

# Susceptibility maps of the El Salado Creek Watershed

## Mapas de susceptibilidad Cuenca de la Quebrada El Salado

Brayan Fabian Sierra <sup>a</sup> & Juan David Puenayan Aza <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [bsierrar@unal.edu.co](mailto:bsierrar@unal.edu.co)

<sup>b</sup> Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [jdpuenayana@unal.edu.co](mailto:jdpuenayana@unal.edu.co)

December 9, 2022.

### Abstract

This article presents the different susceptibility maps, at a scale of 1:10,000, for the watershed of the Salado stream in the municipality of Girardota using heuristic, statistical and physically based models. For the preparation of these maps, an inventory of mass movements was prepared using photo interpretation and secondary information such as SIMMA records. Variables such as slope, accumulated flow and aspect were determined from the analysis of the Cartoantioquia digital elevation model with a pixel size of 5x5 m and the geology and geomorphology were obtained from the seismic microzonation study of the AMVA. The variables selected for these models were slope, geology and aspect, which were analyzed by means of ArcGIS and Python in each of the different methods, also geomechanical and climatic data were searched in the literature to implement the physically based model. These analyzed models show some differences in the degree of susceptibility, but they yielded results that adjust in a certain way to the morphological conditions of the basin, yielding low susceptibilities in the areas of low slope, associated to alluvial deposits of the Medellín river and yielding mainly high susceptibilities in areas of higher slope associated to the Antioquian Batolith.

**Keywords:** Suceptibility; heuristic methods, statistical methods, physics-based methods, El Salado watershed, Girardota, Colombia..

### Resumen

En este artículo se presentan los diferentes mapas de susceptibilidad, a escala 1:10.000, para la cuenca de la quebrada el Salado del municipio de Girardota utilizando modelos heurísticos, estadísticos y con base física, para la elaboración de dichos mapas se elaboró un inventario de movimientos en masa utilizando fotointerpretación e información secundaria como los registros del SIMMA. Se determinaron variables como pendiente, flujo acumulado y aspecto que se obtuvieron del análisis de modelo digital de elevación de Cartoantioquia con tamaño de píxel de 5x5 m y la geología y geomorfología se obtuvo del estudio de microzonificación sísmica del AMVA. Las variables seleccionadas para estos modelos fueron pendiente, geología y aspecto, las cuales se analizaron por medio de ArcGIS y Python en cada uno de los diferentes métodos, también se buscaron datos geomecánicos y climáticos en la literatura para implementar el modelo con base física. Estos modelos analizados muestran algunas diferencias en el grado de susceptibilidad, pero en arrojaron resultados que se ajustan de cierta forma a las condiciones morfológicas de la cuenca, arrojando susceptibilidades bajas en las zonas de poca pendiente, asociadas a depósitos aluviales del río Medellín y arrojando principalmente susceptibilidades altas en zonas de mayor pendiente asociadas al Batolito Antioqueño.

**Palabras clave:** Suceptibilidad; Métodos Heurísticos, Métodos Estadísticas, Métodos base física, cuenca El Salado, Girardota.

### 1. Introducción

Los estudios relacionados con los movimientos en masa son indispensables para realizar una correcta gestión del riesgo en los distintos sectores del territorio, ya sea para elaborar mapas de susceptibilidad, amenaza o riesgos requeridos para el correcto ordenamiento territorial.

En este trabajo realizamos un estudio de susceptibilidad a los movimientos en masa para la cuenca de la quebrada El Salado ubicada en el municipio de Girardota en el departamento de Antioquia, para lo cual se tuvo en cuenta una recopilación bibliográfica, información secundaria y un modelo de elevación digital obtenido de Cartoantioquia remuestreado a un tamaño de píxel 5x5, además de

software como Google Colab, ArcMap, Google Earth, Qgis para el procesamiento de los datos y ejecución de los diferentes modelos.

Se realizó un inventario multitemporal con información de registros históricos de los distintos movimientos en masa presentes en la zona de estudio, se consultó información geológica, geomorfológica y con el DEM se realizaron mapas de pendiente, aspectos y flujo acumulado para seleccionar las variables óptimas que van a alimentar los distintos métodos heurísticos ( basados en el conocimiento ), métodos estadísticos ( basados en datos ) y métodos con base física cuyos resultados se van a interpretar para generar una zonificación de la zona.

