



Departamento de geociencias y medio ambiente

Estudio de susceptibilidad de movimientos en masa cuenca la Doña María

Erluan Andrés Zabaleta Benavides

Diciembre 2023

Presentado a Edier Aristizabal

1. Introducción

El estudio de susceptibilidad nos permite conocer de forma espacial la ocurrencia de movimientos en masa en una zona, permitiendo generar soluciones acorde con los resultados, son necesarios para la planeación rural de una ciudad o pueblo, así que son de suma importancia para el avance de la sociedad.

Como seres humanos no somos capaces de predecir de manera exacto donde ocurrirán movimientos en masa, aun así existen modelos que dan un acercamiento a la realidad de forma imprecisa pero que en ciertos contextos puede ser útil, para generar estos modelos son necesarios una serie de variables y cartografía básica de la zona.

2. Generalidades de la cuenca

La quebrada Doña María esta ubicada en el departamento Antioquia entre los municipios Itagui y Medellín, la cuenca se encuentra altamente poblada en su parte baja y ha sido víctima de múltiples

deslizamientos durante el tiempo, esta cuenca es un caso de estudio importante ya que se tiene registro de gran cantidad de movimientos en masa y cartografía en una alta escala.

La quebrada Doña María ha sido zona de mucho estudio durante el tiempo debido a su carácter tan torrencial, además de esto, el SIATA tiene varios sensores en esta zona como responsabilidad de ser una cuenca del AMVA, dentro de estos sensores se encuentra 4 pluviómetros puntuales para la medición de precipitación, se encuentra un nivel del caudal en la desembocadura de la cuenca y 1 disdómetro para medir la intensidad de la lluvia con el tamaño y velocidad de las gotas. Como fuentes de información extra se puede usar el satélite CHIRIPS y el radar del SIATA los cuales dan una precipitación mas general en la zona.

Parametro	Valor
Área	75.47 Km ²
Perímetro	69.72 Km
Altitud máxima	3103 msnm
Altitud mínima	1518 msnm
Altitud promedio	2134 msnm
Distancia del Drenaje principal	23.86 Km
Máximo orden	5
Pendiente promedio	25,54°
Longitud axial longitudinal	13.72 Km
Longitud axial trasversal	4.99 Km

Cuadro 1: Parámetros de la cuenca

3. Información secundaria

Como parte del proyecto carto-antioquia la cuenca Doña María cuenta con información secundaria de buena escala, DEM con resolución 1:2000 y geología y geomorfología en 1:5000. Además de una base cartográfica con la misma escala.

La base cartográfica se puede construir con ayuda del DEM en 1:2000, generando curvas de nivel cada 75 metros y un hillshade con azimut

de 315° , los drenajes fueron obtenidos de la cartografía base del AM-VA al igual que la información administrativa.

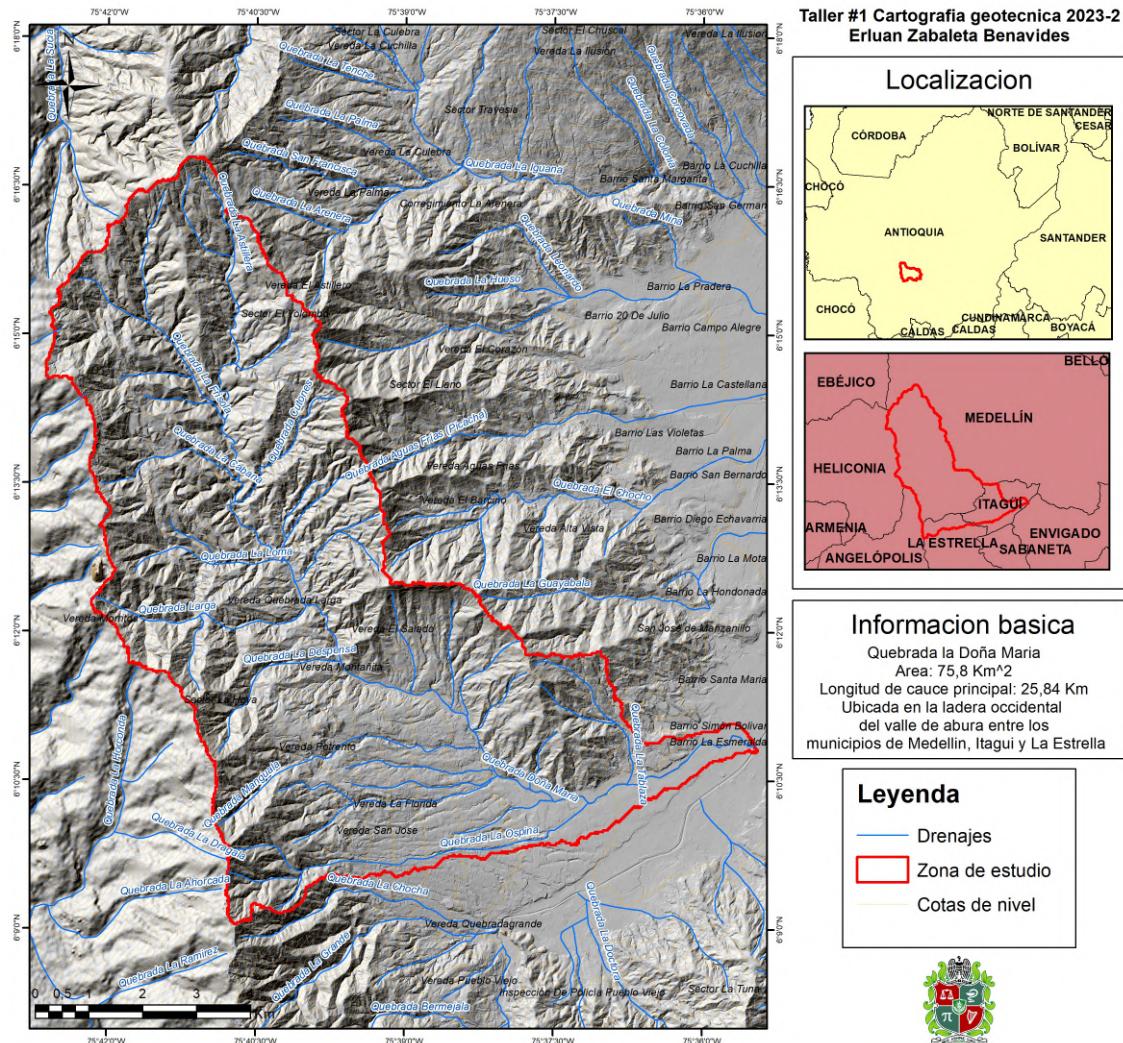


Figura 1: Base cartográfica

El DEM con el cual se trabajara sera un DEM en 1:2000 el cual se reescalara a 1:5000 para no necesitar tanta capacidad computacional y agilizar los procesos.

