

# Susceptibilidad de la microcuenca La Romera.

## Susceptibility of La Romera microbasin.

Elizabeth Vanessa Alzate Gutierrez<sup>1</sup> and Laura Sanchez Mesa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia

### RESUMEN

La microcuenca la Romera ubicada al sur del Valle de Aburra en el municipio de Caldas, ha sufrido diversos cambios en los últimos veinte años, dentro de los cuales se desataca la ocupación de gran parte de la microcuenca, la construcción de nuevas vías y el cambio en la cobertura vegetal. Por ende, se realiza un análisis multitemporal de procesos morfodinámicos en un periodo de veinte años, posteriormente se utilizan métodos heurísticos, bivariados y con base física para estimar la susceptibilidad de la cuenca por movimientos en masa. Se concluye que la zona sur de la cuenca presenta una susceptibilidad alta.

**Palabras Clave:** Susceptibilidad, Caldas, Geomorfología

### ABSTRACT

*The Romera microbasin, located south of the Aburra Valley in the municipality of Caldas, has undergone several changes in the last twenty years, including the occupation of a large part of the watershed, the construction of new roads and the change in vegetation cover. Therefore, a multitemporal analysis of morphodynamic processes over a twenty-year period is carried out and then heuristic, bivariate and physically based methods are used to estimate the susceptibility of the basin to mass movements. It is concluded that the southern zone of the basin has a high susceptibility.*

**Keywords:** Susceptibility, Caldas, Geomorphology

## 1. Introducción

La microcuenca La Romera se encuentra ubicada en el departamento de Antioquía, al noreste del municipio de Caldas. A lo largo del presente trabajo, se busca dar a conocer de forma detallada los distintos métodos y herramientas empleadas para la zonificación de la microcuenca, se inicia con la identificación de las variables independientes las cuales condicionan la ocurrencia de los movimientos en masa, para finalmente elegir el método que mejor se adecue a la zonificación por susceptibilidad que se presenta en la zona.

## 2. Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo, se seleccionó el área de estudio correspondiente a la microcuenca La Romera, se hace búsqueda de la cartografía base y de un modelo de elevación digital con una resolución espacial de 2 m(AMVA, 2006). Con este se obtienen diversos insumos morfométricos que se utilizaran para cartografiar la geología y geomorfología de la cuenca.

Se realiza el inventario de movimientos en masa partir de imágenes satelitales(IGAC, 2022) y diversos recorridos de campo, el periodo de análisis fue de más de 20 años. Posterior a esto se discierne en la selección de las variables con las que se trabajará los distintos métodos.

Finalmente se realizan los mapas de susceptibilidad para la microcuenca La Romera por métodos heurísticos, estadísticos y con base física. Por último, se realiza la evaluación del modelo y se redactan las conclusiones finales del trabajo.

## 3. Variables

Para un óptimo desarrollo del modelo de susceptibilidad es importante definir variables condicionantes (variables independientes), allí se busca encontrar la relación de la ocurrencia y no ocurrencia de los movimientos en masa (variable dependiente). Se definieron ocho (8) variables y el objetivo es identificar las variables predictoras de movimientos en masa en la cuenca.

### 3.1 Variables independientes

Las variables preseleccionadas se analizaron mediante el DEM de la zona dando como resultado datos morfométricos de pendiente (figura1), aspecto (figura2), elevación (figura3), flujo acumulado (figura4), curvatura (figura5).

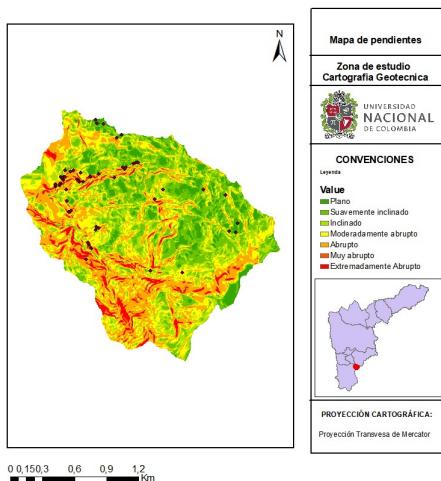


Figura 1. Mapa de pendientes microcuenca La Romera.  
Fuente propia.

