

1. Morfometría

La morfometría hace referencia a los aspectos cuantitativos del terreno en aspectos como rugosidad, pendiente, y curvatura, para la zona de estudio, los cuales se interpretan como variables geométricas del terreno. Para la elaboración de dichas variables se utilizó un modelo digital de elevación del terreno (DEM) con un tamaño de píxel de 12,5 metros, obtenido a partir del sensor ALOS-PARSAL del año 2010 ([University of Alaska Fairbanks, 2010](#)). La elevación mínima es de 501 msnm, y la elevación máxima es de 4677 msnm.

1.1. Pendiente

La pendiente, se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, expresada en grados que van desde 0-90°, y esta se encuentra relacionada con los movimientos en masa, de modo que, a mayor pendiente, mayor susceptibilidad a la ocurrencia de los mismos, ya que están relacionadas con las tensiones de corte en los materiales superficiales y en la distribución de agua en laderas ([Servicio Geológico Colombiano \(SGC\), 2017](#)).

Para la generación de esta variable se utilizó la herramienta *Slope*, en el *software ArcGIS*. Para la zona de estudio, el valor mínimo de la pendiente corresponde a 0° y el valor máximo, es de 69°. Para reclasificación de la pendiente se definieron rangos en los que los movimientos en masa se ven más afectados, para luego, generar un análisis estadístico donde se toma como referencia la desviación estándar de los datos para obtener la clasificación de los rangos de las pendientes ([Valencia Ortiz y otros, 2023](#)). Con base en la clasificación estadística se dividió la pendiente en 6 clases, cada una, con un rango de 12°. De acuerdo con la [Tabla 2](#), el rango de pendientes que más área posee es el 24°-36°, con un total de 38,15%, y luego siguen las pendientes

más bajas y finalmente, en una muy baja proporción, las pendientes más altas; se podría decir que la zona de estudio se encuentra compuesta en su mayoría por pendientes menores a 48° (Figura 1).