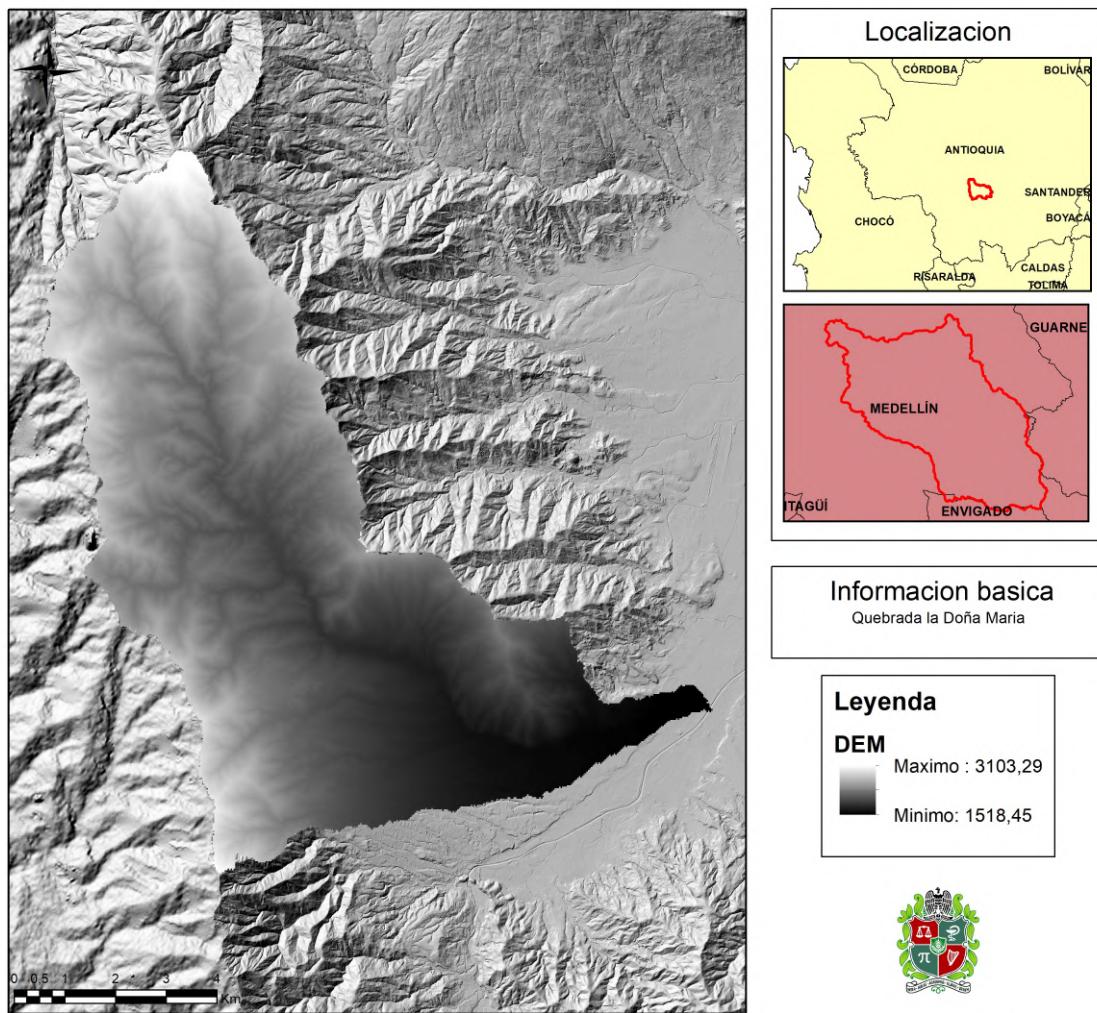


Figura 2: DEM

La geología como la geomorfología han sido extraídas de la cartografía realizada por cartoantioquia en el AMVA.