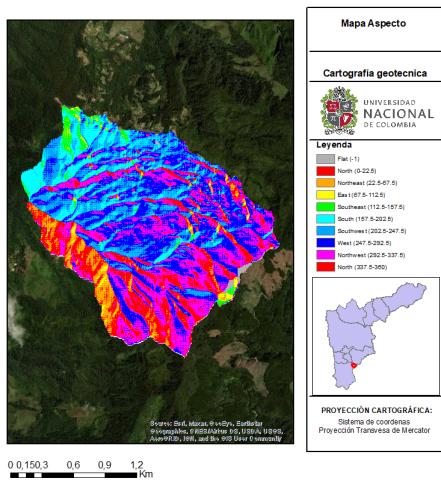


Figura 2. Mapa de aspectos microcuenca La Romera.  
Fuente propia.

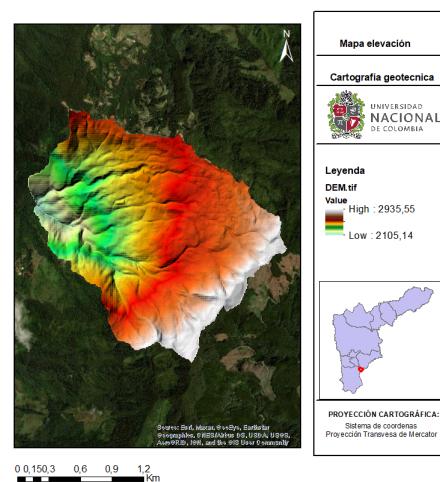


Figura 3. Mapa de elevación microcuenca La Romera.  
Fuente propia.

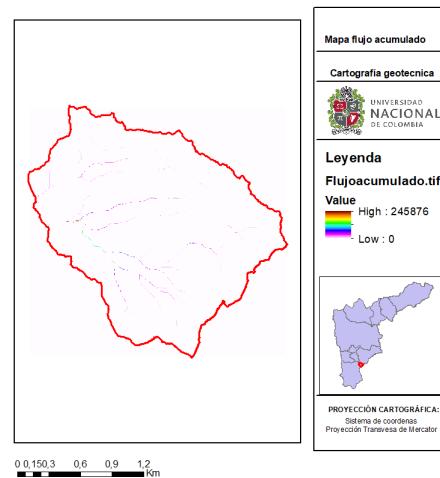


Figura 4. Mapa de flujo acumulado microcuenca La Romera. Fuente propia.

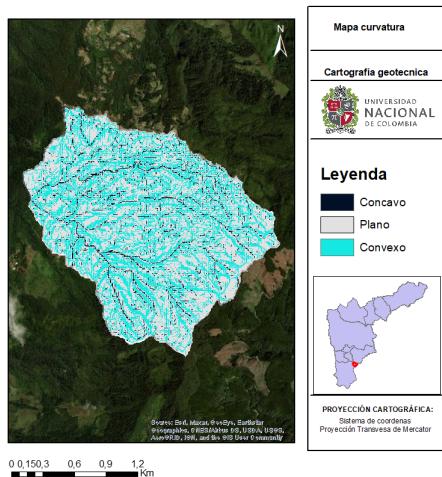


Figura 5. Mapa de curvatura microcuenca La Romera.  
Fuente propia.

La geología fue construida mediante fotointerpretación(IGAC, 2022), trabajo de campo, lectura topográfica y bibliografía(AMVA, 2006) (figura6).

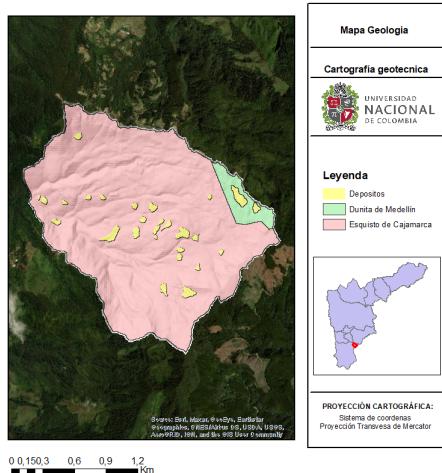


Figura 6. Mapa geológico microcuenca La Romera.  
Fuente propia.

