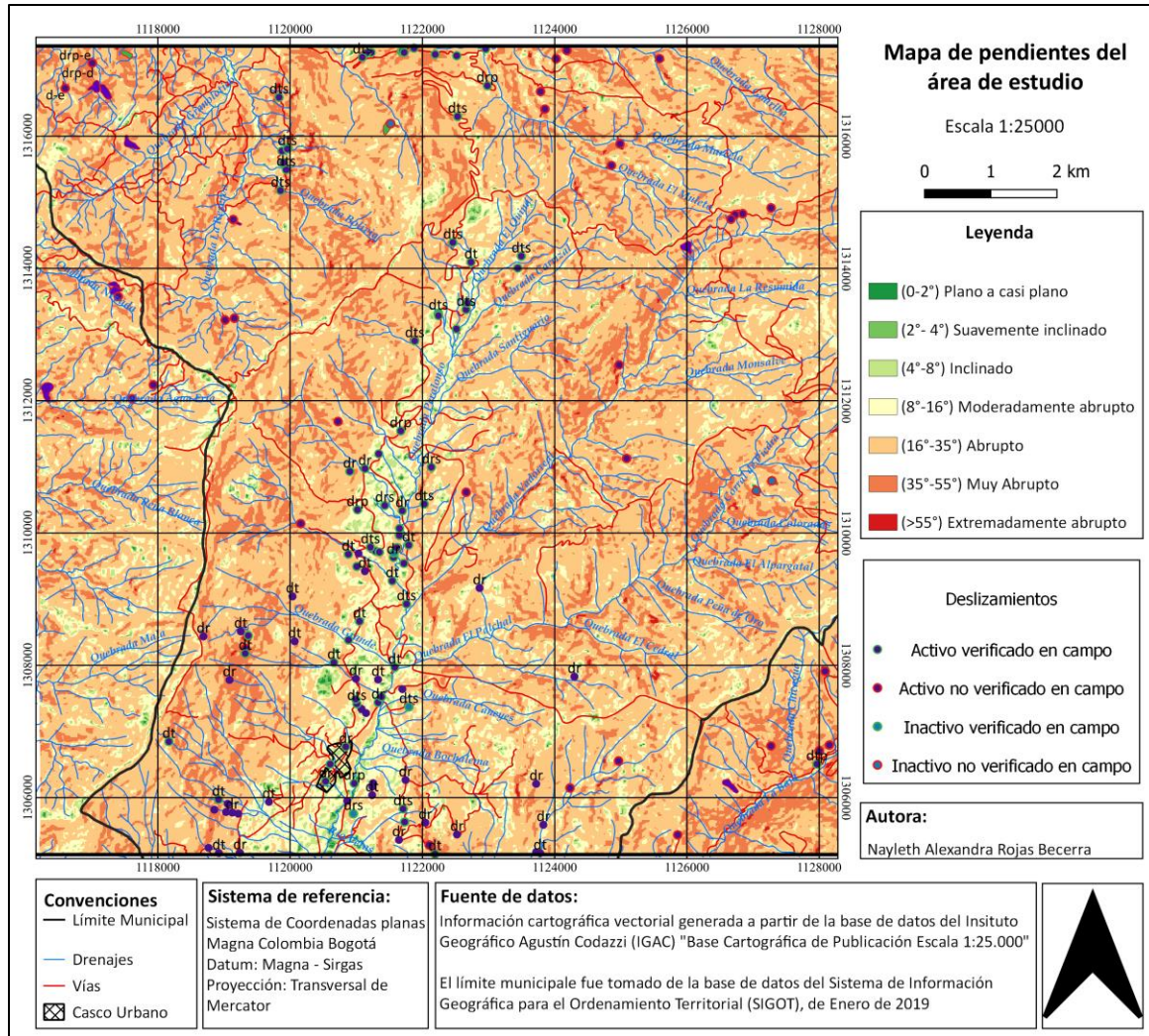
Muestras del inventario de deslizamientos para validar y entrenar los modelos escala 1:25.000



3. Resultados

3.1 Mapas de los factores condicionantes a deslizamientos

3.1.1 Mapa de pendientes

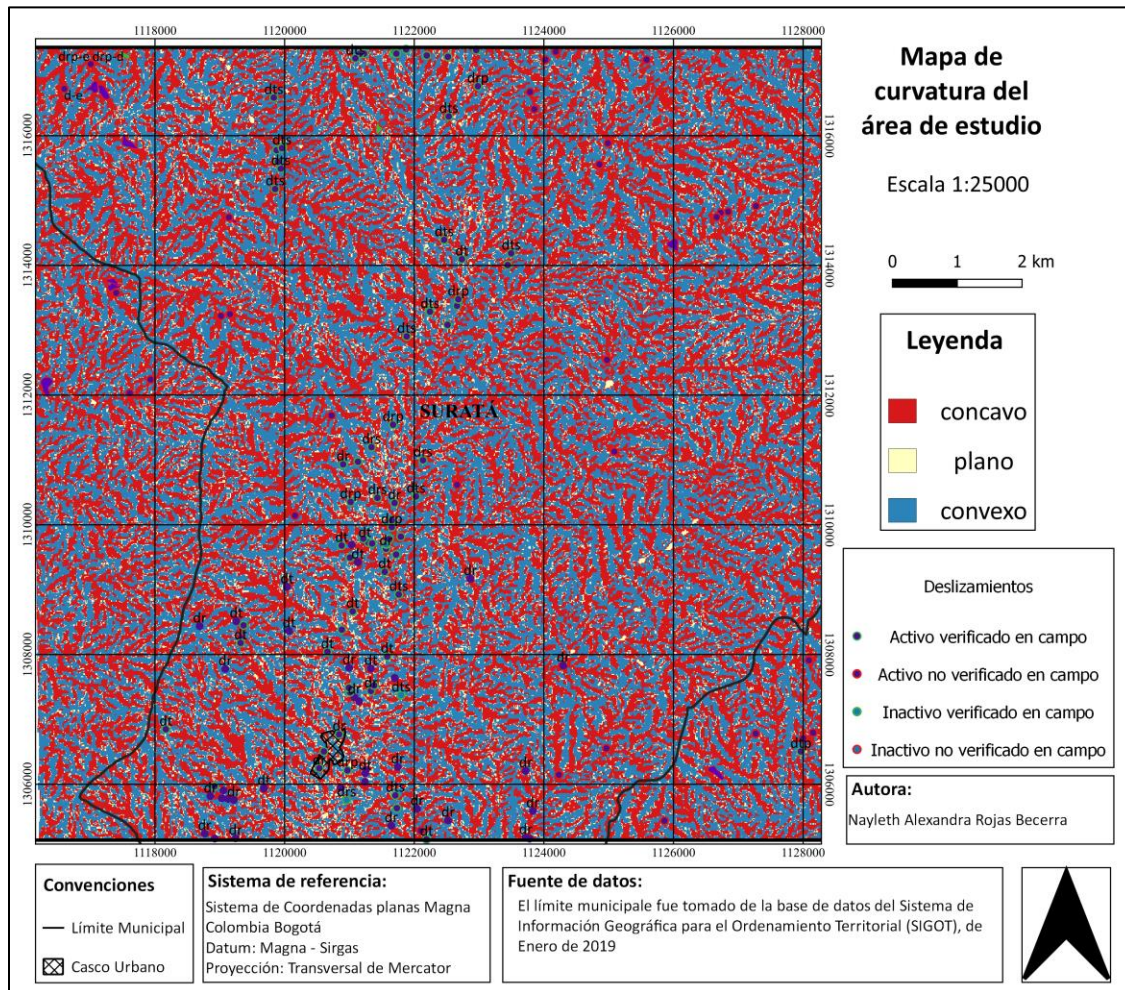


La mayoría del área de trabajo (66%) está compuesta por pendientes abruptas que varían entre 16° y 35°. En segundo lugar, encontramos pendientes muy abruptas (16%) y moderadamente abruptas (14%). Solo el 3% del área tiene pendientes inclinadas, mientras que el 0.4% tiene pendientes suavemente inclinadas y el 0.2% tiene pendientes extremadamente abruptas. Por último, la clase que ocupa menos área en la zona de trabajo son las pendientes planas o casi planas, con solo un 0.1%.

Los deslizamientos inventariados están fuertemente relacionados con pendientes abruptas y muy abruptas, ya que el 66% del área con deslizamientos se encuentra en pendientes abruptas y el 30% en pendientes muy abruptas. Por otro lado, las pendientes planas y suavemente inclinadas

presentan una menor relación con los deslizamientos, ya que se registró un área con deslizamientos de solo el 0.05% para cada una de estas clases.

3.1.2 Mapa de curvatura

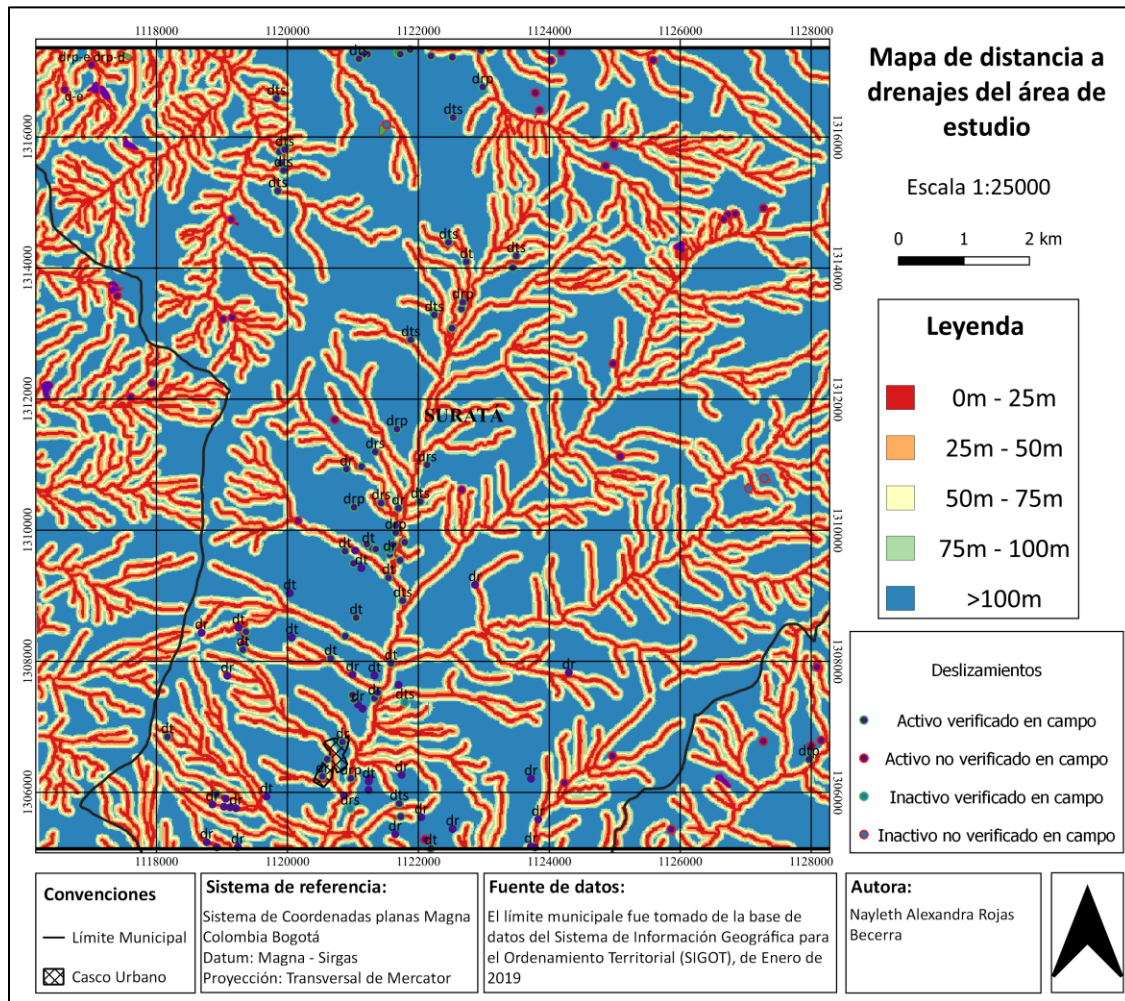


Respecto a la distribución de los tipos de curvatura en el área de estudio, se observa que los valores de cóncavo y convexo son muy similares, ya que representan el 45.4% y el 46.1%, respectivamente. En cambio, la clase plano solo representa el 8.3% del área de estudio.