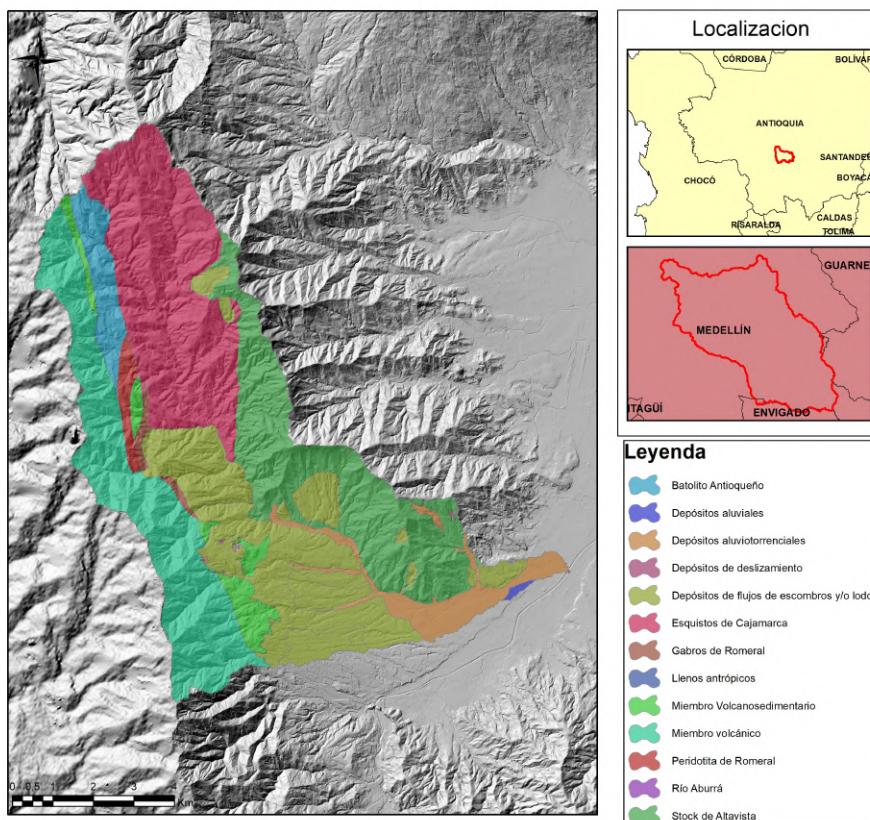


Figura 3: Geología

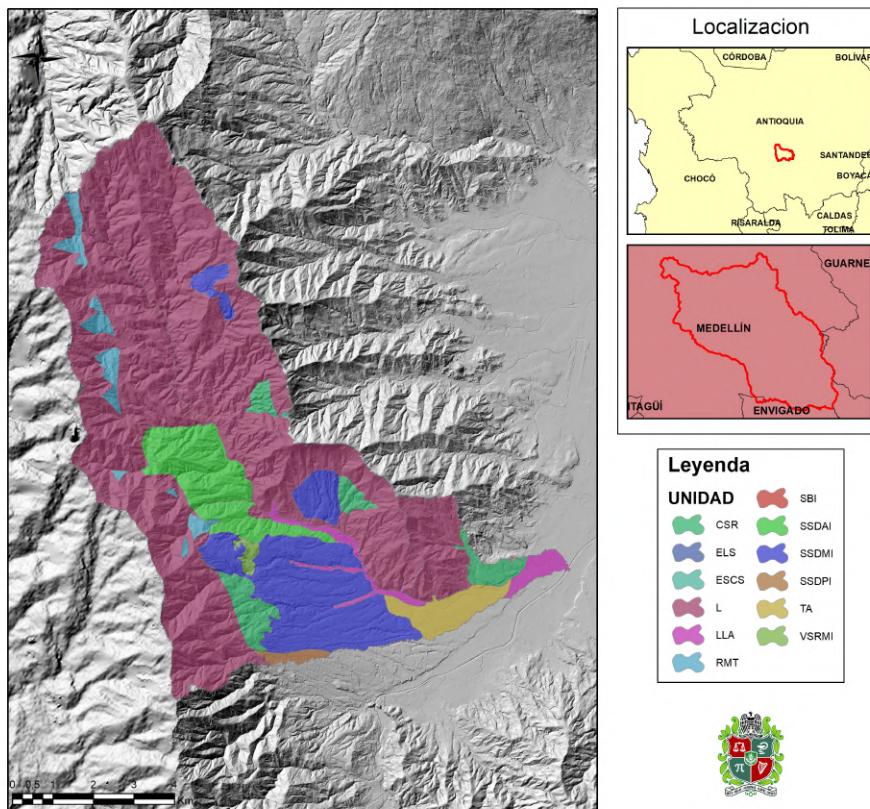


Figura 4: Geomorfología

4. Inventario movimientos en masa

Con ayuda de imagenes satelitales y la herramienta Google Earth se fotointerpreto diferentes tiempo en la zona de estudio para caracterizar la mayor cantidad de eventos posibles, asi se generaron 135 eventos como deslizamientos y flujos en poligonos, ademas con informacion secundaria del geovisor de GEOHAZARDS de donde se trajeron 76 eventos entre deslizamientos y flujos. De los poligonos se tiene informacion del tipo de movimiento, actividad, area, fecha de la imagen de donde se extrajo el movimiento y posible causal del evento, mientras que en los puntos de GEOHAZARDS se tiene informacion de la coordenada, tipo de movimiento, causante, muertes y fecha y hora aproximada. A continuacion se muestran las estadisticas de estos.

Tipo de movimiento	Numero de eventos	Numero de muertes
Landslide	70	7
Debris flow	6	0

Cuadro 2: Inventario de eventos tipo puntos

Tipo de movimiento	Numero de activos	Numero de no activos
Deslizamiento	102	22
Flujos	7	4