Se definieron ocho subunidades geomorfológicas como superficie aluvial, filos, cimas, flancos, depósitos, vaguadas de escorrentía, escarpes incisión, superficie corte lleno antrópico, esto se realizo basandose en diferentes insumos morfométricos, ademas del relieve y las geoformas de la microcuenca vistas en campo (figura7).

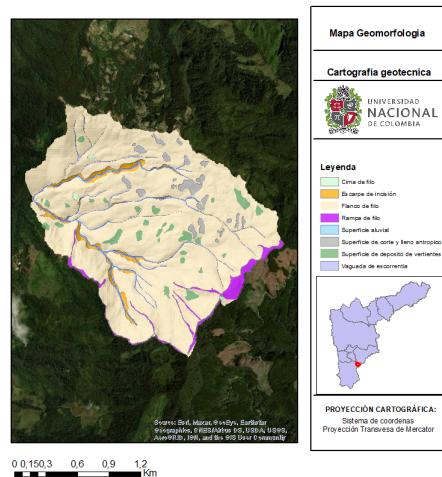


Figura 7. Mapa geomorfológico microcuenca La Romera.  
Fuente propia.

El mapa de coberturas se realizo de acuerdo con la aptitud del uso de suelo teniendo como resultado zonas de pasto, bosque, suelo desnudo y construcción (figura8).

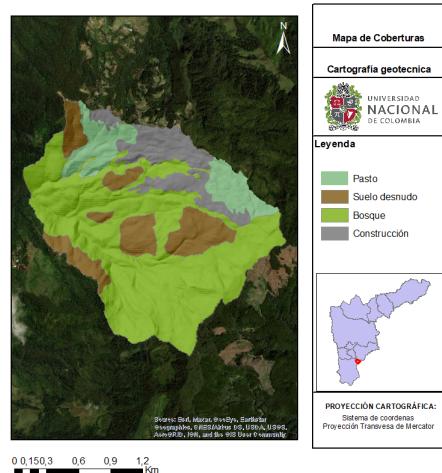


Figura 8. Mapa de coberturas microcuenca La Romera.  
Fuente propia.

### 3.2 Variable dependiente

Dentro de la variable dependiente se construye el mapa de inventario por movimientos en masa donde se recolecto información desde el 2001 hasta el 2022, con ayuda de fotointerpretación(IGAC, 2022), visitas de campo, bases de datos (Desinventar, 2022), y lectura topográfica (figura9).

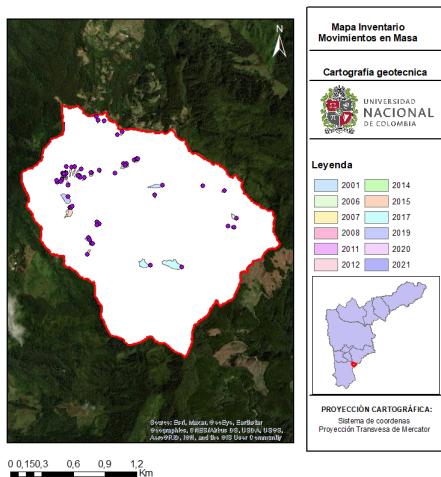


Figura 9. Mapa de inventario por movimientos en masa microcuenca La Romera. Fuente propia.