Tabla 1

Clasificación de rangos de pendientes

Count	Area	Min	Max	Range	Mean	Std
45	7031,25	1,81	42,16	40,35	22,11	11,50

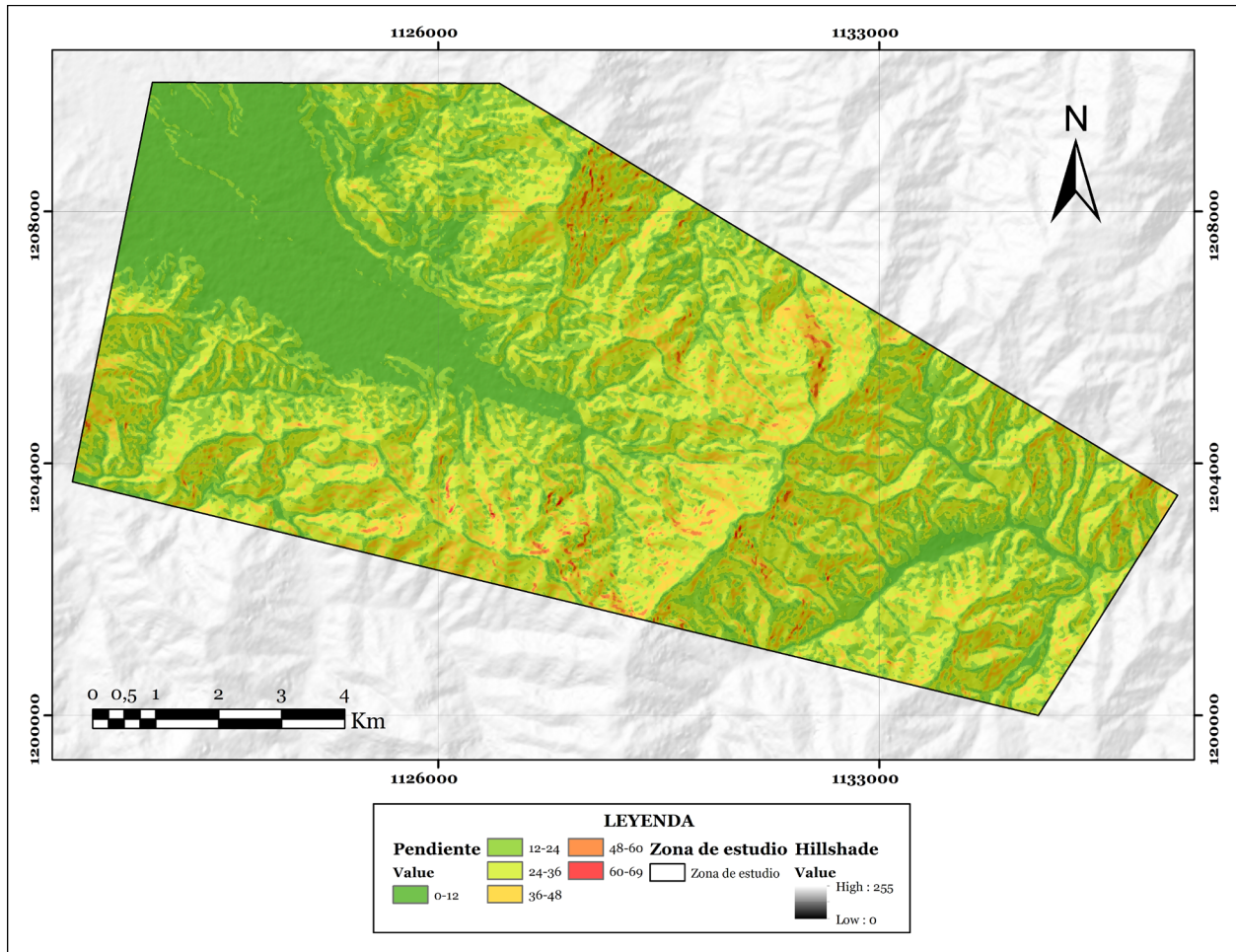
Tabla 2

Pendientes para la zona de estudio

Clases	Rangos	Área [Km ²]	[%]
1	0°-12°	22,963516	21,95%
2	12°-24°	30,61934	29,27%
3	24°-36°	39,912421	38,15%
4	36°-48°	10,56912	10,10%
5	48°-60°	0,524622	0,50%
6	60°-69°	0,018696	0,01%

Figura 1

Mapa de pendientes para la zona de estudio



1.2. Curvatura

La curvatura es una variable cuantitativa que determina el grado de concavidad, o convexidad de la superficie del terreno en la dirección de la pendiente (longitudinal); se determina por medio del radio de curvatura de una celda según un plano vertical (SGC, 2017). Afecta la aceleración y la desaceleración de las corrientes en la superficie. Un valor menor a 0 (negativo) indica que la superficie es lateralmente convexa hacia la celda, y, por el contrario, un valor mayor

a 0 (positivo) indica que la superficie es lateralmente cóncava hacia la celda; un valor igual a 0 indica que la superficie es lineal. Esta variable está bastante relacionada con los movimientos en masa ya que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial; en las zonas que se presentan cóncavas, el flujo se concentra hacia la celda, mientras que en las zonas convexas el flujo se dispersa.

Para la generación de esta variable, se utilizó la herramienta *Curvature*, en el *software ArcGIS*. Para la reclasificación de esta variable se definieron 5 rangos (Tabla 3), divididos mediante rupturas naturales, o mejor conocido como ‘*natural breaks*’, que es un método de clasificación para los datos que identifica los grupos de los datos con valores similares y los agrupa en clases, el resultado de las curvaturas en la zona de estudio se puede observar en la Figura 2.