Cuadro 3: Inventario de eventos tipo polígono

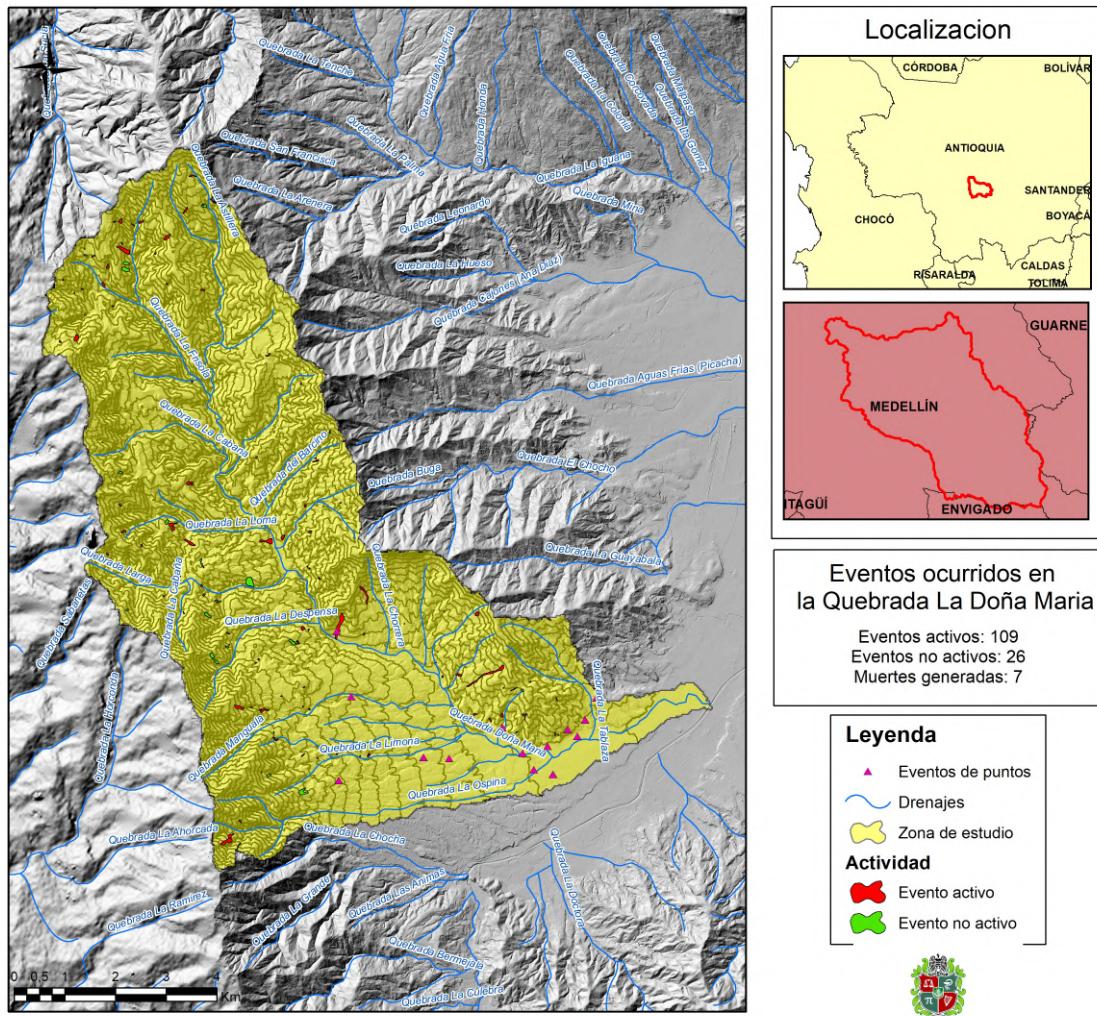


Figura 5: Eventos

5. Análisis de variables

Para este estudio se analizaron 6 variables las cuales se eligieron por su relevancia al momento de generar o no movimientos en masa, las variables elegidas fueron: Pendientes, coberturas, curvatura total, geología, acumulación de aguas y aspectos.

Estas variables fueron sometidas a un análisis multivariado, bivariado y univariado para estudiar su comportamiento frente a la generación de movimientos en masa, se tomaron en cuenta el tamaño de los raster que fueran iguales entre si y se hicieron remplazos para la mayor facilidad de observación de los datos como en acumulación de aguas donde se descartaron aquellas celdas con valores mayores a 100.

Las pendientes fueron generadas con el DEM de celdas 2,5 X 2,5 reescalado del AMVA, las coberturas se generaron con un proceso supervisado con polígonos de entrenamiento en una imagen de Sentinel-2 de 10 metros por 10 metros descargada del portal de Copernicus. La curvatura total fue generada con la combinación de curvatura planar y de perfil origen del DEM antes mencionado al igual que la variable de acumulación de agua generada con el DEM en la herramienta de arcmap. Al igual que la pendiente la variable aspectos también es generada con el DEM. A continuación se presentan las variables en la zona.

5.1. Análisis uni-variado

Para entender como se relacionan las variables primero debemos entender el comportamiento de cada una, así se separan las variables continuas de las discretas, siendo pendiente, aspecto y flujo variables continuas y geología, coberturas y curvatura variables discretas.

Primero miremos las variables discretas viendo la cantidad de píxeles que contiene cada valor y mas importante que significa cada valor:

Valor	Significado	Cantidad de píxeles
01	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos	2722364
02	Miembro Volcanosedimentario	434639
03	Depósitos de deslizamiento	8968
04	Depósitos aluviotorrenciales	613037
05	Llenos antrópicos	419
06	Batolito Antioqueño	476827
07	Peridotita de Romeral	157791
08	Depósitos aluviales	20258
09	Gabros de Romeral	87237
10	Río Aburrá	160
11	Stock de Altavista	2351008
12	Esquistos de Cajamarca	2805198
13	Miembro volcánico	2370683

Cuadro 4: Valores geología

Valor	Significado	Cantidad de pixeles
01	Plano-Convexo	113171
02	Convexo-Convexo	4078402
03	Convexo-Cóncavo	1986795
04	Cóncavo-Convexo	1816867
05	Plano-Cóncavo	101149
06	Cóncavo-Cóncavo	3738968
07	Cóncavo-Plano	67610
08	Convexo-Plano	83607
09	Plano-Plano	62020

Cuadro 5: Valores curvatura total

Valor	Significado	Cantidad de pixeles
01	Uso Urbano	2332051
02	No vegetación	510568
03	Bosques	3500162
04	Vegetación media	1741264
05	Vegetación baja	3964544

Cuadro 6: Valores coberturas

Ahora para el análisis de las variables continuas se realizarán gráficas tipo violín con los cuartiles marcados para ver la distribución de estas.