## 2. Area de Estudio

El área de estudio está ubicada en el municipio de Girardota, en el occidente del departamento de Antioquia, donde se delimitó la cuenca perteneciente a la quebrada El Salado con una longitud de 9.47 Km, cuyas coordenadas son .... tiene una área de 24.84 km<sup>2</sup> y una longitud axial de 8.24 Km, la quebrada atraviesa el casco urbano del municipio de Girardota abarcando las veredas : El Barro, Encenillo, Juan Cojo, El Palmar, Jamundí, El Yarumo, La Calera y El Cano.

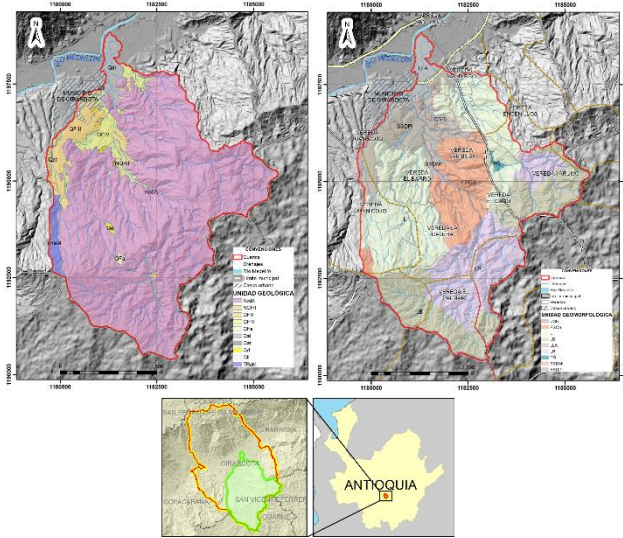


Figura 1. Localización , geología y geomorfología  
Fuente: Propia

Litológicamente la zona está constituida por rocas del batolito antioqueño de composición granodioríticas y cuarzdioríticas; la anfibolita de Medellín, depósitos antrópicos, depósitos aluviales, depósitos aluviotorrenciales asociados al río Medellín, depósitos de deslizamiento y flujos de escombros y lodos, estos últimos producto de fenómenos de inestabilidad o movimientos de masa. La caracterización morfológica presenta principalmente zonas de baja pendiente como peldaños, colinas de suelo residual, llanuras aluviales, superficies suaves en depósitos moderadamente inclinados y poco incisos, geoformas que fueron suavizadas por acción de agentes erosivos, las zonas con pendientes más altas están relacionadas con las unidades: Batolito Antioqueño y Anfibolita de Medellín en las cuales presentan geoformas como escarpes semicirculares superiores, lomos y lomeríos.

## 3. Métodos y Materiales

### 3.1 Variables

Para la zonificación de la zona se realizó una recopilación cartográfica de mapas geológicos y geomorfológicos en una escala 1:10.000 extraídos de la microzonificación sísmica del valle de Aburrá. Se compilaron datos de movimientos en masa de distintas fuentes como: SIMMA, Desinventar, Geohazards y se realizó fotointerpretación en anaglifs obtenidos mediante la superposición de imágenes de algunas líneas de vuelo obtenidas de la página Colombia en mapas, esto con el fin de tener un inventario más robusto. Se realizó una selección de variables analizando la su incidencia o relación con la generación de movimientos en masa mediante análisis univariados, multivariados y de componentes principales con el cual se pudo determinar que las variables que más peso tienen para nuestro modelo son: geología, pendiente, aspectos.

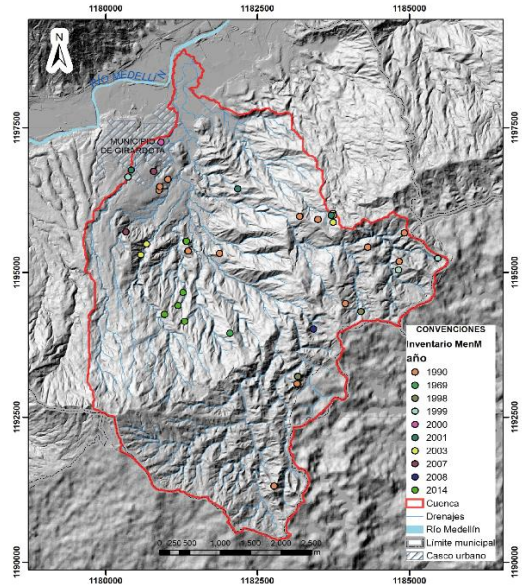


Figura 2. Inventario de movimientos en masa  
Fuente: Propia

En la matriz de correlación podemos observar que las variables como pendiente aspecto y geología presenta poca correlación con las demás variables esto hace que al seleccionar estas variables para nuestro modelo este tenga más datos de distintas variables.