### 3.3 Selección de Variables

Para la selección de variables condicionantes se construyó un Dataframe, el cual permite compilar las variables recolectadas (figura10) .

	inventario	geomorfología	geología	aspecto	pendiente	flujo	elevación	curvatura	cobertura
0	0.0	3.0	3.0	138.732468	35.672390	7.0	2600.191895	0.0	3.0
1	0.0	3.0	3.0	137.794312	35.078232	8.0	2599.265381	0.0	3.0
2	0.0	3.0	3.0	140.078018	32.974354	9.0	2598.339111	0.0	3.0
3	0.0	3.0	3.0	142.213806	34.152977	10.0	2597.632080	0.0	3.0
4	0.0	3.0	3.0	111.181129	15.028431	0.0	2559.579590	0.0	2.0

Figura 10. Dataframe microcuenca La Romera. Fuente propia.

#### 3.3.1 Análisis de todas las variables

Para interpretar una correlación lineal entre las variables seleccionadas, se tiene en cuenta la siguiente matriz de correlación (figura11) hallada a partir de la Dataframe generado.

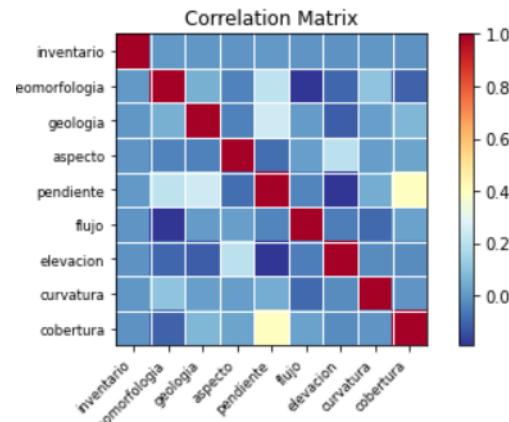


Figura 11. Matriz de correlación microcuenca La Romera. Fuente propia.

Dando como resultado que las variables que menos tienen correlación son la geomorfología, curvatura, pendiente, aspecto y flujo acumulado.

#### 3.3.2 Correlación con la variable dependiente

Se logra identificar mediante la función groupby, la media de cada variable independiente de acuerdo con la variable dependiente (figura12), siendo 1.0 la ocurrencia de movimientos en masa y 0.0. la no ocurrencia.

	geomorfología	geología	aspecto	pendiente	flujo
inventario					
0.0	2.981287	2.901215	238.638834	26.675219	249.036832
1.0	3.230769	2.942308	201.736658	36.314431	10.480769
	elevación	curvatura	cobertura		
inventario					
0.0	2542.806233	2.326145	3.251533		
1.0	2394.639911	2.423077	2.480769		

Figura 12. Media de cada variable independiente de acuerdo con la variable dependiente. Fuente propia.

Al contar el número de celdas con movimientos en masa se tuvo como resultado un total de 52 celdas, mientras que las celdas con no movimientos en masa obtuvo 821 508 celdas.

Mediante el diagrama de cajas con notch, se busca encontrar la predicción de la variable pendiente(figura13), dando como resultado una media para la ocurrencia de movimientos en masa de 35°.

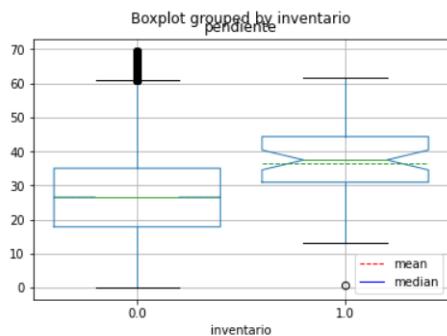


Figura 13. Diagrama de cajas pendiente vs. ocurrencia. Fuente propia.

Se realiza una prueba de hipótesis para determinar si las dos poblaciones pendientes con movimientos en masa y pendientes sin movimientos en masa son poblaciones diferentes, dando un P-Value menor al 5%, por lo que se confirma que son poblaciones diferentes. Al igual que lo refleja el diagrama de densidad (figura 14).

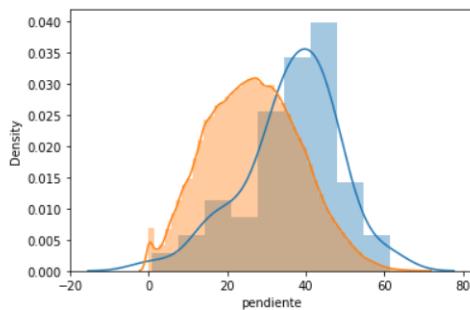


Figura 14. Diagrama de densidad pendiente. Fuente propia.