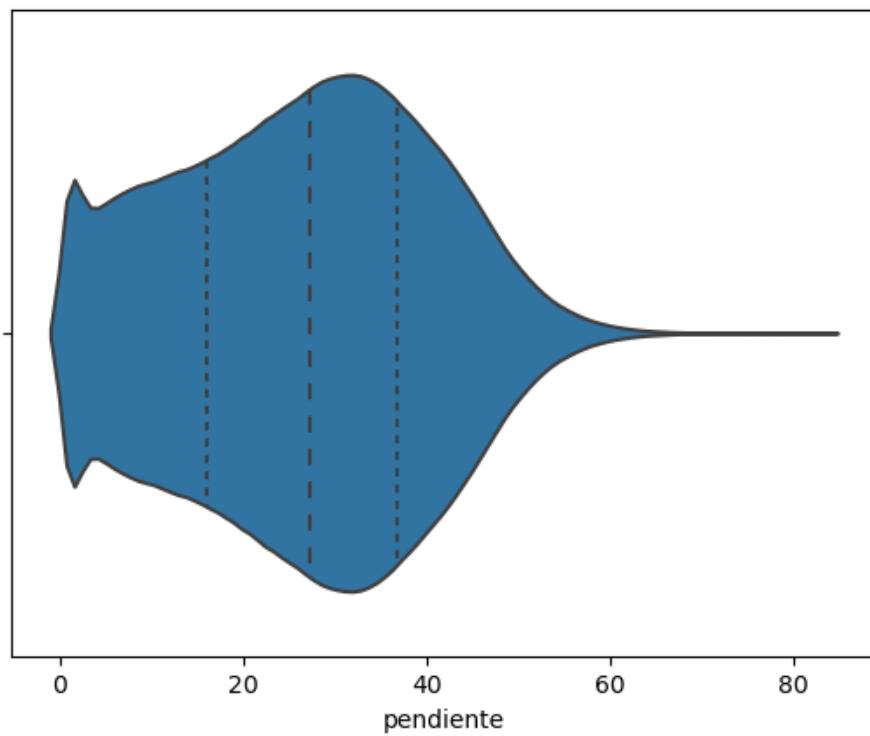


Figura 6: Distribución pendiente

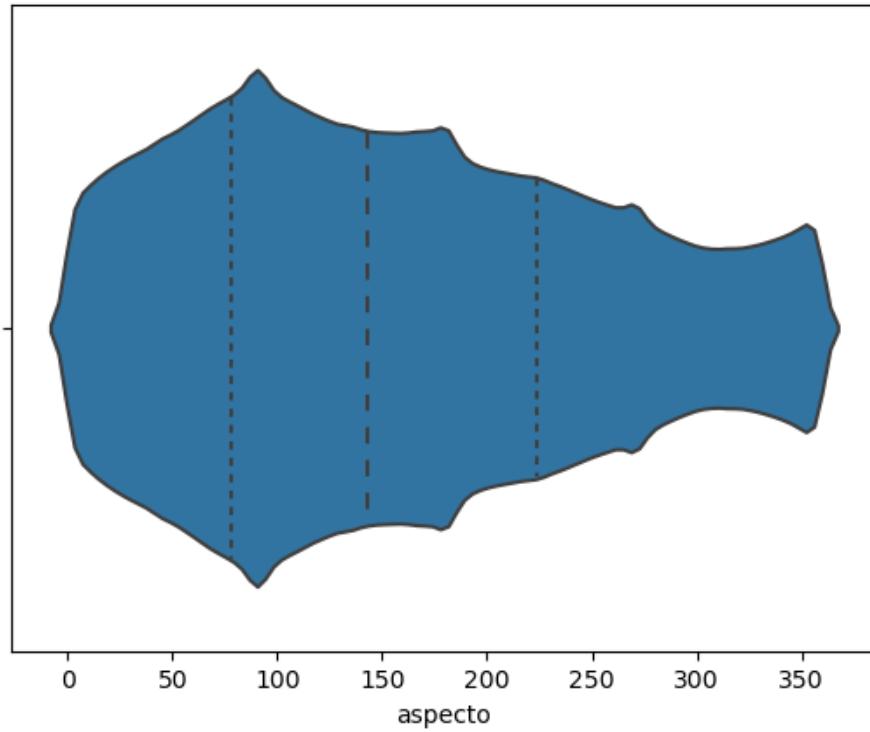


Figura 7: Distribución aspecto

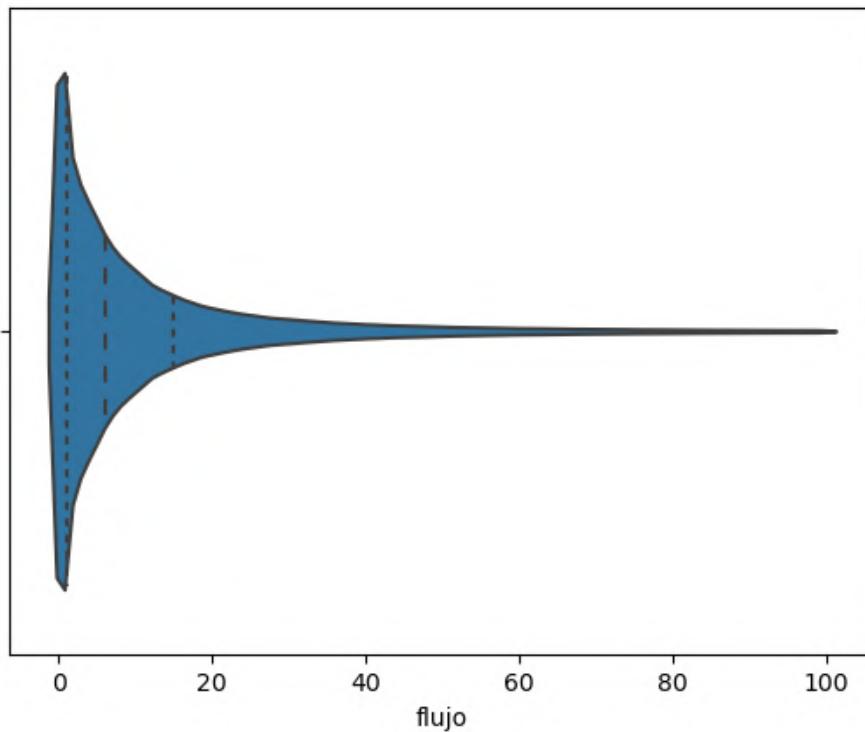


Figura 8: Distribución flujos

Con estas gráficas podemos conocer la distribución de los datos, ver que pendientes o que geología es mas común y cual menos común en la zona.