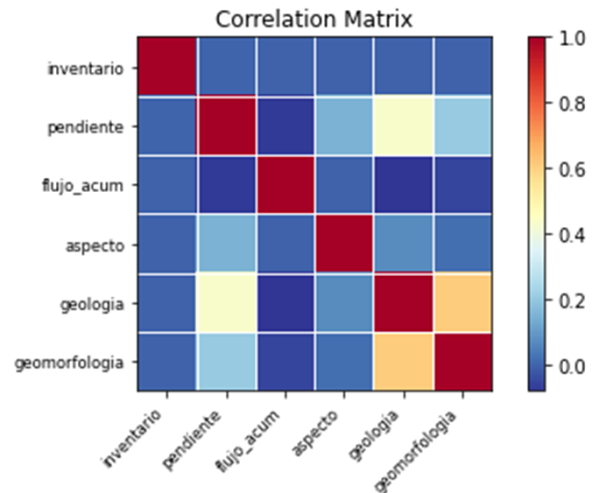


Figura 3. Matriz de Correlación.  
Fuente: Propia

En la gráfica de componentes principales podemos observar como las variables geología, pendiente y aspecto diferencian bien zonas donde se presentan movimientos en masa y zonas donde no, la variable flujo acumulado no hace este diferenciación por lo que se descarta y la variable geología y geomorfología tienen un comportamiento similar siendo cuasi paralelas al componente principal 1 así que se decide tomar la variable geología.

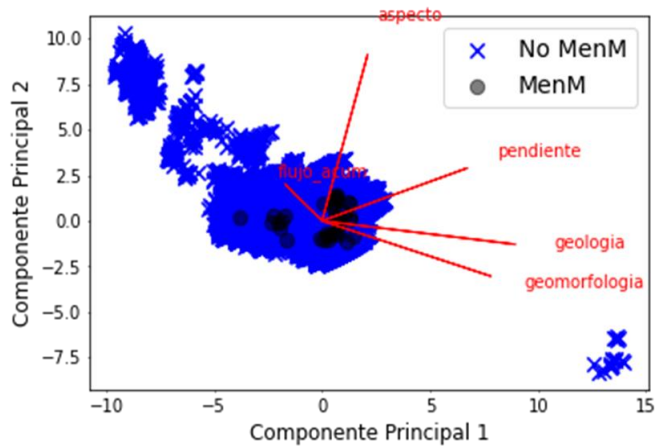


Figura 4. Componentes Principales  
Fuente: Propia

El diagrama muestra la capacidad de separación de la variable pendiente en la ocurrencia o no ocurrencia de MenM, a la cual se le realiza una prueba de hipótesis donde se obtuvo un valor de 0.0233 menor al 0.05, lo que nos indica que la diferencia es estadísticamente significativa, por lo tanto, la pendiente es una buena variable que permite diferenciar las celdas con y sin MenM, en este gráfico también se puede observar que el 50 % de los datos en los casos de ocurrencia de MenM están ubicados en un rango aproximado de 23° a 32° rango que después se usa para realizar una reclasificación de los valores de pendiente para realizar un método heurístico.

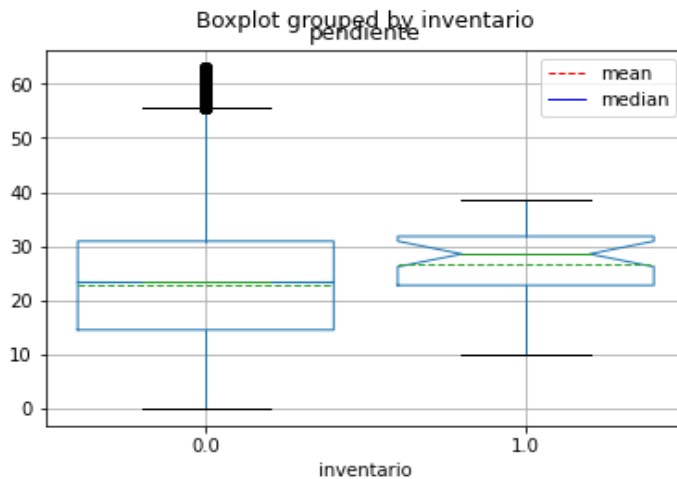


Figura 5. Diagrama de Cajas de Pendiente vs inventario.  
Fuente: Propia

### 3.2 Métodos Heurísticos

Se utilizan métodos heurísticos para determinar la susceptibilidad de la zona de estudio, estos métodos se basan en el criterio para darle peso a las variables y realizar una reclasificación a las variables en las clases que se consideren pertinentes usando el razonamiento y valiéndose de herramientas estadísticas.