Se ha observado que las zonas cóncavas concentran el 51.4% del total de área con deslizamientos, mientras que en las zonas convexas se registra el 39.7% del área con

deslizamientos. Por otro lado, las zonas planas presentan una menor relación con los deslizamientos, ya que solo se ha registrado un área con deslizamientos del 8.84%.

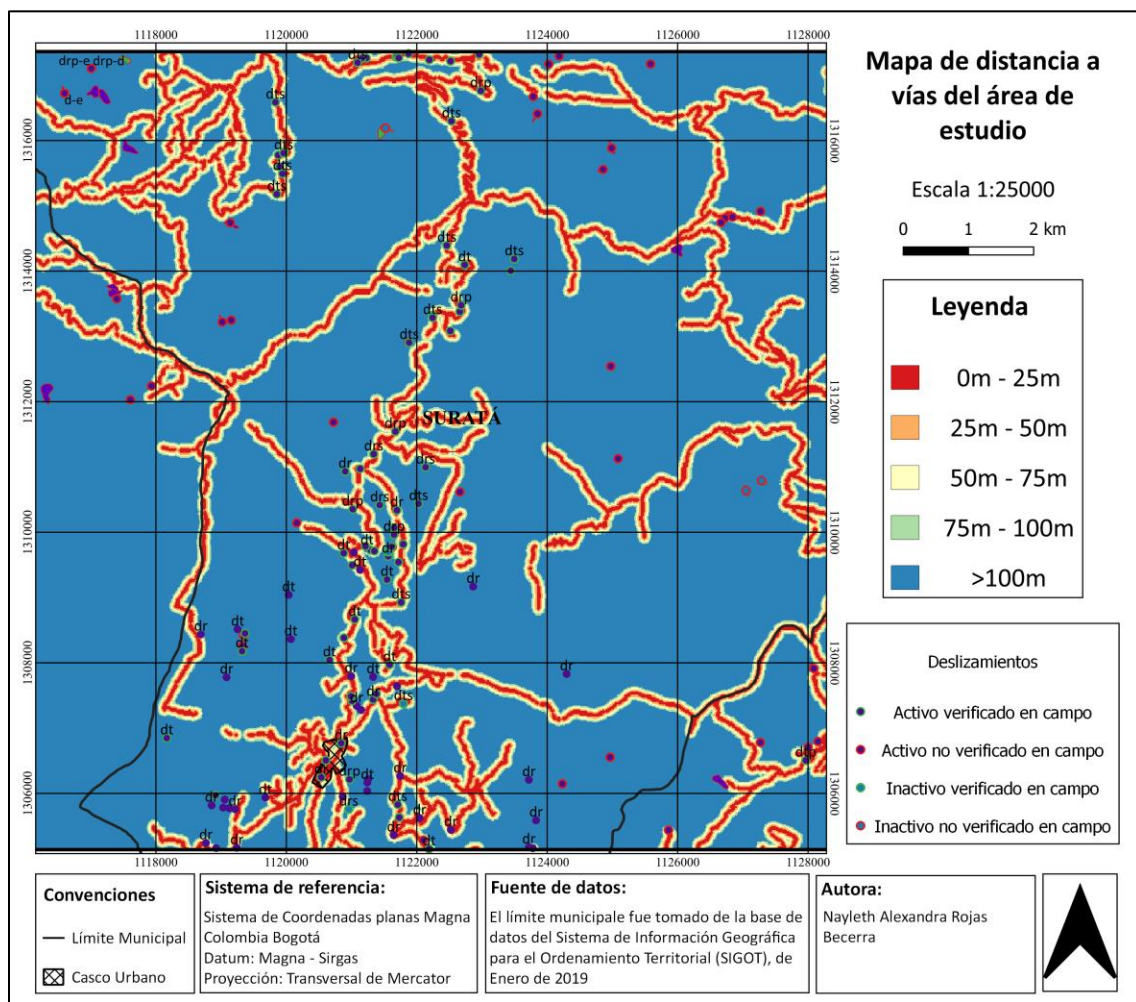
3.1.3 Mapa de distancia a drenajes



El 43.15% del área total de estudio se encuentra a una distancia mayor a 100 metros de un drenaje. Además, el 16.48% se ubica en un rango de 0 a 25 metros, el 16.2% está entre 25 y 50 metros, y el 12.06% se encuentra en un rango de 75 a 100 metros de un drenaje. Asimismo, se registró un porcentaje similar del 12.06% para las áreas que se ubican entre 50 y 75 metros de los drenajes.

Los deslizamientos inventariados se registran con mayor frecuencia en áreas que se encuentran a más de 100 metros de un drenaje, representando el 24.96% del área total con deslizamientos. En segundo lugar, encontramos el área que se ubica entre 0 y 25 metros de un drenaje, con un 23.85%. La tercera clase con mayor área de deslizamientos se localiza entre 25 y 50 metros de los drenajes, con un 23.01%. Le sigue el área que se ubica entre 50 y 75 metros de los drenajes, con un 15.90%. Finalmente, se ha registrado un área con deslizamientos del 12.26% en las zonas que se ubican entre 75 y 100 metros de un drenaje.

3.1.4 Mapa de distancia a vías



Del mapa distancia a vías la clase que ocupa mayor porcentaje del área total de estudio es la de zonas que están a más de cien metros de distancia de las vías, esta clase ocupa un 77,02%; las zonas que están de 0 a 25m de las vías ocupan un 6,96% del área de estudio, la clase que está de 25m a 50m de distancia a vías representan el 5,70% del área de estudio, la clase 50m – 75m ocupa el 5,53% del área de estudio y por último la clase que menos porcentaje ocupa es la 75m-100m con solo un 4,77% del área total de estudio.

Se nombran las clases según el área de deslizamientos asociada, comenzando por la que tiene la mayor área y terminando con la que tiene la menor: >100m (82,91%), 75m-100m (5,67%), 50m-75m (4,88%), 0m-25m (3,63%) y 25m-50m (2,88%).

3.1.5 Mapa de Subunidades Geomorfológicas

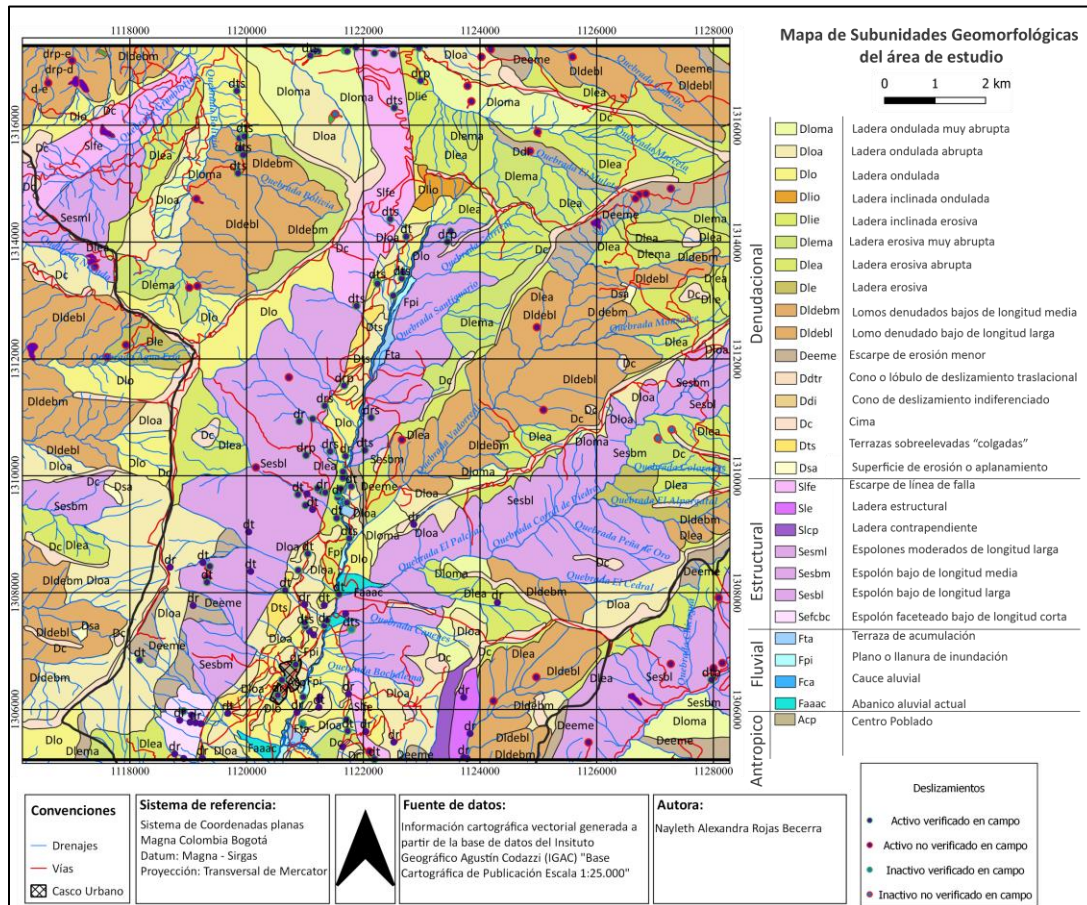


Tabla 2*Subunidades geomorfológicas en el área de estudio.*

Código	Subunidad	Descripción	% área de estudio
Acp	Centro Poblado	Casco urbano de Suratá	0,135391
Dc	Cima	Superficie plana, que bordea divisorias de agua.	4,149259
Ddi	Cono de deslizamiento indiferenciado	Estructura en forma de cono relacionada con procesos de movimientos en masa del Grupo Girón.	0,003374
Ddtr	Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional	Estructura en forma de cono relacionada al movimiento de rocas asociada a escarpes de falla.	0,016766
Deeme	Escarpe de erosión menor	Laderas con pendiente abrupta a muy abrupta derivado de socavación fluvial o por procesos de erosión a lo largo de un drenaje.	3,398597
Dle	Ladera erosiva	Laderas con procesos erosivos intensos, surcos.	1,149561
Dldebl	Lomo denudado bajo de longitud larga	conjuntos de lomos con relieves menores de 250 m y longitud del eje principal entre 1000m y 2200m.	11,49434
Dldebm	Lomos denudados bajos de longitud media	conjuntos de lomos con relieve menor que 250 m y longitud del eje principal entre 419 m y 1000 m. Forma alargada en dirección perpendicular al drenaje principal	8,650072

(Qda. Bolivia, Peña blanca, Vadorreal y El Cedral)			
Dlea	Ladera erosiva abrupta	Superficies presentes principalmente en las veredas Marcela y Paramo de Monsalve con pendientes entre 16° a 35°, patrón de drenaje subparalelo, presenta procesos erosivos.	12,24754
Dlema	Ladera erosiva muy abrupta	Superficies con pendientes entre 30° a 55°, patrón de drenaje subparalelo a dendrítico, presenta procesos erosivos.	4,363418
Dlie	Ladera inclinada erosiva	Superficie con procesos erosivos con patrón de drenaje subparalelo. Estas laderas se pueden formar en rocas de las Fms. Galembo, Símiti y Neis de Bucaramanga.	1,445651
Dlio	Ladera inclinada ondulada	Superficie de forma ondulada, pendiente (6° -20°), patrón de drenaje a subparalelo. Asociada a las Fm. Símiti, Galembo y Los Santos.	0,235564
Dlo	Ladera ondulada	Superficie de morfología colinada, pendiente inclinada a muy abrupta, patrón de drenaje subparalelo.	7,04636
Dloa	Ladera ondulada abrupta	Superficie de morfología colinada, pendiente 16° a 35°, patrón de drenaje subdendrítico a subparalelo.	12,38029