5.2. Análisis bi-variado

En este tipo de análisis se busca encontrar relaciones entre dos variables para conocer si una puede ser una variable proxy de la otra y así disminuir el numero de variables por ende hacer mas eficiente el modelo, se realizaron gráficas para comparar los datos de las variables continuas ya que son las que mas patrones pueden mostrar:

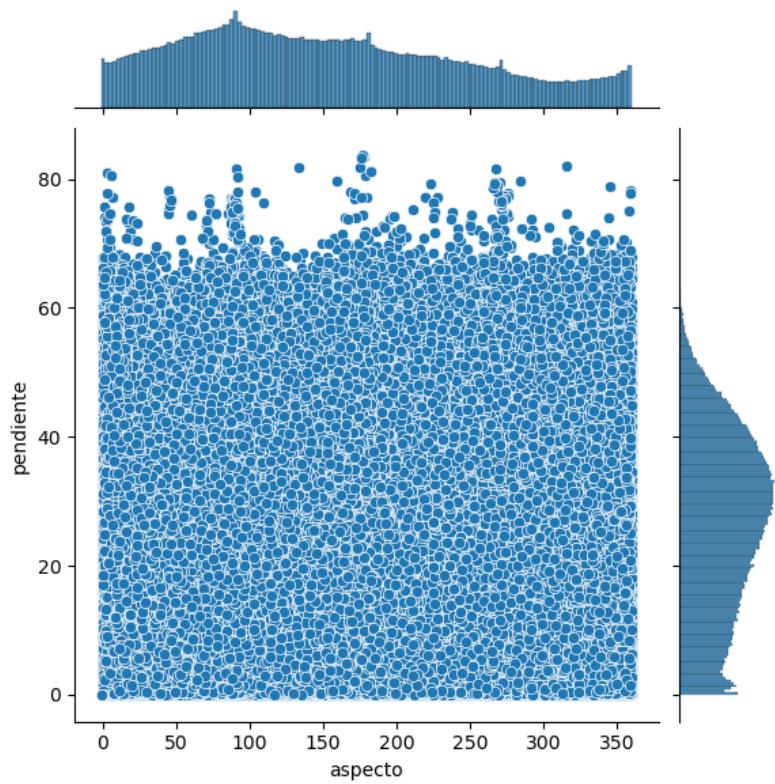


Figura 9: Pendiente vs Aspecto

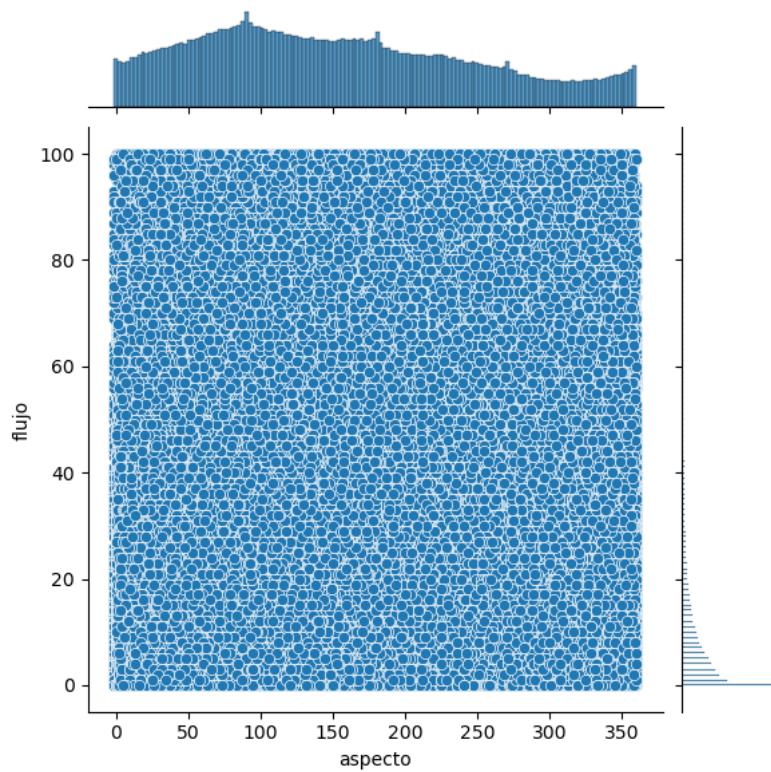


Figura 10: Flujo vs Aspecto

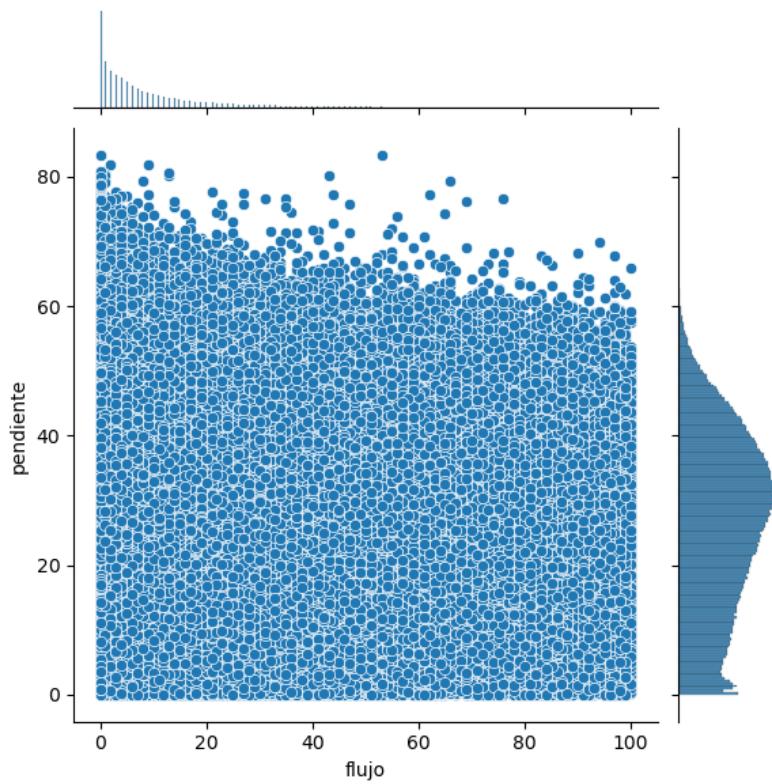


Figura 11: Flujo vs Pendiente

Como se observa, estas variables no tienen relación entre si ya que no se exhibe un patrón claro en las gráficas por ende si quisieramos usar las 3 variables juntas no nos implicaría ningún problema.