### 3.3.3 Análisis de componentes principales (PCA)

Es un método de machine learning para reducir dimensionalmente un modelo con una gran cantidad de variables. Esta reducción permite identificar las variables que mas le aportan a la varianza del modelo(Aristizábal, 2022). En nuestro modelo (figura 15) obtuvimos como resultado que las variables menos relevantes para correr los modelos corresponden a: coberturas y elevación.

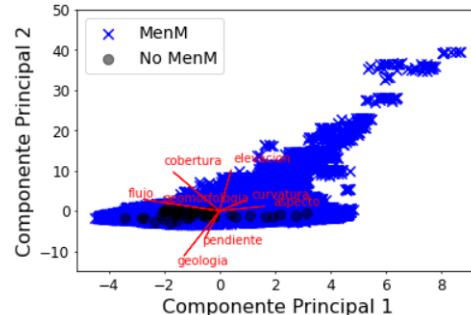


Figura 15. Diagrama de componentes principales. Fuente propia.

Finalmente, para el desarrollo de los distintos métodos se seleccionaron las variables morfométricas de pendiente, aspecto, curvatura y geomorfología.

## 4. Métodos basados en el conocimiento

La evaluación de la susceptibilidad usando el método basado en el conocimiento o heurístico se realiza para una zona de estudio específica y los criterios, variables e información utilizadas no se pueden extrapolar de manera directa a otra región. La construcción del mapa final se basa en la experiencia y discernimiento del experto quien posee en su mente los procesos morfodinámicos recientes, la valoración del material geológico superficial, las geoformas predominantes en la cuenca, el relieve y las pendientes de las laderas (Aristizábal, 2022).

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad se realizaron cuatro (4) visitas de campo a la Microcuenca La Romera, se evidenciaron los perfiles de meteorización aflorando en diferentes puntos del recorrido, se recolectaron muestras de roca, se demarcaron los procesos morfodinámicos activos y además se evaluaron los suelos que generaban la mayor cantidad de movimientos en masa, en este caso fueron los suelos arenoso limosos producto de la meteorización química los cuales corresponden a los esquistos de Cajamarca; para nuestro modelo la pendiente se reclasificó, dando un peso a clases, creada con base al promedio de la pendiente de las celdas donde había ocurrencia de movimientos en masa y el histograma del mapa generado, la geomorfología se clasificó y se dieron valores observando la densidad de movimientos en masa que presentara cada subunidad, en el mapa de curvatura se dio un peso mayor a las zonas que presentaran curvatura de perfil y tangencial convexa , para el mapa de aspecto se encontró que las laderas que presentaban movimientos en masa en su mayoría tenían una dirección al sur y al suroeste.

- Pendiente [0-10; 10-19; 19-26; 26-33; 33-45; 45-47;  $\geq 47$ ]
- Aspecto [0-157; 157-203; 203-248; 248-293;  $\geq 293$ ]
- Curvatura [0-1; 1-2;  $\geq 2$ ]
- Subunidades Geomorfológicas [superficie aluvial; cima de filo; rampa de filo; vaguada de escorrentía; superficie de depósito de vertiente; flanco de filo; superficie de corte y lleno antrópico; escarpe de incisión]

Se procede a calificar las variables con la matriz propuesta por Saaty (Saaty, 1980) en el modelo de análisis jerárquico de procesos, allí se le atribuye la importancia a cada una de estas a criterio del experto, tras esto se calculan los vectores propios de cada variable y se normalizan (figura16).

	Pendientes	Geomorfología	Curvatura	Aspecto
Pendientes	1,0	7,0	7,0	9,0
Geomorfología	0,1	1,0	3,0	5,0
Curvatura	0,1	0,3	1,0	1,0
Aspecto	0,1	0,2	1,0	1,0
Wi	Ci	LAMDAi		
4,6	0,7	1,0 Ci=	0,1	
1,2	0,2	1,6 Rci=	1,0	
0,5	0,1	0,8 CR=	0,1	
0,4	0,1	0,9		

Figura 16. Calificación de variables. Fuente propia.