$$S^n = W_1w_c + W_2w_c + W_3w_c + W_nw_c$$

Se inicia usando el método AHP (Analytic Hierarchy Process) que nos arrojan unos valores referentes al peso de las variables seleccionadas,

en este caso: geología (0.1883) pendiente (0.7316) y aspectos (0.0801) siendo la pendiente la que tiene más peso en el modelo. se calcula la consistencia del análisis anteriormente mediante el cálculo del radio de consistencia el cual nos arrojó un valor de:  $0.02163 < 0.1$  por lo que se concluye que el análisis es correcto.

Se prosigue a realizar el método combinado tomando los valores anteriormente calculados por el método AHP y realizando una reclasificación en clases de las variables de la siguiente manera y de acuerdo con los pesos establecidos por el criterio de experto para cada una de las clases de cada variable.

Pendiente		Aspecto		Geología	
Clase [°]	Pesos	Clase [°]	Pesos	Clase	Pesos
0-7	0.1	< 90	0.9	9	0.8
7-17	0.2	90-180	0.3	6	0.4
17-23	0.3	180-270	0.3	1,2,3,4,5,7,8,10	0.1
23-32	0.8	270-360	0.7		
32-38	0.4				
>38	0.2				

Tabla 1. Clases y pesos para las variables  
Fuente: Propia

Teniendo en cuenta los rangos donde se localizaban la mayor cantidad de MenM. Finalmente se aplica la ecuación de IS y se obtiene el siguiente mapa de susceptibilidad basado en métodos heurísticos.

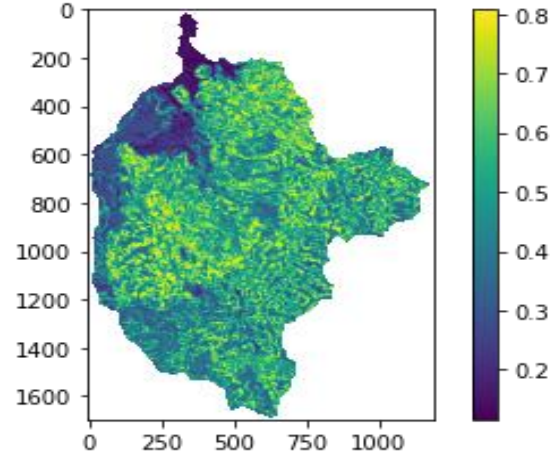


Figura 6. Mapa de susceptibilidad, método heurístico.  
Fuente: Propia

### 3.3 Métodos basados en datos

#### 3.3.1 métodos bivariados

los métodos bivariados usan los mapas de las distintas variables para combinarlos con el inventario y poder asignarle un peso a cada clase que conforman las variables, esto nos ayuda a comprender qué factores juegan un papel importante en la ocurrencia de MenM, para nuestro caso usamos el método peso de la evidencia basado en el teorema de bayes y los métodos Frequency ratio model (Likelihood), Statistical index model que están basados en la densidad de MenM en cada clase.

##### 3.3.1.1 Frequency ratio model (Likelihood)

en general como se mencionó anteriormente los métodos bivariados calculan un peso para cada clase en la que se dividieron las variables,

en este caso el peso fue calculado dividiendo la relación de la ocurrencia de los MenM sobre el área de la clase.

$$w_n = \frac{L_r}{A_r}$$

La clase, en número de celdas de cada clase, en número de movimientos en masa de cada clase y el peso asignado para las diferentes variables se muestran en las siguientes tablas

Frequency Ratio Model: Geología			
Clase [°]	N° Celdas	N° MenM	Pesos
1	5453	1	5.467
2	39173	0	0
3	28895	0	0
4	2130	0	0
5	958	0	0
6	63269	6	2.827
7	14194	0	0
8	229	0	0
9	897456	29	0.963
10	21378	0	0

Frequency Ratio Model: Pendiente			
Clase [°]	N° Celdas	N° MenM	Pesos
0-10	153150	1	0.195
oct-17	184130	4	0.648
17-23	188639	6	0.948
23-32	315658	17	1.605
32-38	162086	7	1.287
>38	69472	1	0.429

Frequency Ratio Model: Aspecto			
Clase [°]	N° Celdas	N° MenM	Pesos
0-90	360800	15	1.239
90-180	121881	4	0.978
180-270	177399	5	0.84
270-360	413055	12	0.866