Dloma	Ladera ondulada muy abrupta	Superficie de morfología colinada, pendiente 35° a 55°, patrón de drenaje subparalelo.	4,668576
Dsa	Superficie de erosión o aplanamiento	Morfología plana a irregular sobre superficies con rasgos de erosión o denudadas.	0,102387
Dts	Terrazas sobreelevadas “colgadas”	Superficies planas a inclinadas, relictas de antiguas terrazas fluviales afectadas por procesos tectónicos, ubicadas en zonas elevadas distantes del Río Suratá.	0,515415
Faaac	Abanico aluvial actual	Superficie con forma de cono, con pendientes inclinadas al ápice a planas lejos del ápice. No tiene aún desarrollado un proceso de incisión.	0,24769
Fca	Cauce aluvial	Canal irregular excavado por erosión de las corrientes perennes (Río Suratá, Río Vetas), erosiona rocas principalmente de la Formación Umir	0,219642
Fpi	Plano o llanura de inundación	Superficie de morfología plana, eventualmente inundable. Se localiza a los márgenes del Río Suratá.	0,153317
Fta	Terraza de acumulación	Superficie plana a suavemente ondulada, limitada por escarpes de diferente altura a lo largo del cauce del Río Suratá.	0,163545

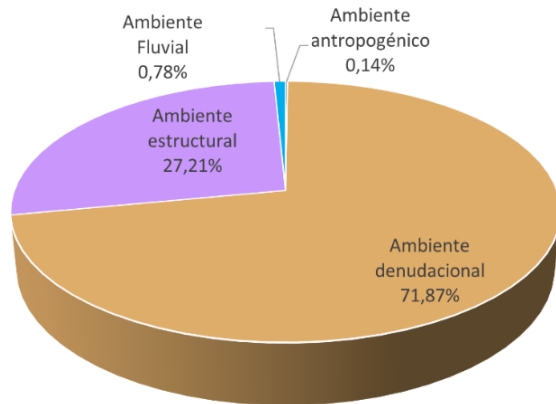
Sefcbc	Espolón faceteado bajo de longitud corta	Producto de fallamiento inverso (Falla Suratá) que generan truncamientos a manera de facetas triangulares. el relieve relativo es menor de 250 m y la longitud del eje principal del espolón es menor que 250 m.	0,507507
Sesbl	Espolón bajo de longitud larga	El espolón tiene una morfología alomada que se extiende perpendicularmente a la tendencia estructural del área. Su relieve es menor a 250 m y tiene una longitud superior a 1000 m	16,85548
Sesbm	Espolón bajo de longitud media	El espolón tiene una morfología alomada que se extiende perpendicularmente a la tendencia estructural del área. Relieve relativo es menor que 250m y la longitud del eje principal del espolón varía entre 300m y 845m.	3,537362
Sesml	Espolones moderados de longitud larga	El espolón tiene una morfología alomada que se extiende perpendicularmente a la tendencia estructural del área. relieve relativo está entre 250m y 1000m y la longitud del eje principal del espolón es mayor que 1000 m. Presente sobre rocas metamórficas de la formación Silgara.	1,581675
Slcp	Ladera contrapendiente	Definida por planos estratificados de la Fm. Tablazo	0,284174

		dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno. Pendientes moderadamente abruptas a extremadamente abruptas).	
Sle	Ladera estructural	Superficie en declive, definida por planos estratificados de la Fm. Tablazo paralelos al sentido de la inclinación del terreno.	0,353241
Slfe	Escarpe de línea de falla	Plano, cóncavo a convexo de pendiente abrupta a muy abrupta. Su origen se relaciona a las superficies definidas por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas afectadas por procesos de erosión acentuada.	4,093795

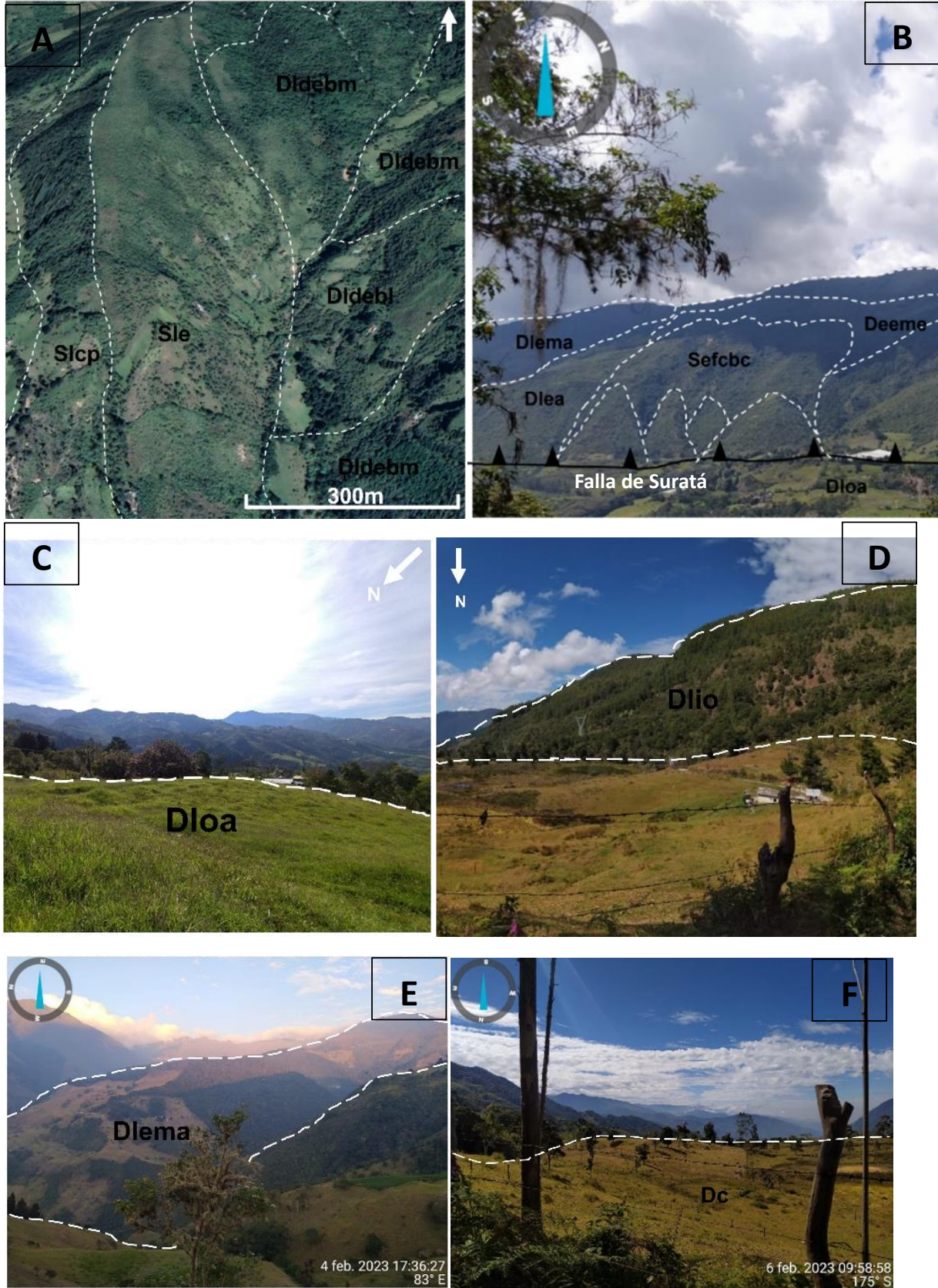
En la zona de estudio se pueden identificar cuatro ambientes geomorfológicos: denudacional, estructural, fluvial y antropogénico. El ambiente denudacional es el más predominante, seguido por el ambiente estructural. La predominancia del ambiente denudacional se debe a la topografía y al clima de la zona que favorecen la acción de procesos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial. En la figura 11 se observa el porcentaje de área que ocupa cada ambiente.

Figura 11

Distribución de ambientes geomorfológicos en el área de estudio.

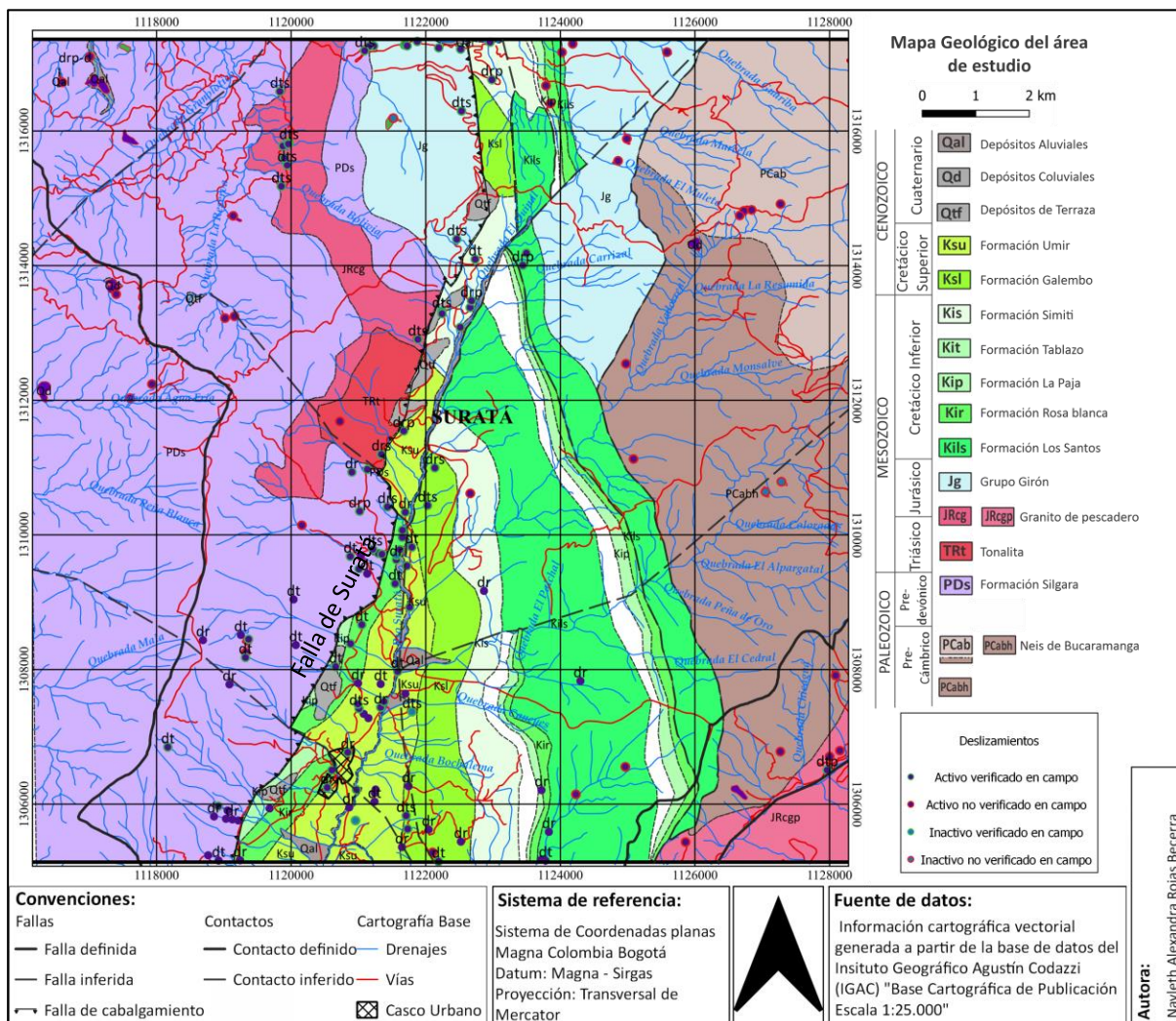
**Figura 12**

Subunidades geomorfológicas en el área de estudio.