Otro análisis bi-variado es el comportamiento de una misma variable teniendo en cuenta una variable dependiente como la presencia de movimientos en masa así se puede generar una tabla con los valores promedios de las variables donde hay movimientos y donde no, y también generar gráficos del comportamiento de la variable con movimientos y sin movimientos.

Variable	Promedio con MenM	Promedio sin MenM
Inventario	NO	SI
Pendiente	26.46	30.59
Aspecto	154.62	142.23
Flujo acumulado	12.07	13.78

Cuadro 7: Valores medio variables con y sin MenM

Para las variables discretas se busco el porcentaje de píxeles con movimientos en masa en cada categoría.

Valor	Significado	Porcentaje
01	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos	20.35 %
02	Miembro Volcanosedimentario	5.54 %
03	Depósitos de deslizamiento	0.07 %
04	Depósitos aluviotorrenciales	1.17 %
05	Llenos antrópicos	0.0 %
06	Batolito Antioqueño	9.97 %
07	Peridotita de Romeral	0.0 %
08	Depósitos aluviales	0.0 %
09	Gabros de Romeral	2.64 %
10	Río Aburrá	0.0 %
11	Stock de Altavista	23.85 %
12	Esquistos de Cajamarca	11.66 %
13	Miembro volcánico	24.75 %

Cuadro 8: Valores geología en movimientos en masa

Valor	Significado	Porcentaje
01	Uso Urbano	2.7 %
02	No vegetación	4.39 %
03	Bosques	34.4 %
04	Vegetación media	22.9 %
05	Vegetación baja	35.62 %

Cuadro 9: Valores coberturas en movimientos en masa

Valor	Significado	Cantidad de pixeles
01	Plano-Convexo	0.61 %
02	Convexo-Convexo	30.18 %
03	Convexo-Cónvavo	15.43 %
04	Cónvavo-Convexo	17.13 %