Tabla 2. Pesos, clases para las variables, método Frequency ratio model  
Fuente: Propia

finalmente se sumaron las 3 variables: geología, aspectos y pendiente y se obtuvo el mapa de susceptibilidad

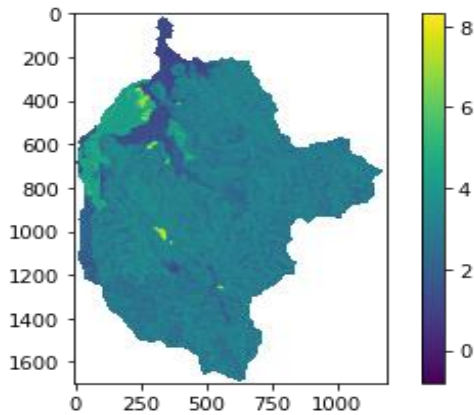


Figura 7. Mapa de susceptibilidad, método Frequency ratio model  
Fuente: Propia

### 3.3.1.2 Statistical Index Model

Este método parte del logaritmo natural de la densidad de movimientos en masa en una clase el cual es dividido por la densidad de deslizamientos en toda la zona de estudio para calcular el peso de cada celda,

$$w_{ij}^n = \ln\left(\frac{\rho_{clase}}{\rho_{total}}\right)$$

Geología		Pendiente		Aspecto	
Clase [°]	Peso	Clase [°]	Peso	Clase [°]	Peso
1	1.7	0-10	-1.64	0-90	0.21
2	-0.27	oct-17	-0.43	90-180	-0.02
3	0.03	17-23	-0.05	180-270	-0.17
4	2.64	23-32	0.47	270-360	-0.14
5	3.44	32-38	0.25		
6	1.04	>38	-0.85		
7	0.74				
8	4.87				
9	-0.04				
10	0.33				

Tabla 3. Pesos, clases para las variables, método Statistical Index Model  
Fuente: Propia

para finalmente realizar una sumatoria de los pesos de las variables geología, pendiente y aspecto obteniendo el siguiente mapa de susceptibilidad:

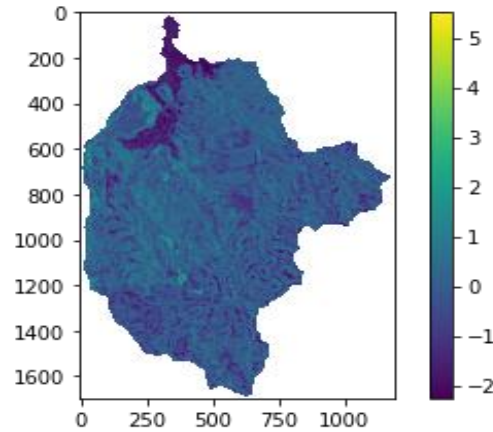


Figura 8. Mapa de susceptibilidad del método Statistical Index Model.  
Fuente: Propia

### 3.3.1.3 Peso de la evidencia

Este método también se basa en la teoría de probabilidad bayesiana y analiza la relación entre las áreas afectadas por MenM y la distribución espacial de los factores condicionantes, principalmente se calculan los pesos positivos  $W_p$  (que indican la presencia de la clase como parámetro que favorece los MenM) y su magnitud indica su correlación y negativos  $W_n$  (indica la ausencia de la clase en la ocurrencia de movimiento en masa.). el contraste  $C$  que resulta de la resta entre  $W_p$  y  $W_n$  nos muestra cuando la clase no afecta (0) la distribución de MenM cuando existe una relación directa (+) con la distribución de MenM cuando existe una correlación inversa en la distribución de MenM (-), también se usa para realizar la respectiva reclasificación los mapas de aspecto, pendiente y geología. Se debe tener en cuenta que para ejecutar los cálculos correctamente se deben remplazar los 0 por



1, las clases, los pesos positivo y negativo y el contraste para nuestra zona de estudio lo podemos observar en las siguientes tablas:

Peso de la evidencia: Pendiente			
Clase [°]	Wp_Clase	Wn_Clase	Contraste (c)
0-10	-1.64	0.13	-1.76
10-17	-0.43	0.07	-0.50
17-23	-0.12	0.03	-0.15
23-32	0.41	-0.26	0.67
32-38	0.25	-0.05	0.31
>38	-0.85	0.04	-0.88

Peso de la evidencia: Aspecto			
Clase [°]	Wp_Clase	Wn_Clase	Contraste (C)
0-90	0.21	-0.13	0.34
90-180	-0.02	0	-0.02
180-270	-0.17	0.03	-0.21
270-360	-0.14	0.08	-0.22