Nota. A. Ladera contrapendiente (Slcp), Ladera estructural (Sle), Lomo denudado bajo de longitud media (Dldebm) y Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl) en vereda San Francisco, Suratá; B. Lomos faceteados (Sefcbc), Escarpe de erosión menor (Deeme), Ladera erosiva muy abrupta (Dlema), Ladera erosiva abrupta (Dlea) y Falla de Suratá en la vereda Bachiga; C. Ladera ondulada abrupta (Dloa) en la vereda Porvenir, Suratá; D. Ladera inclinada ondulada (Dlio) en la vereda Marcela; E. Ladera erosiva muy abrupta (Dlema) en vereda Marcela; F. Cima (Dc) en la vereda Marcela.

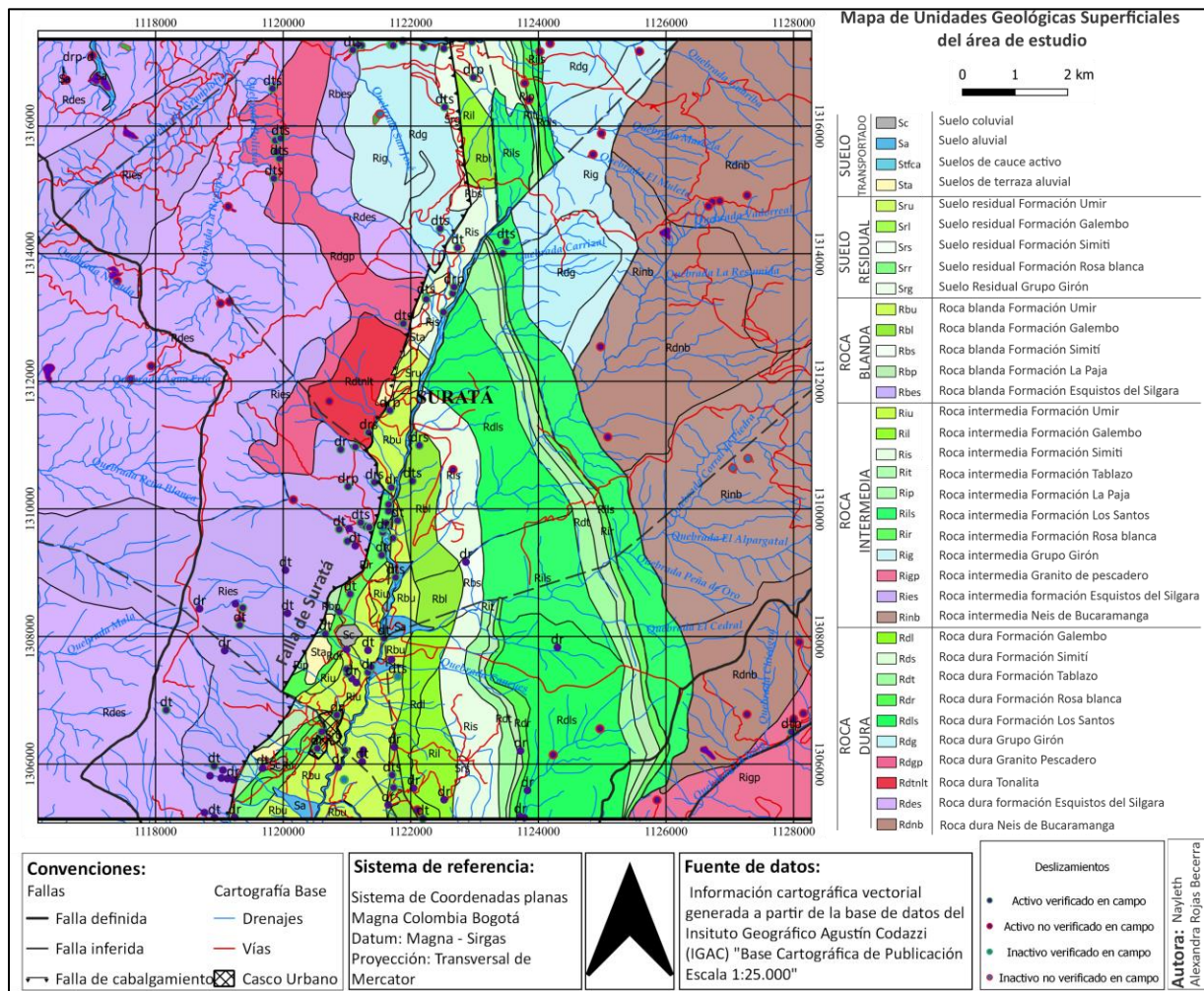
3.1.6 Mapa Geológico



En el área de estudio se reconocieron diecisiete unidades litoestratigráficas identificadas mediante la información analizada y el reconocimiento de campo, se utiliza la nomenclatura establecida por el Servicio Geológico Colombiano en el libro: “Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena” (Etayo et al., 2019)

Con base en el mapa geológico se realizó el mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS).

3.1.7 Mapa de Unidades geológicas Superficiales



El mapa de unidades geológicas superficiales se divide en 5 categorías: suelo transportado, suelo residual, roca blanda, roca intermedia, roca dura. Cada categoría alberga varias unidades geológicas superficiales las cuales se describen en la tabla 3.

Tabla 3

Unidades geológicas superficiales en el área de estudio.

Cód	UGS	Descripción	% área
Sc	Suelo coluvial	Depósitos matriz soportados de clastos muy gruesos, planos y elongados ásperos color pardo anaranjado, Suelo de aprox. 2.5m de espesor, composición heterogénea, presencia de grietas, matriz de limo a arena fina, granos equidimensionales, subangulares a subredondeados, sin gradación, compacidad moderada, densidad relativa suelta, consistencia muy alta, selección muy pobre.	0,104
Sa	Suelo aluvial	Depósitos intermedios, compuestos de clastos desde grava fina hasta bloques equidimensionales, subredondeados, ásperos, color anaranjado claro, y matriz de areniscas medias, equidimensionales, subangular, deposito húmedo, con fisuras, sin gradación, compacidad moderada, densidad relativa: densa, pobremente seleccionado, No plástico.	0,435
Stfc a	Suelos de cauce activo	Sedimentos recientes depositados por el río Suratá consisten en bloques, cantos, grava, arena y finos con formas subredondeadas a redondeadas.	0,378
Sta	Suelos de terrazza aluvial	Depósitos aluviales tamaño de grano arena, grava, cantos y bloques, redondeados a subredondeados, con alta esfericidad.	0,446
Sru	Suelo residual	Suelo de 7m de espesor, seco con grietas, matriz soportada, textura de arena fina a gruesa, predominando la fina. granos	0,312

	Formación Umir	esféricos, subredondeados, lisos, deposito sin gradación, de compacidad moderada, densidad relativa suelta, moderadamente seleccionado, No plástico y consistencia muy alta.	
Srl	Suelo residual Formación Galemo	Suelo matriz soportado de hasta 5m de espesor, textura de grano desde limo hasta grano muy grueso, clastos muy gruesos equidimensionales y planos y elongados, presencia de concreciones de caliza, suelo compuesto por chert, lutitas y micritas. Suelo seco, con grietas y algunas veces estructuras relictas, granos equidimensionales, subredondeados a subangulares, sin gradación, compacidad débil a moderada, densidad suelta, moderadamente seleccionado, consistencia alta, no plástico.	0,047
Srs	Suelo residual Formación Símiti	Deposito matriz soportado, de 4.5m de espesor, resistencia de S3 a S5, horizonte c de meteorización, matriz desde limo hasta arena media, granos subangulares. Suelo seco de color 2.5Y 8/3, presencia de grietas, sin gradación, densidad relativa suelta, moderadamente seleccionado, consistencia alta a muy alta.	0,076
Srr	Suelo residual Formación Rosa blanca	Suelo matriz soportado con resistencia S3, horizonte B en el perfil de meteorización, contiene materia orgánica, suelo con granos que varían desde limo hasta grava gruesa, subangulares, de color pardo anaranjado, suelo húmedo con fisuras, sin gradación, compacidad débil, densidad relativa suelta a muy suelta, pobremente seleccionado, ligeramente plástico.	0,082
Srg	Suelo Residual Grupo Girón	Suelo de limo arenoso a arenoso con color de rojizo a pardo y amarillo a amarillo naranja.	0,329

Rbu	Roca blanda Formación Umir	Arenisca de color 10R 6/1, descolorida por la meteorización, resistencia R1, roca altamente meteorizada, textura clástica cementada.	2,983
Rbl	Roca blanda Formación Galembó	Lutitas de granos equidimensionales, subredondeados, lisos, roca descolorida color 10YR 2 2/1, resistencia R1, capas de 0.1 a 0.3cm de espesor (Lamina delgada), calidad de macizo muy mala.	1,605
Rbs	Roca blanda Formación Simití	Capas finas de lodolitas negras micáceas ligeramente calcáreas, calidad de macizo muy mala.	0,238
Rbp	Roca blanda Formación La Paja	Lutitas negras blandas meteorizadas en capas delgadas, genera una morfología suave	1,419
Rbes	Roca blanda Formación Esquistos del Silgara	Esquistos micáceos descompuestos de color 2.5Y 6/1, resistencia R1, capas de espesor de 0.3 a 0.6cm (Lamina media), calidad de macizo muy mala, Horizonte C en el perfil de meteorización.	0,501
Riu	Roca intermedia Formación Umir	Lodolitas de color gris oscuro a negro y arenisca silícea de grano fino.	0,365
Ril	Roca intermedia Formación Galembó	Intercalación de calizas, chert y lutitas. calidad de macizo regular, diaclasado, diaclasas abiertas de superficie teñida, plana y rugosa. Rocas del macizo débilmente meteorizadas, calizas en capas medias de resistencia R3, chert en capas delgadas de resistencia R3, lutitas en capas delgadas a muy delgadas de resistencia R1	0,958
Ris	Roca intermedia Formación Simití	Arenisca silícea moderadamente meteorizada, tamaño de grano muy fino, granos equidimensionales, subangulares, ásperos de color 2.5YR 4/1, resistencia R4, capas de espesor medio, calidad de macizo regular.	3,455

Rit	Roca intermedia Formación Tablazo	Calizas arcillosas y arenisca de grano fino, morfología abrupta.	0,113
Rip	Roca intermedia Formación La Paja	Lutitas negras blandas en capas delgadas, genera una morfología suave	0,148
Rils	Roca intermedia Formación Los Santos	Lutitas descoloridas color 2.5YR 5/1, resistencia R1, en capas medias y areniscas descoloridas de grano muy fino, color 2.5YR 4/2, resistencia R2, en capas gruesas, granos equidimensionales, subredondeados. macizo de calidad regular y moderadamente meteorizado.	5,245
Rir	Roca intermedia Formación Rosa blanca	caliza mudstone y Wackestone, cercanas a zona de falla.	1,263
Rig	Roca intermedia Grupo Girón	Areniscas de grano muy fino, capas interestratificadas de limolita.	3,563
Rig p	Roca intermedia Granito de pescadero	Cuarzomonzonita cercana a zona de falla.	1,943
Ries	Roca intermedia formación Esquistos del Silgara	Esquistos micáceos cercanos a zonas de falla.	13,48