Finalmente se hace la evaluación de consistencia de la matriz generada donde se determina si esta es valida de acuerdo con parámetros estadísticos, la cuenca La Romera posee un CR de 0.976 esto implica que es consistente (figura17 ).

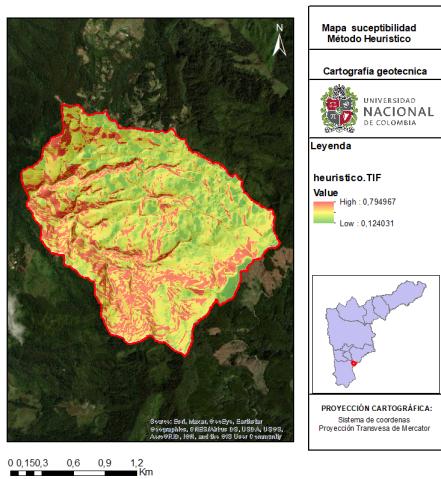


Figura 17. Mapa de susceptibilidad método Heurístico.  
Fuente propia.

## 5. Métodos basados en datos

### 5.1 Bivariados

En los métodos bivariados cada mapa de las variables independientes es combinado con el inventario de movimientos en masa (la variable dependiente), para obtener los pesos de las clases que conforman las variables, basados en densidad de movimientos en masa. Los métodos estadísticos bivariados fueron usados para encontrar qué factores o combinación de factores definen un papel importante en la ocurrencia de movimientos en masa en la microcuenca La Romera.

Los métodos bivariados sólo permiten asignar peso a las clases y no a las variables, por lo que todas las variables tienen una importancia igual sobre la ocurrencia de movimientos en masa (Aristizábal, 2022).

Existen diferentes tipos de métodos bivariados se subdividen esencialmente en métodos basados en la densidad del número de movimientos en masa en cada clase (Frequency ratio, Statistical index), y los métodos basados en el teorema de Bayes (Weight-of-evidence, Evidential belief function, Certainty factor). En este caso para la microcuenca, se desarrollará el Frequency ratio(Aristizábal, 2022).

#### 5.1.1 Frequency ratio (Likelihood)

Este método calcula un peso para cada clase en la cual es dividida cada variable.

Se reclasifican las variables seleccionadas anteriormente, de acuerdo con la densidad de ocurrencia por clase:

- Pendiente [0-10; 10-19; 19-26; 26-33; 33-47;  $\geq 47$ ]
- Aspecto [0-157; 157-203; 203-248; 248-293;  $\geq 293$ ]
- Curvatura [0-1; 1-2;  $\geq 2$ ]

La geomorfología al ser una variable categórica, se deja en cada una de las clases divididas inicialmente.

Finalmente, la susceptibilidad obtenida en una celda es igual a la sumatoria del peso de cada clase a la que pertenece en la variable de pendiente, aspecto, curvatura y geomorfología teniendo como resultado la figura18.

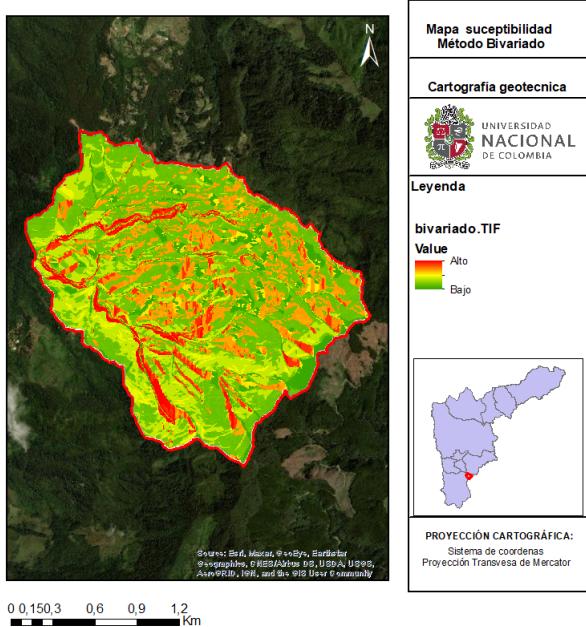


Figura 18. Mapa de susceptibilidad por el método Frequency ratio (Likelihood). Fuente propia.