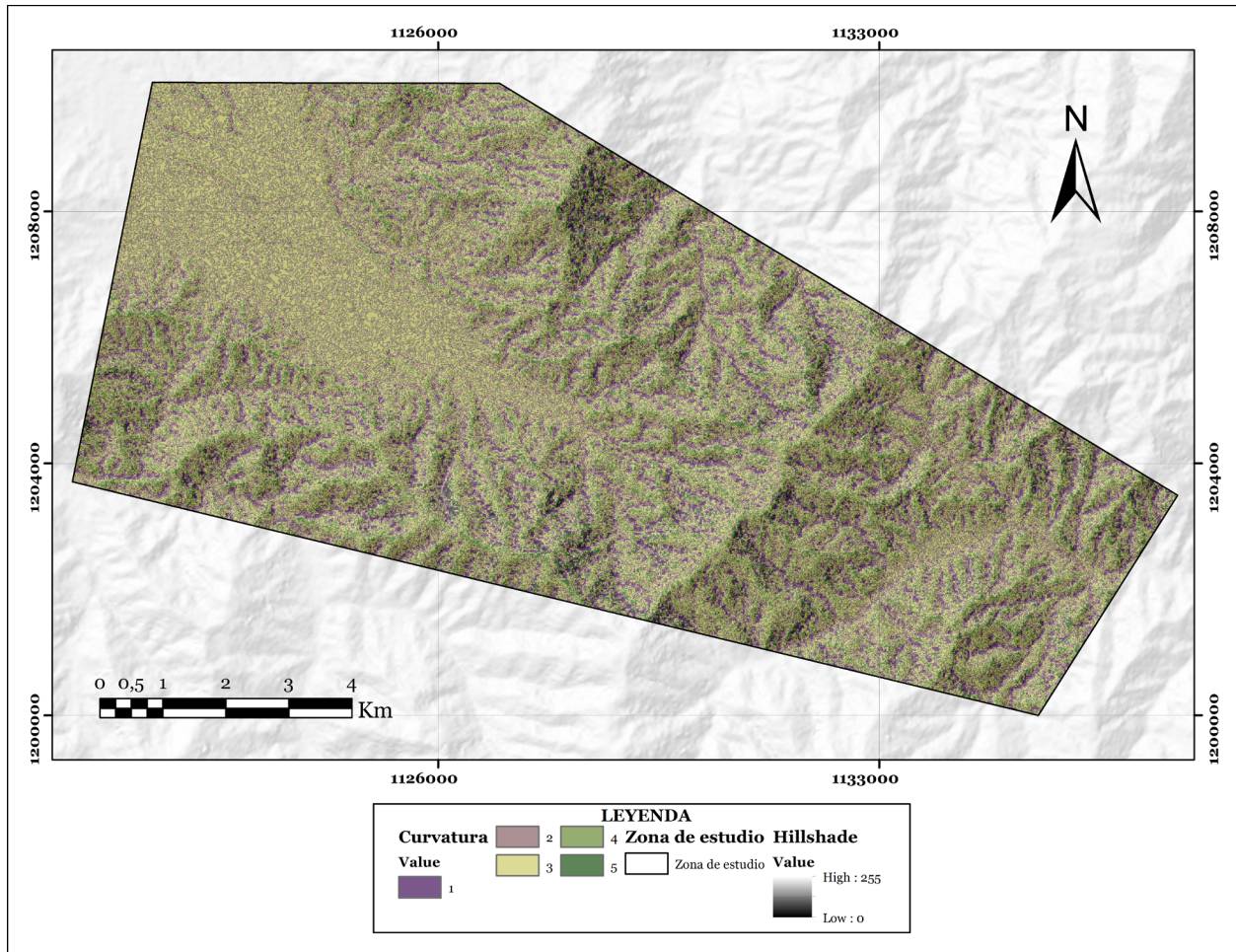
Tabla 3

Rangos de curvatura para la zona de estudio

Clases	Count	Área [Km²]	[%]
1	76670	11,9796875	11,45%
2	192516	30,080625	28,75%
3	241546	37,7415625	36,07%
4	124654	19,4771875	18,61%
5	34206	5,3446875	5,10%

Figura 2

Mapa de curvatura para la zona de estudio



1.3. Rugosidad

La rugosidad hace referencia a la variación de la superficie de un área, que se encuentra descrita por los vectores cuadrados en un espacio tridimensional (variable de distribución esférica), y se toma como base la pendiente y la orientación del terreno (Felicísimo, 1994); con esta variable permite definir bien las pendientes y las laderas, y de esta manera los valles y las crestas. Se asocia fuertemente con los movimientos en masa ya que los cambios constantes de las pendientes

favorecen una mayor infiltración de agua en el terreno, y de esta manera su aumenta la inestabilidad del mismo; por lo cual, a una alta rugosidad, es más propenso que se generen los movimientos en masa.