Rin b	Roca intermedia Neis de Bucaraman ga	Rocas metamórficas de alto grado, estructura masiva a bandeada, fábrica orientada	7,271
Rdl	Roca dura Formación Galemo	Lutitas y micritas con resistencia R1, débilmente meteorizada capas delgadas, presencia de diaclasa abiertas de rugosidad suave y superficie plana y teñida, calidad de macizo buena.	0,705
Rds	Roca dura Formación Simití	Compuesta por lutitas, calizas (micrita) y mantos de carbón. Resistencia R2 para las lutitas y calizas, se presentan ambas en capas delgadas, macizo de calidad regular a buena con diaclasas estrechas de superficie limpia, suave y ondulada, rocas débilmente meteorizadas a frescas.	0,125
Rdt	Roca dura Formación Tablazo	Calizas arcillosas y arenisca de grano fino, morfología abrupta.	1,762
Rdr	Roca dura Formación Rosa blanca	caliza mudstone y wackestone resistencia a la compresión simple: roca muy dura R5, capas de espesor 10-30 cm (capa media), calidad del macizo buena, Roca débilmente meteorizada. Diaclasas sin relleno de superficie rugosa y forma planar con abertura muy estrecha a parcialmente abierta	0,821
Rdls	Roca dura Formación Los Santos	Lutitas y areniscas no meteorizadas a débilmente meteorizadas en macizo de buena calidad.	5,933
Rdg	Roca dura Grupo Girón	Arenisca de grano muy fino en capas medias, granos de forma plana y elongada, subangulares ásperos. color 2.5YR4/4 resistencia a la compresión simple R4, calidad del macizo buena	4,066
Rdg p	Roca dura Granito Pescadero	Cuarzomonzonita de resistencia R5, calidad de macizo buena, diaclasas de abertura muy estrecha a moderadamente abierta, superficies teñidas, rugosas, planas y secas.	3,404

Rdt nlt	Roca Tonalita	dura	Granito débilmente meteorizado, descolorido de resistencia R6, compuesto por biotita, cuarzo, plagioclasa y anfíboles.	1,127
Rde s	Roca formación Esquistos del Silgara	dura	Cuarcita y Esquistos micáceos de resistencia R2, R4 y R5 de espesor de capa de lámina muy delgada a media, calidad de macizo buena. diaclasas de abertura muy estrecha a parcialmente abierta de superficie teñida.	21,52
Rdn b	Roca Neis Bucaraman ga	dura	Paraneis horblendico, cuarcita, neis biotítico.	13,75 3

Nota. Los colores fueron asignados siguiendo la tabla de colores de Munsell (2009). El perfil de meteorización al que se hace referencia es el de Deere y Patton en 1971 (citado en SGC, 2017).

Figura 13

Unidades Geológicas Superficiales en el área de estudio.



Nota. A. Coluvión vía Suratá-California 1.6 km después de Suratá; B. Depósito aluvial en carretera uña de gato vía Suratá -Cartagua; C. Suelo residual de la Formación Umir a 5Km de la laguna del alto de Cachiri; D. Suelo residual Formación Símiti a 20m del Cerro Padilla; E. Suelo residual Formación Galembo a 350m del Bolo club el Salitre; F. Roca Blanda Formación Umir a 7.1Km de la Laguna Cachiri.

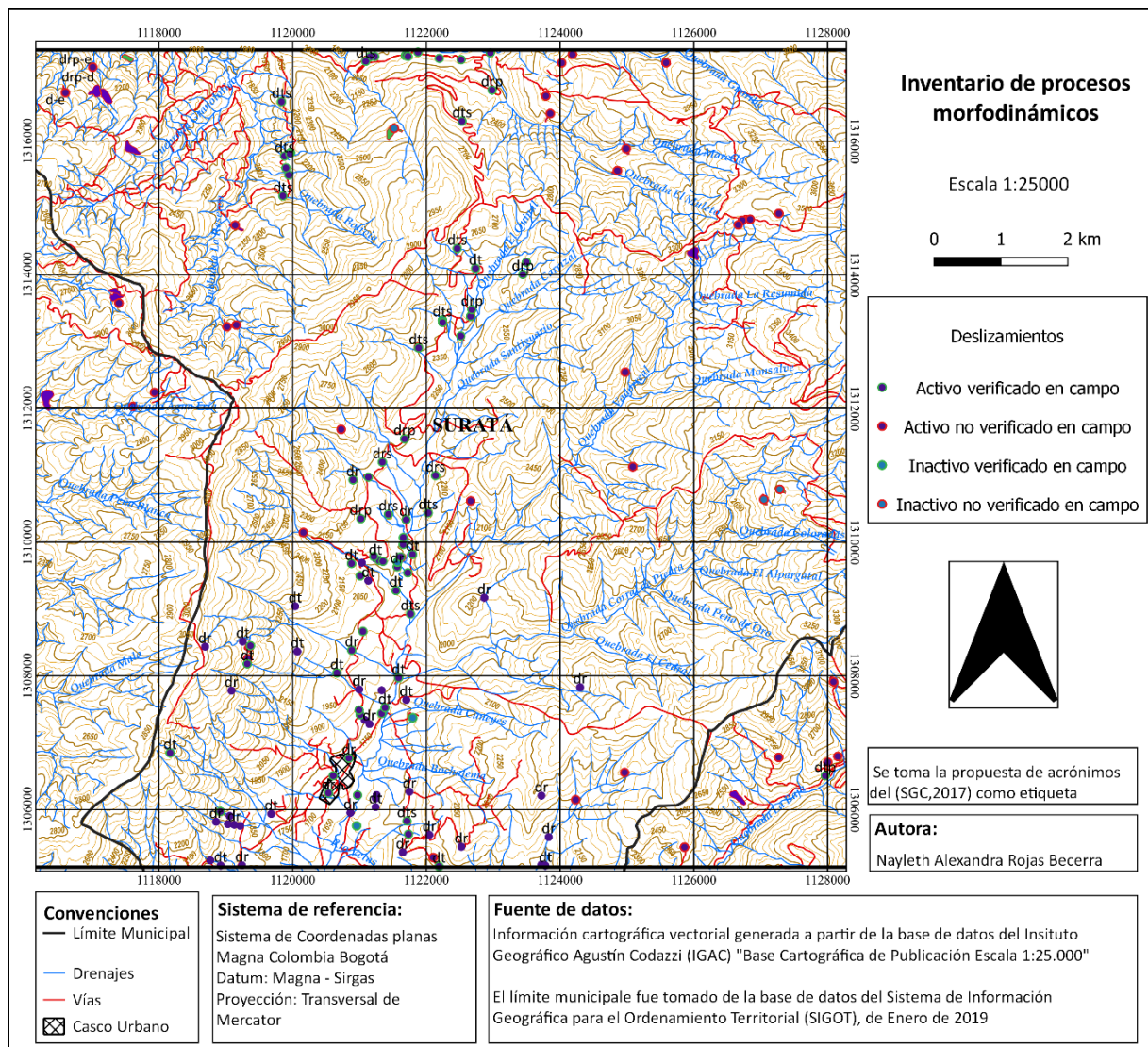
Figura 14

Unidades Geológicas Superficiales en el área de estudio.



Nota. A. Roca dura Formación Símiti a 4.8km de la Laguna de alto Cachiri. B. Roca dura Formación Rosa Blanca vía Suratá-Cachiri; C. Roca dura Grupo Girón en la vereda Marcela; D. Roca dura Granito de Pescadero en vereda Gramalotico; E. Roca dura Formación Galembo en a 650 metros de Bolo Club el Salitre; F. Roca blanda Formación Galembo en desvío a la derecha después de la Laguna; G. Roca dura formación Esquistos del Silgara a 1.6km de Cachiri vía La Gruta; H. Roca dura Grupo Girón a 3.9 km de Cachiri.

3.2 Mapa de inventario de procesos morfodinámicos



En la zona de estudio, se ha identificado un área total de 366220 m² afectada por deslizamientos. Se han registrado un total de 165 deslizamientos, los cuales se clasifican en tres categorías: 38 de ellos fueron reportados por (Fajardo & Mejía, 2017), 6 fueron documentados por (Simma - SGC, n.d.), mientras que los 121 restantes fueron registrados por la autora del presente documento, 69 en campo y 52 mediante fotointerpretación.

De los movimientos registrados en el inventario 80% (132 deslizamientos) se utilizaron para entrenar los modelos de predicción mientras que el 20% (33 deslizamientos) restante se usó para validar los modelos.

Figura 15

Deslizamientos en el área de estudio.



Nota. A. Deslizamiento rotacional en el casco urbano de Suratá carrera 5 abajo del cementerio Camposanto San Sebastián; B. Deslizamiento traslacional vía Suratá Cachirí; C y D. Deslizamiento rotacional vereda Porvenir; E. Deslizamiento rotacional compuesto vereda Cartagua, Suratá; F. Deslizamiento traslacional vía vereda Bonanza a casco urbano Suratá.

Figura 16

Deslizamientos en el área de estudio.



Nota. A. Deslizamiento rotacional a 6.3km de la Laguna Cachirí vía Suratá-Cachirí; B. Deslizamiento traslacional en la vereda Gramalotico, Suratá; C. Deslizamiento traslacional en

vereda Palchal, Suratá; D. Deslizamiento traslacional a 4.2 km de Cachirí; E. Deslizamiento traslacional a 4 Km de la laguna de alto Cachirí - Cachirí; F. Deslizamiento traslacional en la vereda Gramalotico; G. Deslizamiento traslacional vía Suratá- California 130 metros después del Glamping Wabisabi.

3.3 Scripts de Python

Los scripts de procesamiento estadístico se crean para permitir que cualquier persona que tenga los parámetros de entrada necesarios pueda utilizarlos para generar un modelo de susceptibilidad a deslizamientos usando pesos de evidencia o análisis discriminante lineal mediante el lenguaje de programación Python. A continuación, en las figuras 17 y 19 se presenta una breve descripción del procesamiento realizado por los scripts y de sus resultados al ejecutarse.

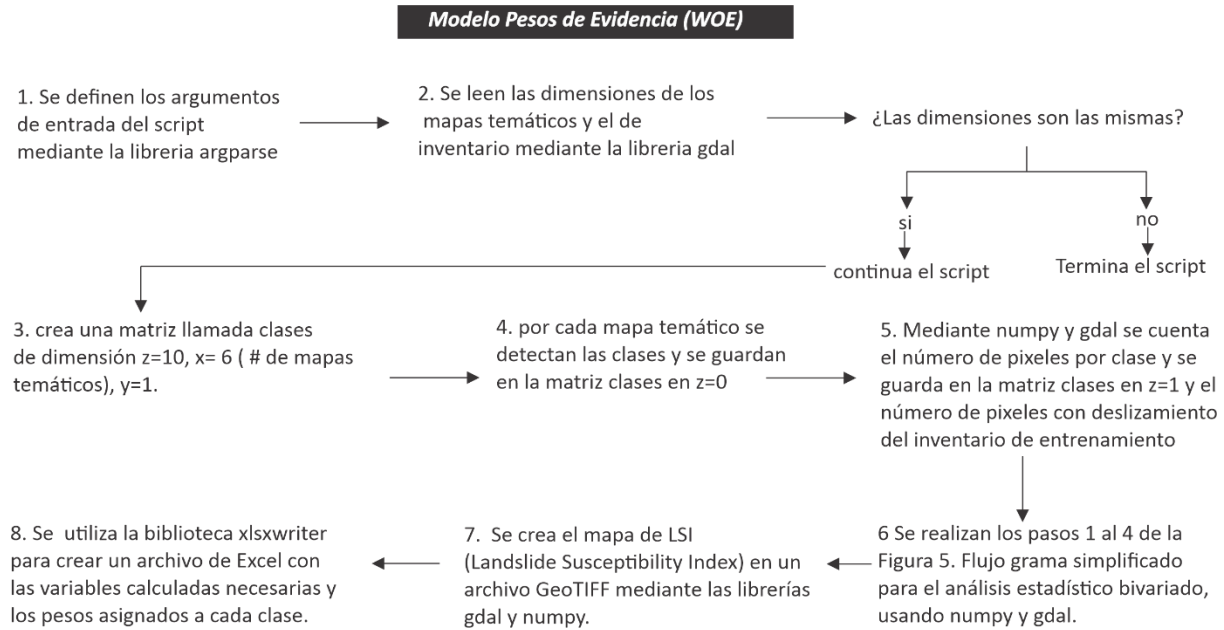
Los scripts completos se pueden consultar en el GitHub de la autora mediante los siguientes links: <https://github.com/nayleth22/Landslide-susceptibility-WOE>

<https://github.com/nayleth22/Landslide-susceptibility-LDA>

3.3.1 Script pesos de evidencia

Figura 17

Flujograma simplificado del script WOE generado mediante Python 3.8.10



Como resultado, el script genera: el mapa de Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI) en formato TIFF, un archivo de Excel con una hoja de cálculo por cada mapa temático, que indica las variables calculadas necesarias y los pesos asignados a cada clase de cada mapa temático. Un ejemplo de esta información se puede visualizar en la figura 18 adjunta.