## 5.2 Métodos multivariados

Los métodos estadísticos multivariados permiten evaluar la relación entre la variable dependiente y todas las otras variables independientes simultáneamente, para ello se utilizó la regresión logística esta usa la función logit para calcular la probabilidad de la ocurrencia de movimientos en masa según las variables condicionantes e independientes(Aristizábal, 2022).

Al correr el modelo se obtiene el mapa de susceptibilidad evidencia en la (figura19 ), se llega a la determinación de que dicho mapa no es concluyente y que se requiere volver a construir y entrenar el modelo en búsqueda de mejores resultados.

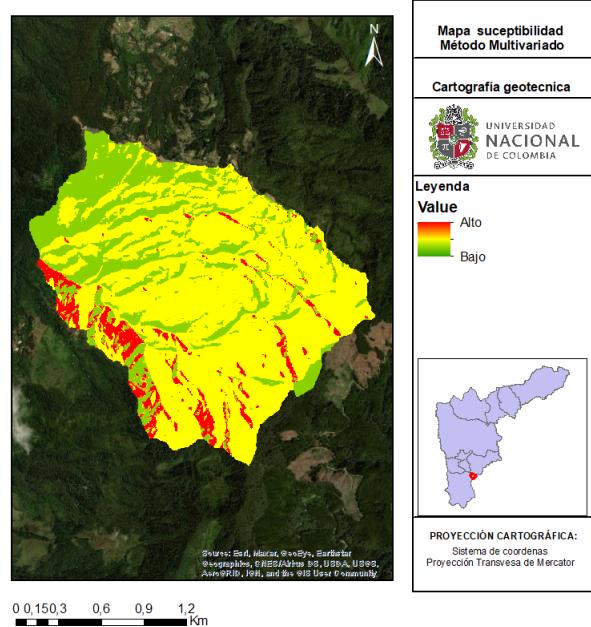


Figura 19. Mapa de susceptibilidad por el método de regresión logística. Fuente propia.

### 5.2.1 Evaluación del modelo

En el análisis de evaluación del modelo de regresión logística se obtuvo una curva ROC (figura20) donde se determina que este modelo no tiene un buen umbral donde se diferencie la ocurrencia de movimientos en masa.

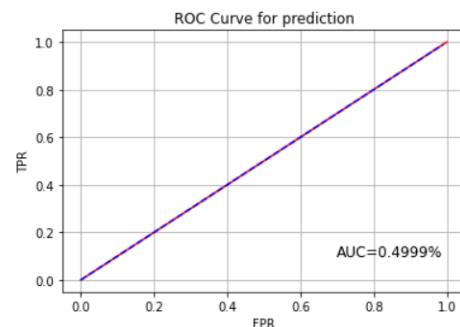


Figura 20. Curva ROC método multivariado de regresión logística. Fuente propia.

## 6. Métodos con base física

Estos métodos son recomendables para escalas grandes con gran nivel de detalle ya que para su correcta calibración es necesarios información geotécnica que se obtienen a través de la medición directa en campo o ensayos

de laboratorio(Aristizábal, 2022).

El mapa de susceptibilidad realizado se obtuvo a partir del método SHALSTAB, este emplea un modelo hidrológico TOPOG, utilizando condiciones de lluvia estacionaria para construir un patrón de humedad.

El modelo requería del valor de lluvia estacionaria, este se recopilo a través de información adquirida del geo portal del IDEAM(IDEAM, 2020), este poseían valores de precipitación desde 1984. Se realizo un promedio de los datos obtenidos para encontrar un único valor correspondiente a intensidad de la precipitación.