Para la determinación de la rugosidad se utilizó el cálculo de Modelos digitales del Terreno según Felicísimo (Felicísimo, 1994), donde se usa los vectores normales a la superficie para analizar su dispersión y la suma vectorial (Hobson, 1967); si el terreno es homogéneo, es decir, que los cambios en cuanto a pendiente y orientación son bajos, la suma vectorial será elevada y la dispersión baja, de otra manera, cuando en terreno es rugoso, con cambios significativos en orientaciones y pendientes, la suma vectorial será baja y la dispersión elevada.

Para la reclasificación de esta variable se definieron 5 rangos (Tabla 4), divididos mediante rupturas naturales, o mejor conocido como ‘*natural breaks*’, que es un método de clasificación para los datos que identifica los grupos de los datos con valores similares y los agrupa en clases, dando como producto la rugosidad de la zona de estudio (Figura 3).

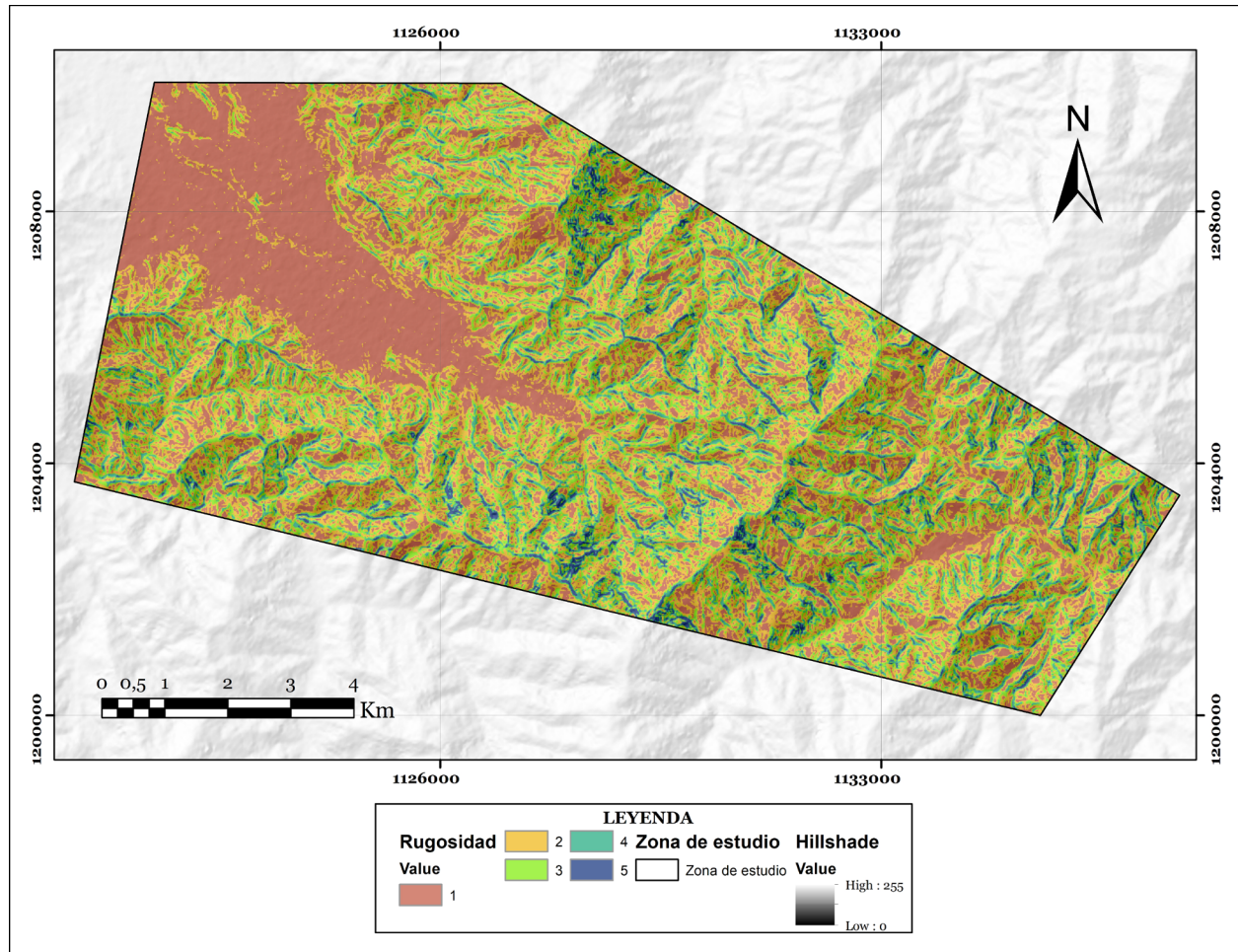
Tabla 4

Valores de rugosidad para la zona de estudio

Clases	Count	Área [Km ²]	[%]
1	207704	32,045658	30,63%
2	225794	35,864753	34,28%
3	143861	22,397972	21,41%
4	73452	11,433307	10,92%
5	18781	2,870049	2,74%

Figura 3

Mapa de rugosidad para la zona de estudio



1.4. Distancia a fallas

Otra variable a tener en cuenta a la hora de analizar la susceptibilidad de los movimientos en masa es la presencia de fallas y como estas afectan la generación de las mismas, es por ello que se tiene en cuenta la distancia a fallas en la zona de estudio. Es un factor de gran importancia, ya que está relacionado con la neotectónica de la zona y como esta puede o no afectarla; sin embargo, las fallas geológicas presentan una incidencia dependiendo de su distancia euclidiana, es decir, a

mayor cercanía de esta, más susceptible será el lugar para generar un movimiento en masa (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

Para la generación de esta variable se usó la herramienta *Euclidean distance*, en el *software* ArcGIS, usando las fallas definidas e inferidas de la zona de estudio. Para la reclasificación se utilizaron 6 clases diferentes (Tabla 5), divididos en rangos de 500m cada uno, dando como resultado el mapa de distancia a fallas para la zona de estudio (Figura 4).