Figura 18

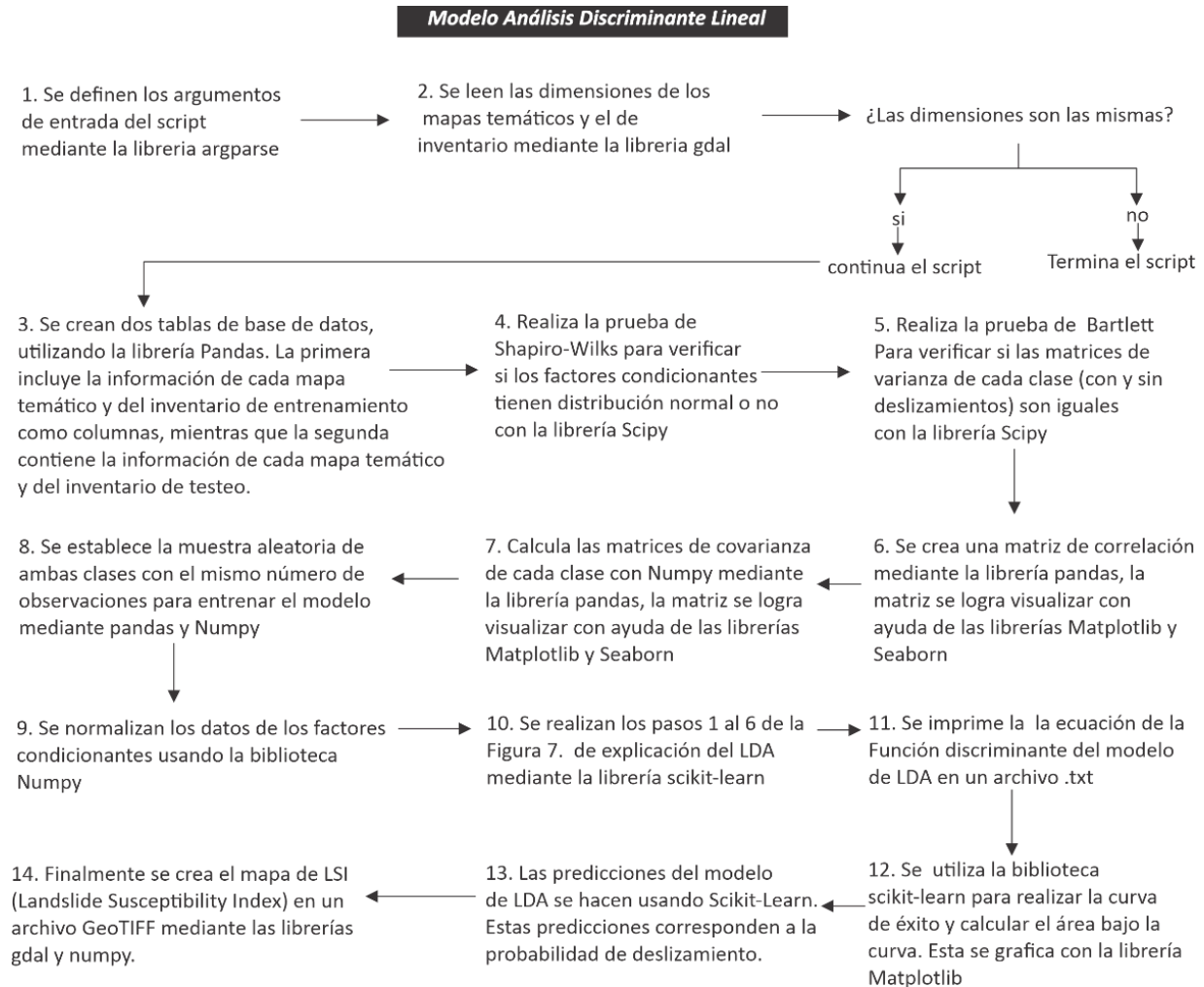
Hoja de Excel del mapa curvatura arrojada por el script modelo de pesos de evidencia.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	pixeles en el mapa	pixeles con deslizamiento								
2	948362	1899								
3	clase	pixeles	pixeles con deslizamiento	npix1	npix2	npix3	npix4	W+	W-	Wf
4	concavo	430915	977	978	924	429938	516525	0,123939	-0,11634	0,24028
5	plano	79512	168	169	1733	79344	867119	0,058177	-0,0055	0,063673
6	convexo	437935	754	755	1147	437181	509282	-0,15156	0,113974	-0,26553

3.3.2 Script análisis discriminante

Figura 19

Flujograma simplificado del script LDA generado mediante Python 3.8.10



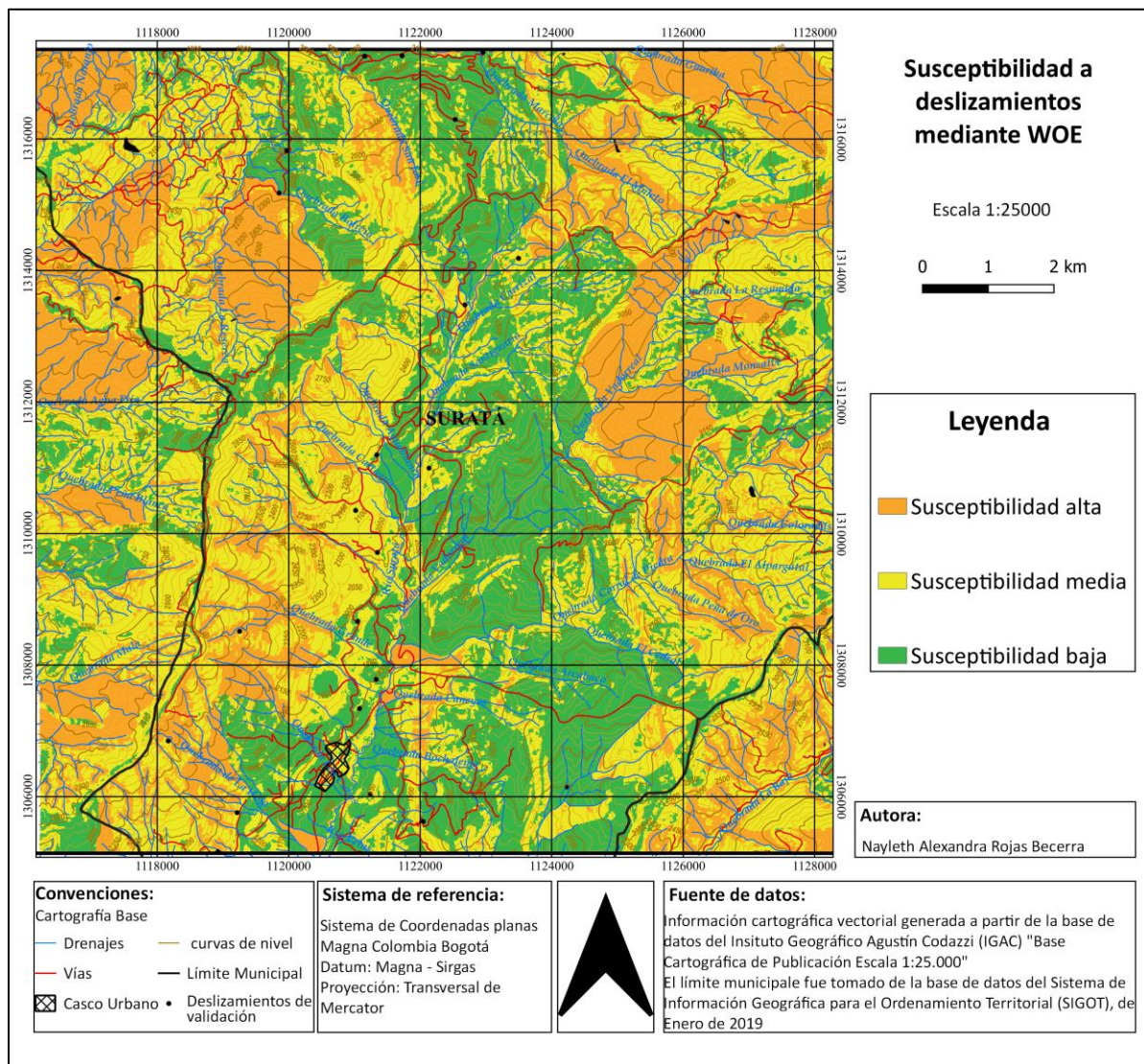
El script genera un archivo de texto (.txt) que muestra los argumentos de entrada, los resultados de las pruebas Shapiro-Wilks y Bartlett, así como los coeficientes de la función discriminante. Además, produce imágenes en formato PNG que incluyen la matriz de covarianza para las clases con y sin deslizamientos, la curva de éxito para los datos de entrenamiento y validación, así como una representación tridimensional de la relación de la muestra de

entrenamiento con cada uno de los factores condicionantes antes y después de aplicar el análisis discriminante lineal.

Además, el script genera un mapa de Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI) en formato TIFF.

3.4 Mapas de susceptibilidad a deslizamientos

3.4.1 Mapa de susceptibilidad a deslizamientos mediante pesos de evidencia (WOE)



Susceptibilidad alta

Corresponde al 24,646% del área total de estudio. Predominan los deslizamientos activos, presenta cantidades similares tanto de deslizamientos rotacionales como deslizamientos traslacionales, esta zona tiene la mayor densidad de procesos morfodinámicos. Las veredas en las que predomina esta categoría son: Bachiga, Marcela y Capacho en Suratá; Santa Martha y Paramillo en Matanza; Centro en California. La susceptibilidad está asociada principalmente a suelos aluviales, rocas intermedias de la formación Esquistos del Silgará, rocas intermedias del grupo Girón y del Neis de Bucaramanga que se encuentran en zonas de influencia de fallas. Esta categoría se presenta principalmente sobre las geoformas lomo denudado bajo de longitud larga, espolones bajos y moderados de longitud larga, escarpe de erosión menor, abanico aluvial actual y ladera erosiva muy abrupta. Se asocia a pendientes abruptas (16° - 35°) a muy abruptas (35° - 55°). Predominan las áreas con curvatura cóncava y con alta densidad de drenajes.