Peso de la evidencia: Geología			
Clase [°]	Wp_Clase	Wn_Clase	Contraste (C)
1	1.70	-0.02	1.72
2	-0.27	0.01	-0.28
3	0.03	0.00	0.03
4	2.64	-0.03	2.67
5	3.44	-0.03	3.47
6	1.04	-0.12	1.16
7	0.74	-0.01	0.76
8	4.87	-0.03	4.90
9	-0.04	0.17	-0.21
10	0.33	-0.01	0.34

Tabla 4. Clase, pesos y contraste método peso de la evidencia.  
Fuente: Propia

Finalmente, los mapas reclasificados teniendo en cuenta el contraste se suman con la ecuación IS (índice de susceptibilidad) el cual nos da el siguiente mapa de susceptibilidad

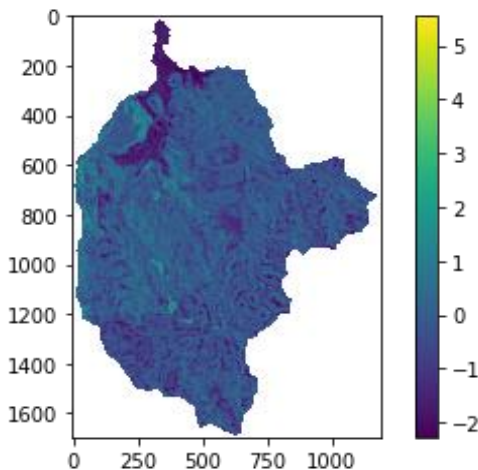


Figura 9. Mapa de susceptibilidad del método peso de la evidencia  
Fuente: Propia

### 3.3.2 Métodos Multivariados

#### 3.3.2.1 Regresión Logística

Este método estima la relación de la ocurrencia de MenM, con un grupo de variables independientes en este caso la geología el aspecto y pendiente, encontrando los coeficientes de la combinación lineal de las variables independientes, los cuales son los pesos de las variables. El mapa de susceptibilidad que arroja este método presenta rangos entre 0 y 1 donde 0 es la probabilidad nula de ocurrencia de MenM y 1 es la máxima probabilidad de ocurrencia.

La siguiente tabla nos muestra un resumen de los resultados y métricas de desempeño del modelo.

Logit Regression Results						
Dep. Variable:	inventario	No. Observations:	1073135			
Model:	Logit	Df Residuals:	1073123			
Method:	MLE	Df Model:	11			
Date:	Thu, 08 Dec 2022	Pseudo R-squ.:	0.02816			
Time:	17:59:04	Log-Likelihood:	-395.44			
converged:	False	LL-Null:	-406.89			
Covariance Type:	nonrobust	LLR p-value:	0.01818			
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
Intercept	-8.4447	1.000	-8.444	0.000	-10.405	-6.485
C(geologia)[T.2.0]	-26.4770	2.59e+05	-0.000	1.000	-5.09e+05	5.08e+05
C(geologia)[T.3.0]	-20.9651	2.24e+04	-0.001	0.999	-4.4e+04	4.4e+04
C(geologia)[T.4.0]	-12.1904	745.918	-0.016	0.987	-1474.164	1449.783
C(geologia)[T.5.0]	-13.2843	2073.014	-0.006	0.995	-4076.318	4049.749
C(geologia)[T.6.0]	-0.3700	1.088	-0.340	0.734	-2.503	1.763
C(geologia)[T.7.0]	-24.8493	1.36e+05	-0.000	1.000	-2.67e+05	2.67e+05
C(geologia)[T.8.0]	-8.1519	281.344	-0.029	0.977	-559.576	543.273
C(geologia)[T.9.0]	-2.1343	1.027	-2.078	0.038	-4.147	-0.122
C(geologia)[T.10.0]	-8.6720	28.062	-0.309	0.757	-63.672	46.328
pendiente	0.5936	0.200	2.966	0.003	0.201	0.986
aspecto	-0.1535	0.168	-0.912	0.362	-0.483	0.176

Figura 10. Resumen y métricas del método regresión logística .  
Fuente: Propia

Finalmente, el método nos arroja el siguiente mapa de susceptibilidad

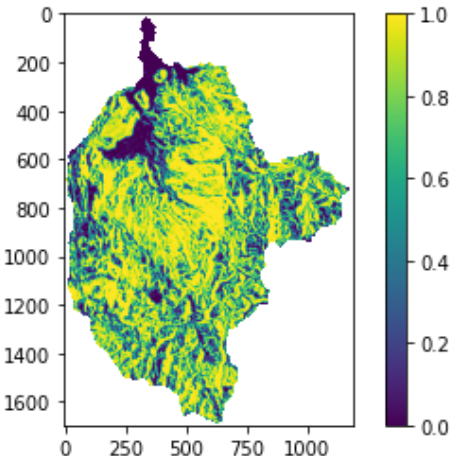


Figura 11. Mapa de susceptibilidad del método regresión logística  
Fuente: Propia