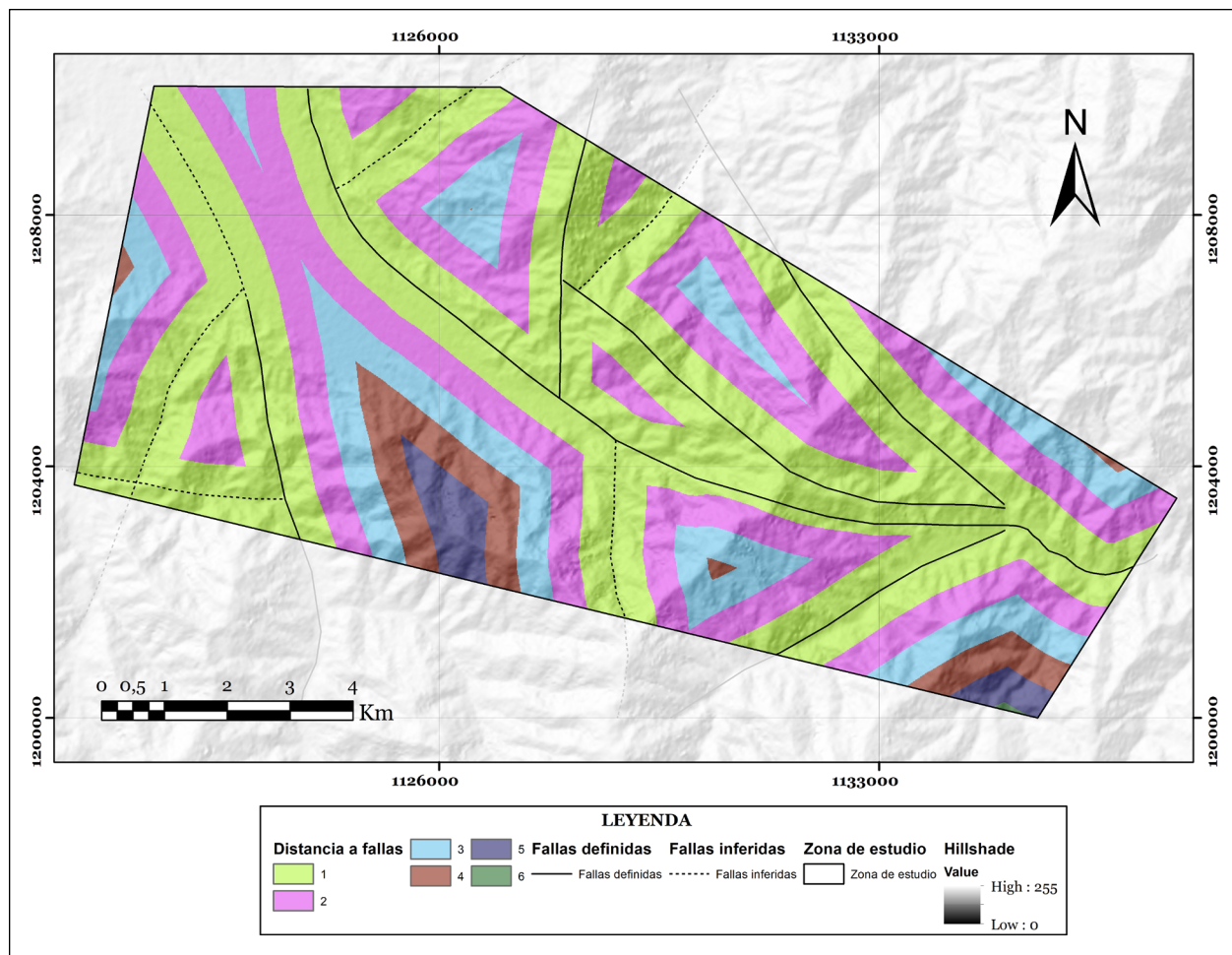
Tabla 5

Rangos de distancia a fallas para la zona de estudio

Clases	Rangos	Área [Km ²]	[%]
1	0-500	50,481626	48,25%
2	500-1000	32,514867	31,08%
3	1000-1500	14,300854	13,66%
4	1500-2000	4,965588	4,74%
5	2000-2500	2,316915	2,21%
6	2500-3000	0,036408	0,03

Figura 4

Mapa de distancia a fallas para la zona de estudio



Referencias bibliográficas

Felícísimo, A. (1994). *Modelos Digitales del Terreno*. Oviedo, España: Pentalfa.

Hobson, R. (1967). Fortran IV programs to determine surface roughness in topography for the CDC 3400 computer. *Northwestern University*, 28.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2017). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA ESCALA 1: 25.000*.

Servicio Geológico Colombiano, (. (2012). *Propuestas sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*. Bogotá, D.C.

University of Alaska Fairbanks. (25 de Septiembre de 2010). *ASF Data Search*. EarthData: [https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS&polygon=POLYGON\(\(-73.0184%206.4016,-72.844%206.4016,-72.844%206.4974,-73.0184%206.4974,-73.0184%206.4016\)\)&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP248720110-RTC_HI_RES&zoom=8.909¢er=-73.220,5.766&productTypes=RTC](https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS&polygon=POLYGON((-73.0184%206.4016,-72.844%206.4016,-72.844%206.4974,-73.0184%206.4974,-73.0184%206.4016))&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP248720110-RTC_HI_RES&zoom=8.909¢er=-73.220,5.766&productTypes=RTC)

Valencia Ortiz, J., Martínez-Graña, A., & Méndez, L. (2023). Evaluation of Susceptibility by Mass Movements through Stochastic and Statistical Methods for a Region of Bucaramanga, Colombia. *Remote Sensing*, 4567.