Susceptibilidad media

Representa el 45,200% del área total de estudio. Los deslizamientos activos son los más frecuentes en esta categoría al igual que los deslizamientos rotacionales. Esta categoría predomina en el casco urbano de Suratá al igual que en las veredas: Gramalotico, Porvenir, Cartagua y Paramo de Monsalve en Suratá; Maveda, Sucre y Filo en Matanza; Baja y Angostura en California. La susceptibilidad está asociada mayormente a rocas intermedias y duras de la formación Silgará, roca dura tonalita, roca intermedia y dura de la formación neis de Bucaramanga, arenisca dura de la formación Símiti. Esta categoría aparece en su mayor parte sobre las geoformas escarpe de línea de falla, ladera estructural, ladera erosiva y ondulada abrupta, espolón bajo de longitud larga y ladera ondulada muy abrupta. Se asocia a pendientes moderadamente abruptas (8° - 16°) a abruptas

(16°-35°). Las vías de la vereda Gramalotico en Suratá y las vías de Angostura y Centro en California que caen dentro del área de estudio están sobre esta categoría de susceptibilidad media.

Susceptibilidad baja

Ocupa 30,152% del área total de estudio. Esta categoría predomina en las veredas Agua Blanca, Palchal, Nueva vereda, San Francisco, Violeta y Panaga en Suratá; Bachiga en Matanza. En esta categoría la susceptibilidad a deslizamientos está asociada en su mayoría a Arenisca dura del Grupo Girón, Roca dura Granito Pescadero, Roca dura de la Formación Tablazo, Roca dura de la formación Los Santos, roca intermedia de la formación Rosa blanca, rocas intermedias de la formación Símiti, formación Galembo y Formación Los Santos, rocas blandas de la formación La Paja y de la Formación Umir. A esta categoría se asocian las geoformas: lomo denudado bajo de longitud media, ladera ondulada, cima y ladera contrapendiente. Se asocia a pendientes desde planas hasta moderadamente abruptas.

3.4.2 Mapa de susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis discriminante lineal (LDA)



Susceptibilidad alta

Corresponde al 40,544% del área total de estudio. Esta categoría posee la mayor densidad de deslizamientos y con respecto al casco urbano de Surata, se muestra desde la calle 1c hasta la calle 9. Las veredas en las que la susceptibilidad alta predomina son: Bachiga, Marcela y Palchal en Surata; Sucre en Matanza; Centro y Baja en California. La susceptibilidad se asocia principalmente zonas con influencia de fallas, litológicamente se asocia a suelo aluvial, suelo coluvial, suelo residual de la formación Rosa Blanca, roca intermedia de la formación Esquistos

del Silgara, roca intermedia del granito de pescadero, roca intermedia Grupo Girón, Roca intermedia formación Símiti, Galembo, Rosa Blanca, Los Santos y roca intermedia neis de Bucaramanga. Esta categoría se presenta principalmente sobre las geformas escarpe de erosión menor, espolón facetado bajo de longitud corta, espolones moderados de longitud larga, ladera erosiva abrupta y muy abrupta, Ladera ondulada abrupta y muy abrupta, ladera inclinada erosiva, lomos denudados bajos de longitud larga. Se asocia a pendientes abruptas (16° - 35°) a muy abruptas (35° - 55°).

Susceptibilidad media

Ocupa 54,582% del área total de estudio. Esta categoría predomina en las veredas Capacho, Gramalotico, Porvenir, Cartagua, Agua Blanca y San Francisco en Suratá; Paramillo, Filo y Santa Martha en Matanza; Angostura en California. La susceptibilidad se asocia principalmente a roca blanda de la Formación La Paja, roca blanda y dura de la formación Esquistos del Silgara, roca dura del Neis de Bucaramanga, arenisca dura del Grupo Girón, roca dura de la Formación Los Santos, Galembo y Rosa Blanca. A esta categoría se asocian las geformas: escarpe de línea de falla, lomos denudados bajos de longitud larga y media, ladera erosiva y ondulada abrupta. Adicionalmente Se asocia a pendientes desde moderadamente abruptas (8° - 16°) a abruptas (16° - 35°).

Susceptibilidad baja

Representa solo el 4,873% del área total de estudio. Las veredas en las que predomina esta categoría son: Panaga y Nueva Vereda en Suratá. La susceptibilidad se asocia mayormente a rocas blandas de la formación Umir, formación La Paja y formación Símiti. Esta categoría aparece en

su mayor parte sobre las geoformas terraza de acumulación, ladera ondulada y ladera ondulada abrupta. Se asocia con pendientes que van desde planas hasta moderadamente abruptas (0° a 16°).

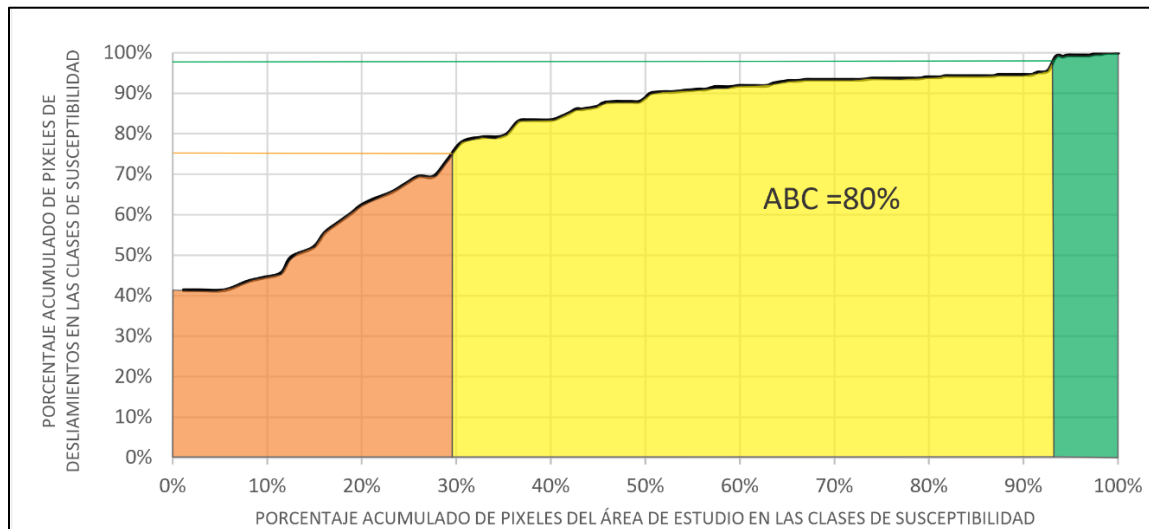
3.5 Validación de los mapas de susceptibilidad

3.5.1 Curva de éxito pesos de evidencia

El área bajo la curva (ABC) (Figura 20) del modelo de pesos de evidencia dio 80% esto demuestra una alta correlación entre los valores observados de los datos y los valores que se predicen, además indica que el mapa tiene una buena capacidad para predecir la probabilidad de que ocurra un deslizamiento en el área de estudio.

Figura 20

Curva de éxito categorizada modelo de pesos de evidencia.



Análisis de la coherencia entre las categorías de susceptibilidad y los factores condicionantes en cada una de ellas: en el caso de la susceptibilidad alta está en línea con lo observado en campo, ya que la presencia de una curvatura cóncava en el terreno favorece la

acumulación de agua, lo cual, sumado a una alta densidad de drenajes, pendientes abruptas, macizos fracturados o suelos, puede generar deslizamientos. Por otra parte, la Susceptibilidad baja se asocia con rocas duras, intermedias y algunas rocas blandas que se encuentran en pendientes que van desde planas hasta moderadamente abruptas. Estos factores, combinados, favorecen la resistencia al corte.

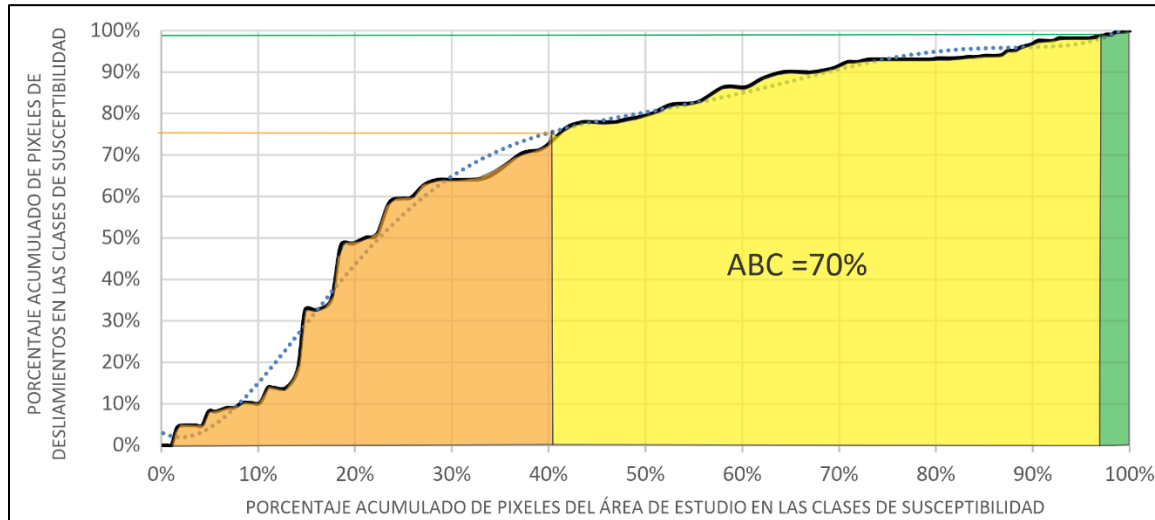
El WOE identificó las siguientes clases como las que más contribuyen a la generación de deslizamientos: suelo aluvial, lomo denudado bajo de longitud larga, espolones moderados de longitud larga, roca intermedia del grupo Girón, roca intermedia de la formación La Paja, escarpe de erosión menor y pendientes muy abruptas (35° - 55°). Estas clases fueron las que recibieron un mayor peso en el modelo.

3.5.2 Curva de éxito Análisis Discriminante

El ABC de esta curva de éxito (Figura 21) dio 70% lo que indica que a pesar de que el modelo no tiene una muy buena capacidad para pronosticar donde habrá o no deslizamientos, el pronóstico que realiza alcanza a ser aceptable.

Figura 21

Curva de éxito categorizada modelo análisis discriminante.



La significancia dada por el modelo de análisis discriminante a los factores condicionantes de mayor a menor fue: pendientes > unidades geológicas superficiales > subunidades geomorfológicas > distancia a drenajes > distancia a vías > curvatura. Esto indica que según el modelo el factor con mayor capacidad de discriminar entre zonas con y sin deslizamientos es el factor condicionante pendientes.

Al analizar las categorías de susceptibilidad y los factores condicionantes en cada una de ellas se encontró que a la categoría de susceptibilidad alta se asocian rocas con influencia de zonas de falla, suelos, geoformas como escarpes, espolones, laderas erosivas, además se asocia a pendientes abruptas y muy abruptas. Por otro lado, la categoría de Susceptibilidad baja se asocia mayormente a rocas blandas que se encuentran en geoformas como: terraza de acumulación, ladera ondulada y ladera ondulada abrupta, pero que tienen pendientes que van de 0 a 16° lo cual favorece considerablemente su estabilidad.

4. Discusión

Los métodos utilizados para calcular la susceptibilidad a deslizamientos en la zona de estudio resultaron capaces de describir la distribución de los deslizamientos y predecir nuevos eventos. Ambos métodos mostraron coherencia entre las categorías de susceptibilidad y los factores condicionantes en cada una de ellas. Sin embargo, se observó que el método de pesos de evidencia (WOE) y el análisis discriminante lineal (LDA) presentan diferencias, en algunas zonas el WOE muestra baja susceptibilidad mientras que el LDA alta susceptibilidad. El modelo LDA logra identificar la mayoría de las zonas donde se han registrado deslizamientos, pero también sobreestima la susceptibilidad de deslizamientos en zonas estables, lo que puede deberse a que no se cumplen todas las asunciones del modelo.