Los datos correspondientes a cohesión, fricción y peso específico se estipularon para cada tipo de suelo determinado en la zona de estudio(Echeverry Aguilar, 2019), dichos cifras se muestran en la (figura21).

Geología superficial	Cohesión [KN/m <sup>2</sup> ]	Angulo fricción [rad]	Permeabilidad [cm/h]	Peso específico [KN/m <sup>3</sup> ]	Espesor [m]
Dunita de Medellín	31,5	0,41	0,25	18	21.2
Esquistos de Cajamarca	26	0,45	0,9	17,4	21
Depósitos	5	0,46	0,8	14,81	20

Figura 21. Datos método con base física. Fuente.

El método arroja valores de celdas estables, inestables, incondicionalmente estables o incondicionalmente inestables, además este modelo estipula la cantidad de lluvia requerida para que algunas de las celdas de la cuenca fallen y el volumen del material desplazado (figura22).

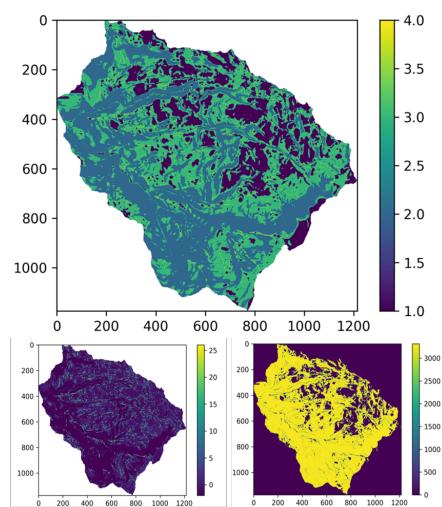


Figura 22. Método con base física. Fuente propia.

## 7. Conclusiones

- El método bivariado arroja valores poco conservadores, la susceptibilidad más alta aparecen asociados a los drenajes de mayor orden mientras que los valores medios se localizan la parte central de la cuenca.
- El método multivariado arroja en más del 80% valores de susceptibilidad media y los valores altos se encuentran en su mayoría en la zona sur de la microcuenca La Romera.
- El método aplicado con base física en la cuenca resulta más conservador que los basados en datos pues arrojan resultado de celdas inestables y condicionalmente inestables en alrededor del 80% del área de estudio, en general son celdas asociadas a zonas de alta pendiente.
- El método heurístico resultó a consideración del equipo de trabajo el método que mejor modela la susceptibilidad en la cuenca ya que toma valores altos en zonas de alta pendiente y donde se evidencio en campo inestabilidad del terreno.
- Independiente del método utilizado se encuentra que la zona sur de la cuenca la Romera presenta una susceptibilidad alta a movimientos en masa.
- De acuerdo con el análisis de variables se obtiene que los elementos tales como la elevación y coberturas, no son elementos determinantes en la comprensión de los movimientos en masa en la cuenca la Romera, mientras que la pendiente es una variable clave para el entendimiento de los mismos.

## References

- AMVA. (2006). *Microzonificación sísmica detallada de los municipios de barbosa, girardota, copacabana, sabaneta, la estrella, caldas y envigado. conzorcio microzonificación 2006.* (Tech. Rep.). Universidad EAFIT, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.
- Aristizábal, E. (2022). Libro guía del curso cartografía geotécnica. Retrieved from [https://edieraristizabal.github.io/Libro\\_cartoGeotecnia/intro.html](https://edieraristizabal.github.io/Libro_cartoGeotecnia/intro.html)
- Desinventar. (2022). *Desinventar project* (Tech. Rep.).
- Echeverry Aguilar, J. D. (2019). *CorrelaciÓn de pÁrametros de resistencia con propiedades Índice y de clasificaciÓn para suelos producto de la meterizaciÓn en el valle de aburrÁ y municipios aledaÑos* (B.S. thesis). Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil.

IDEAM. (2020). *Precipitación total anual* (Tech. Rep.). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.

IGAC. (2022). *Fotografías áreas* (Tech. Rep.).

Saaty, T. (1980). *método analytic hierarchy process (ahp)* (Tech. Rep.).