### 3.4 métodos con base física

Estos métodos evalúan la ocurrencia de MenM en términos de factor de seguridad o probabilidades de ocurrencia a través de modelos numéricos, estos métodos funcionan bien en análisis en áreas pequeñas a escalas detalladas ya que requieren mucha información, pero permiten tener en consideración la complejidad de los factores detonantes y las características geomecánicas del terreno.

### 3.4.1 Modelo SHALSTAB

El Modelo SHALSTAB relaciona un modelo hidrológico TOPOG (O'Loughlin, 1986) y un modelo geotécnico basado en análisis de equilibrio límite con talud infinito y el criterio de falla de Mohr Coulomb, con base a esto se determinan cuatro condiciones de estabilidad para cada celda de análisis las cuales corresponden en el mapa a celdas estables (celdas con valor de 4), inestables (celdas con valor de 3), incondicionalmente inestables (celdas con valor de 2) e incondicionalmente estables (celdas con valor de 1)

La siguiente tabla nos muestra los parámetros geomecánicos que se usaron para las distintas unidades geológicas presentes en nuestra zona de estudio, estos datos fueron recolectados de distintas fuentes, como el estudio de microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, particularmente para calcular el espesor del suelo se usó la siguiente formula que relaciona la pendiente (s) con el espesor del suelo (l);

$$l = -0.43s + 21.43$$

Geología	$\Phi$ [°]	C [kPa]	Peso unitario [kPa]	Permeabilidad Ks [cm/h]
1	16	20	16	0.036
2	28	26	18	0.036
3	35	5	20	0.15
4	28	26	18	0.036
5	28	26	18	0.18
6	28	26	18	0.036
7	28	26	18	0.036
8	16	8	19	0.036
9	27	17	17	0.018
10	21	32	18	0.0216

Tabla 4. Parámetros geomecánicos  
Fuente: CORANTIOQUIA, 2015, AMVA. (2006)

Finalmente se obtienen 2 mapas, el primer mapa de celdas estables denominado matest

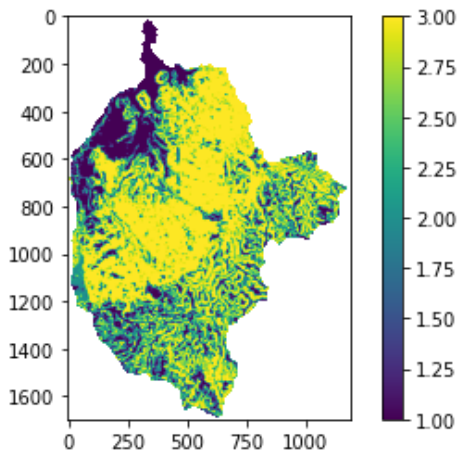


Figura 12. mapa matest, método SHALSTAB.  
Fuente: Propia

Y el Segundo mapa denominado Matq. que representa el valor de lluvia necesario para que fallen las celdas

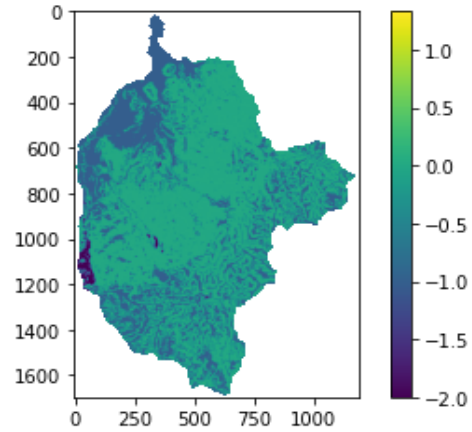


Figura 13. mapa Matq, método SHALSTAB.  
Fuente: Propia

### 4. Evaluación del modelo

Analizando la evaluación del modelo mediante el are bajo la curva ROC el cual nos evalúa la capacidad de predicción del modelo, obteniendo en este caso, un modelo que no es bueno ya que presenta el mismo numero de aciertos que desaciertos.