El modelo de análisis discriminante lineal cuenta con una desventaja importante y es su premisa de la distribución normal en los factores predictores, dado que en geología no todos los factores cumplen esta premisa, sin embargo, el modelo demuestra ser lo suficientemente robusto como para dar resultados aceptables cuando no se cumple dicha premisa. Una de las ventajas del LDA es que brinda la posibilidad de diferenciar qué factores condicionantes permiten separar de mejor manera las zonas con deslizamientos y las zonas sin deslizamientos, sin necesidad de criterio experto y así mismo eliminar aquellos factores que no se consideren significativos para el análisis.

Por otro lado, el método de pesos de evidencia es un modelo sencillo, de más rápida y fácil implementación, que destaca por requerir menos premisas o supuestos que el análisis discriminante lineal (LDA). En otras palabras, el WOE ofrece una mayor flexibilidad en su aplicación, sin embargo, una de las desventajas que presenta frente al LDA es que requiere criterio experto para seleccionar los factores condicionantes de deslizamientos.

En este trabajo, se compararon los mapas resultantes con los mapas de susceptibilidad existentes (Figura 22). Se observó que el mapa generado por Fajardo y Mejía (2017) a escala 1:10.000, que solo cubre una pequeña parte del área de estudio, tiene una mayor coincidencia con el mapa generado mediante el modelo WOE. Ambos mapas coinciden en las susceptibilidades predichas en la zona este de la falla Suratá, así como en las zonas con pendientes más bajas. Sin embargo, difieren en las categorías asignadas para la zona oeste de la falla Surata, ya que el modelo WOE asigna principalmente susceptibilidades medias a altas, mientras que el de Fajardo y Mejía asigna susceptibilidades bajas, esto puede deberse a varios factores como: el mapa de Fajardo y Mejía es de susceptibilidad a movimientos en masa mientras que el del modelo WOE es de susceptibilidad a deslizamientos, los factores condicionantes usados en cada método son distintos, se usan metodologías diferentes, utilizan diferentes escalas de trabajo, entre otros.

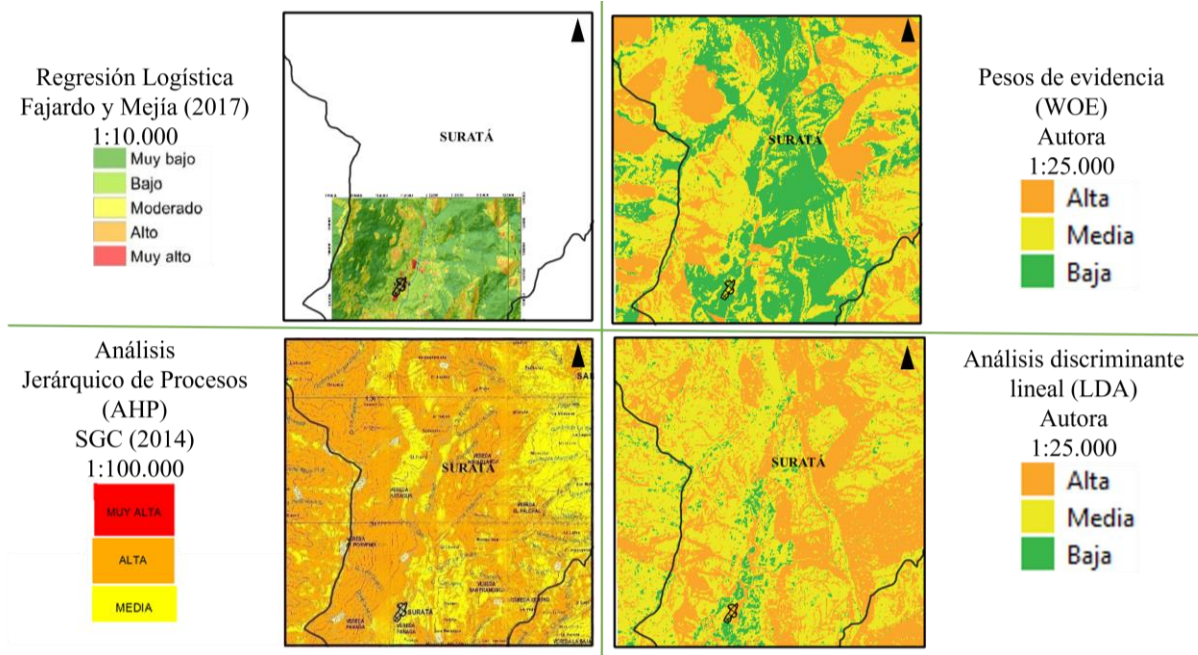
Por otro lado, el mapa generado con el modelo LDA presenta una mayor similitud con el mapa propuesto por el SGC en el año 2014 a escala 1:100.000. Este mapa clasifica principalmente la zona de estudio como áreas de alta y media susceptibilidad. A diferencia del mapa del SGC, el mapa LDA logra distinguir zonas estables en donde la pendiente es más baja, proporcionando mayor detalle.

Aunque el casco urbano de Suratá y sus veredas más cercanas ya tienen un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:10.000, el mapa generado mediante el modelo WOE en este trabajo a escala 1:25.000 abarca un mayor número de veredas del municipio de Suratá. Además, como la zona cubierta por el mapa 1:10.000 queda incluida en el mapa de este trabajo, se pudo observar la cantidad de detalles que se lograron con la escala 1:25.000, en comparación con la escala 1:10.000. En general, el mapa generado por el modelo WOE en este

trabajo proporciona una cobertura más amplia y con resultados equiparables a los del mapa escala 1:10.000.

Figura 22

Comparación con trabajos anteriores.



Nota. Los mapas de susceptibilidad generados en este trabajo son de susceptibilidad a deslizamientos mientras que los otros mostrados son de susceptibilidad a movimientos en masa.

5. Conclusiones

Según el modelo del análisis discriminante lineal, la susceptibilidad a deslizamientos en el área de trabajo se distribuye de la siguiente manera: susceptibilidad alta 40,544%, Susceptibilidad media 54,582% y susceptibilidad baja 4,873% del área total de estudio. Mientras que para el modelo de Pesos de evidencia la distribución fue: susceptibilidad alta 24,646%, susceptibilidad media 45,200% y susceptibilidad baja 30,152% del área total de estudio

Los mapas generados en este trabajo a escala 1:25.000 ofrecen una cobertura más amplia del municipio de Suratá, proporcionando mayor cobertura de área en comparación con el mapa 1:10.000 de Fajardo y Mejía, que se enfoca en una zona más localizada. Además, comparado con el mapa existente del Servicio Geológico Colombiano, los mapas de este trabajo proporcionan una escala de trabajo con mayor cantidad de detalles.

Aunque el modelo LDA no cumplió algunas de las suposiciones que establece (distribución normal de los factores e igualdad en las matrices de varianza-covarianza dentro de cada grupo), el pronóstico que realiza alcanza a ser aceptable según la curva de éxito. Sin embargo, el mapa resultante sobreestimó la susceptibilidad de deslizamientos en algunas áreas que son en realidad estables. Por lo tanto, se recomienda una evaluación cuidadosa del mapa resultante del LDA antes de la toma de cualquier decisión.

La validación realizada permite afirmar que el mapa realizado con WOE tiene una buena capacidad para predecir la probabilidad de que ocurra un deslizamiento en el área de estudio. Esto

resulta útil para identificar las áreas con mayor susceptibilidad de deslizamiento y tomar decisiones informadas para evaluar la amenaza y con base en ello, la gestión de riesgos, la planificación territorial o la implementación de medidas de prevención de deslizamientos.

El método WOE produjo resultados detallados y comparables a los del mapa a escala 1:10000 de Fajardo y Mejía (2017), mientras que el método LDA generó resultados aceptables, pero con menos detalle que se asemejan al mapa a escala 1:100.000 del SGC (2014).

El mapa generado mediante el método WOE en este trabajo a escala 1:25.000 proporciona una cobertura más amplia del municipio de Suratá, enfocada a los movimientos en masa tipo deslizamiento y con resultados equiparables a los del mapa 1:10.000 de Fajardo y Mejía.

Con base en los modelos obtenidos, el mapa de distancia a vías y sus clases no son muy significativos para estimar la probabilidad de que se generen deslizamientos. Esto se debe a que la mayoría del área de estudio no presenta una alta relación entre los cortes de los taludes por el trazo de la vía y los deslizamientos. Sin embargo, durante el trabajo de campo, se observó una alta relación entre los cortes de los taludes por el trazo de la vía y los deslizamientos en las veredas Gramalotico, Violeta y Marcela de Suratá, hacia el norte de la zona estudiada.

6. Recomendaciones

Si se tiene la intención de construir nuevas carreteras o vías de transporte en las veredas Gramalotico, Violeta y Marcela de Suratá, se recomienda evitar las áreas de mayor susceptibilidad a deslizamientos. En caso de que esto no sea posible, se sugiere crear diseños mejorados que contemplen las condiciones del terreno y minimicen la probabilidad de generación de deslizamientos.

Se recomienda transformar los factores condicionantes mediante procesos matemáticos para que cumplan la premisa de distribución normal que requiere el análisis discriminante lineal y poder evaluar el desempeño de este método cuando se cumple esta premisa.

Referencias Bibliográficas

- Aristizábal-Giraldo, E., Vasquez Guarin, M., & Ruíz, D. (2019). Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. *Tecnológicas*, 22(46), 39–60. <https://doi.org/10.22430/22565337.1247>
- CDMB. (2006). Plan de ordenamiento y manejo Microcuenca Suratá Alto.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Etayo, F., Moreno, G., Guzmán, G., Montoya, D., & Terraza, R. (2019). Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena.
- Fajardo, N., & Mejía, L. (2017). Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa, escala 1:10.000 para el municipio de Suratá, Santander, aplicando métodos estadísticos multivariados.
- França, S. (2012). Estudio comparativo de métodos para la evaluación de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales: Aplicación al Pirineo Oriental.
- IBM. (2021, March 22). Discriminant Analysis. <https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/25.0.0?topic=features-discriminant-analysis>
- IDEAM. (n.d.). Clasificación de los climas. Retrieved February 5, 2022, from <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/clima-text.pdf>

- IGAC. (2013). Bases de datos vectoriales por hojas cartográficas. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-74.0163482980649,6.942731541838988,-73.60916751193263,7.177827806194858,4686&b=igac&l=168&u=0&t=23&servicio=5#>
- Ingeominas. (2002). Catálogo Nacional de Movimientos en Masa.
- Londoño-Linares, J. P. (2017), Landslides susceptibility assessment using discriminant analysis. Application on a regional scale DYNA 84(201), pp. 278-289, 2017.
- Pedregosa et al. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. In Journal of Machine Learning Research (Vol. 12). <http://scikit-learn.sourceforge.net>. pp. 2825-2830.
- PMA: GCA. (2007). Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas.
- Royero, J., & Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander.
- Munsell. (2009). Rock Color Chart.
- SGC. (2012). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000.
- SGC. (2014). Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa Plancha 110.
- SGC. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. www.imprenta.gov.co
- SIMMA - SGC. (n.d.). Sistema de Información de Movimientos en Masa. Retrieved May 20, 2022, from <https://simma.sgc.gov.co/#/public/results/>
- Van Westen, C. J. (2002). ILWIS Application Weights of evidence modeling case study data-driven models Use of weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping.

Westen, C. J. Van. (1993). Metodología de Predicción de la Ocurrencia de Fenómenos de Inestabilidad de Laderas.

Westen, V. (1993). Application of geographic information systems to landslide hazard zonation.