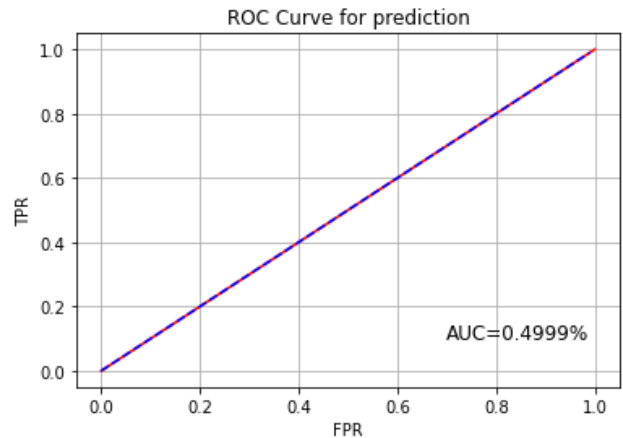


Figura 14. Evaluación del modelo.  
Fuente: Propia

### 5. Discusión y Conclusiones

Algunos de los métodos para evaluar este tipo de fenómenos son muy complejos ya que requieren gran cantidad de información, esto se pudo observar en el método con base física el cual requiere variables geomecánicas de los suelos las cuales son difíciles de determinar con exactitud para grandes áreas, por lo que este método sería más adecuado para hacer un análisis detallado en pequeña escala.

De acuerdo con figura 10 se observa que la variable pendiente es una variable importante para la ocurrencia de movimientos en masa ya que el p-value presenta valores menores del 5 % al igual que la variable de categórica de geología en su clase 9, siendo esto consistente con los análisis que se han obtenido de los modelos anteriormente tratados.

Los mapas de susceptibilidad del modelo SHALSTAB y Regresión Logística muestran ser, para este caso, modelos mas conservadores ya

que la distribución de las zonas inestables o potencialmente inestables presentan mayores distribuciones dentro de la cuenca de estudio.

La evaluación del modelo no arrojó resultados muy favorables, esto se puede evidenciar en la figura 14 ya que el AUC nos arrojó un porcentaje aproximado de 0.5 % lo que se traduce en que nuestro modelo tiene la misma cantidad de aciertos y desaciertos por lo que no es un modelo

Para nuestra zona de estudio las variables principales importantes para la evaluación de susceptibilidad a movimientos en masa son: la geología, los aspectos y la pendiente siendo esta última la que más peso tiene en nuestros modelos, presentando una relación directa en la incidencia de movimientos en masa y las pendientes altas.

Los resultados en las distintas metodologías en general nos muestran mapas conservadores para el caso de los métodos en base física, mientras que para los métodos basados en datos podemos observar que la distribución de una susceptibilidad alta es menos recurrente en la cuenca.

El método de base física muestra mucha incertidumbre ya que el área de nuestra cuenca es grande, y este método utiliza parámetros geomecánicos muy específicos de la zona los cuales tienen que ser medidos directamente para que este modelo sea más confiable.

En general es necesario realizar una mayor recolección de datos para el inventario de MenM esto ya que es un elemento fundamental para que las variables predictoras sean más representativas y los modelos se sustenten en una mayor cantidad de datos disminuyendo la incertidumbre.

Las zonas con mayor susceptibilidad se distribuyen en las altas pendientes y la litología, siendo las zonas más planas las que tienen poca susceptibilidad a MenM en los distintos modelos.

Las herramientas estadísticas juegan un papel importante en el desarrollo y entendimiento de los modelos, ya que en general se necesita un análisis cuantitativo de las variables

## 7. referencias

- [1] Aristizábal, Edier. 2022. Libro Guía del curso Cartografía Geotécnica. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas
- [2] AMVA. (2006). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado (Inf. Téc.). Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- [3] E. F. García-Aristizábal, E. V. Aristizábal Giraldo, R. J. Marín Sánchez, y J. C. Guzmán Martínez, «Implementación del modelo TRIGRS con análisis de confiabilidad para la evaluación de la amenaza a movimientos en masa superficiales detonados por lluvia», *TecnoL.*, vol. 22, n.º 44, pp. 111–129, ene. 2019.
- [4] Gao, L., Zhang, L. M., & Chen, H. X. (2017). Likely Scenarios of Natural Terrain Shallow Slope Failures on Hong Kong Island under Extreme Storms. *Natural Hazards Review*, 18(1), B4015001. doi:10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000207
- [5] Estudios Y Diseños Geológicos, Geotécnicos, Hidráulicos Y Estructurales De 1 Km De Vía En La Vereda El Totumo Municipio De Girardota, CORANTIOQUIA, 2015.