05	Plano-Cóncavo	0.61 %
06	Cóncavo-Cóncavo	35.12 %
07	Cóncavo-Plano	0.48 %
08	Convexo-Plano	0.39 %
09	Plano-Plano	0.05 %

Cuadro 10: Valores curvatura total en movimientos en masa

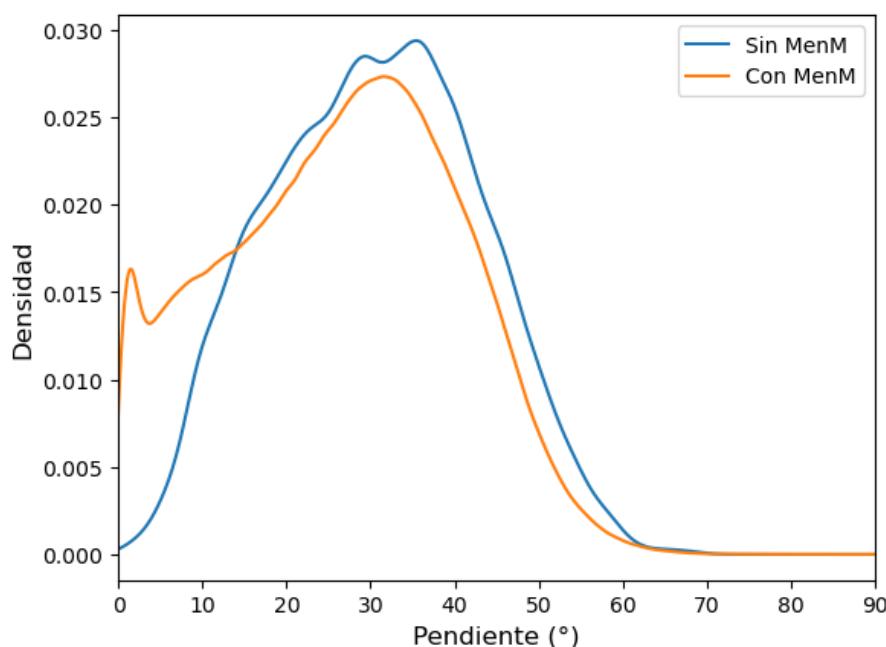


Figura 12: Pendientes sin MenM y pendientes con MenM

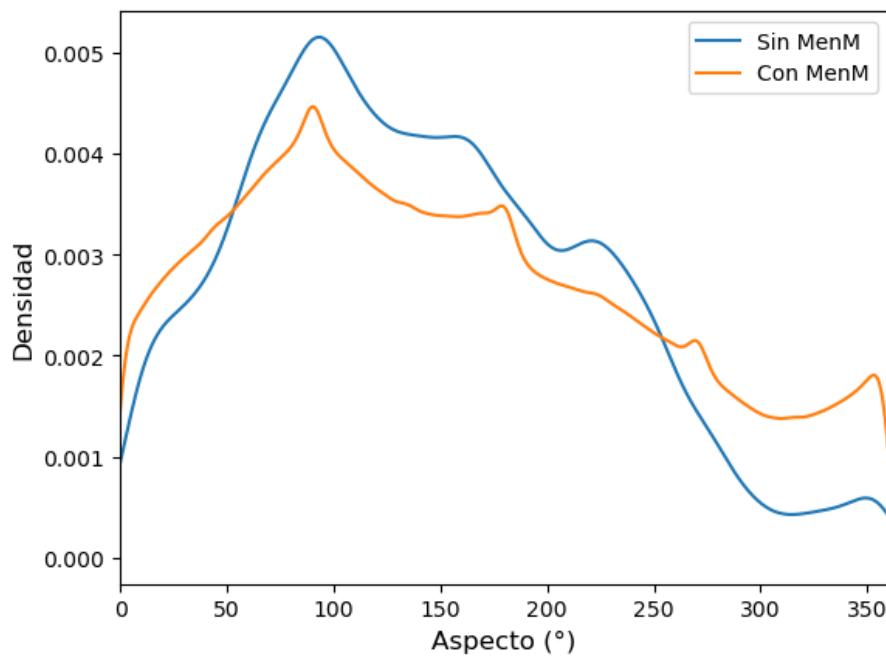


Figura 13: Aspecto sin MenM y Aspecto con MenM

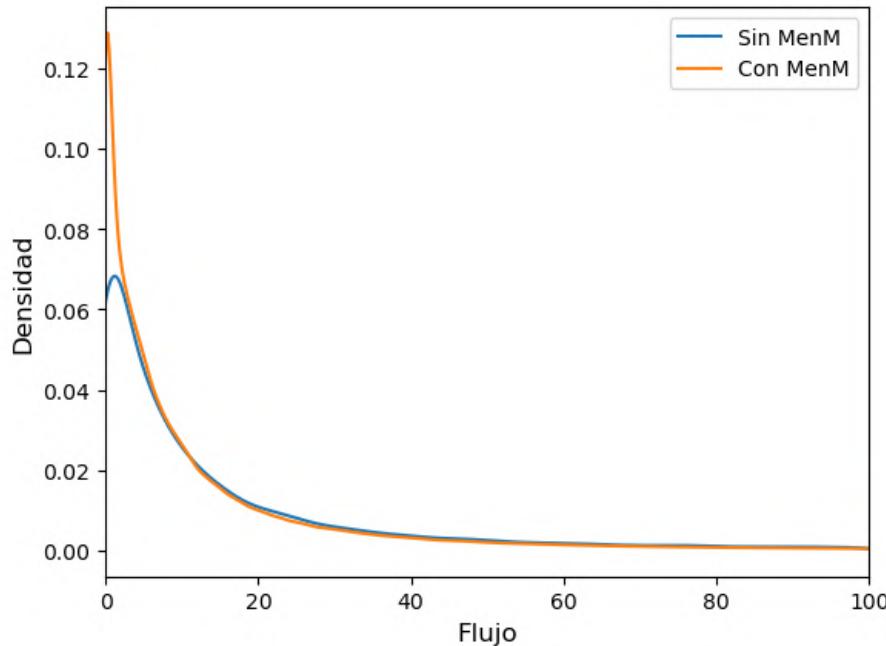


Figura 14: Flujo sin MenM y Flujo con MenM

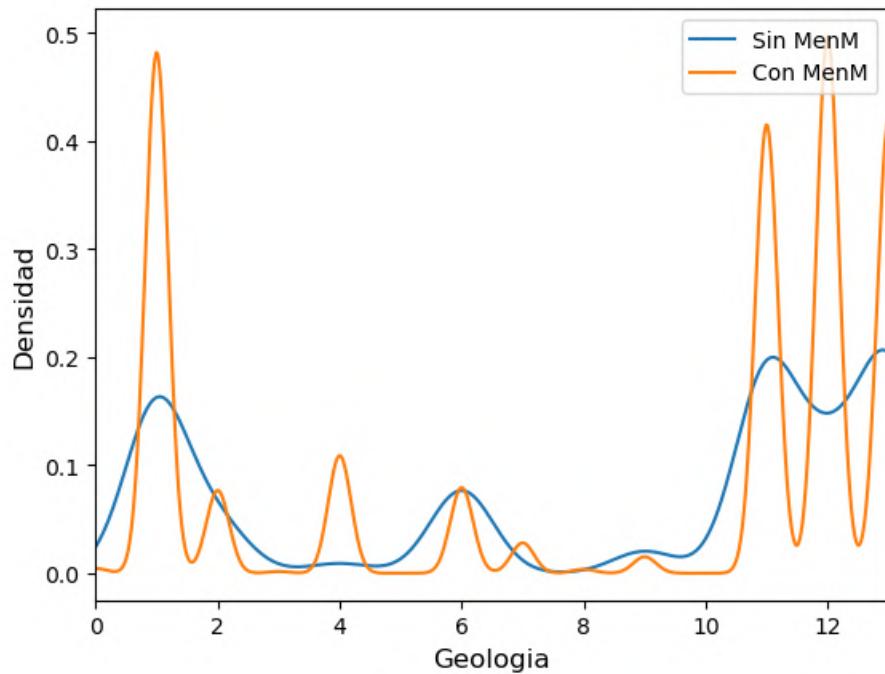


Figura 15: Geología sin MenM y Geología con MenM

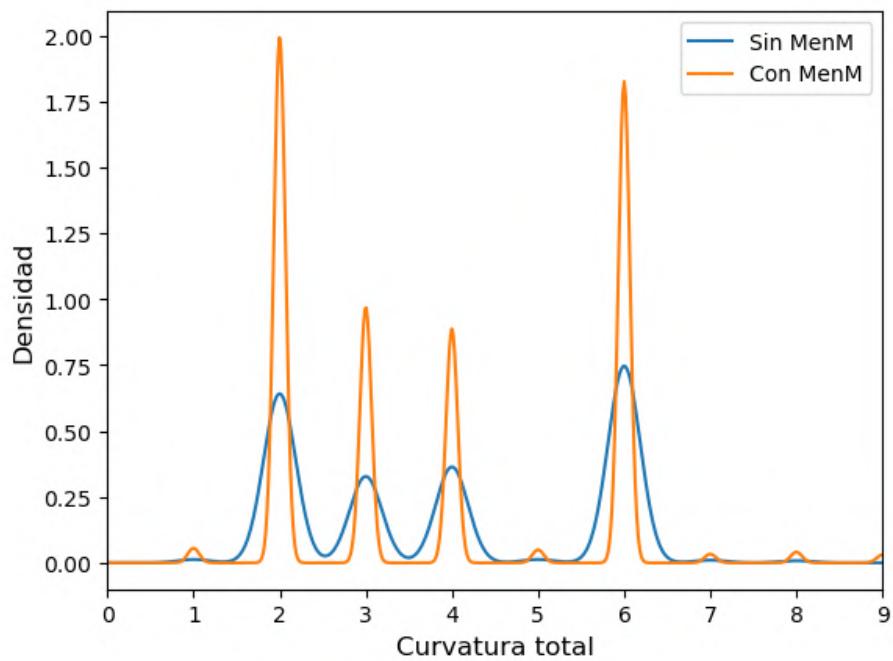


Figura 16: Curvatura sin MenM y Curvatura con MenM

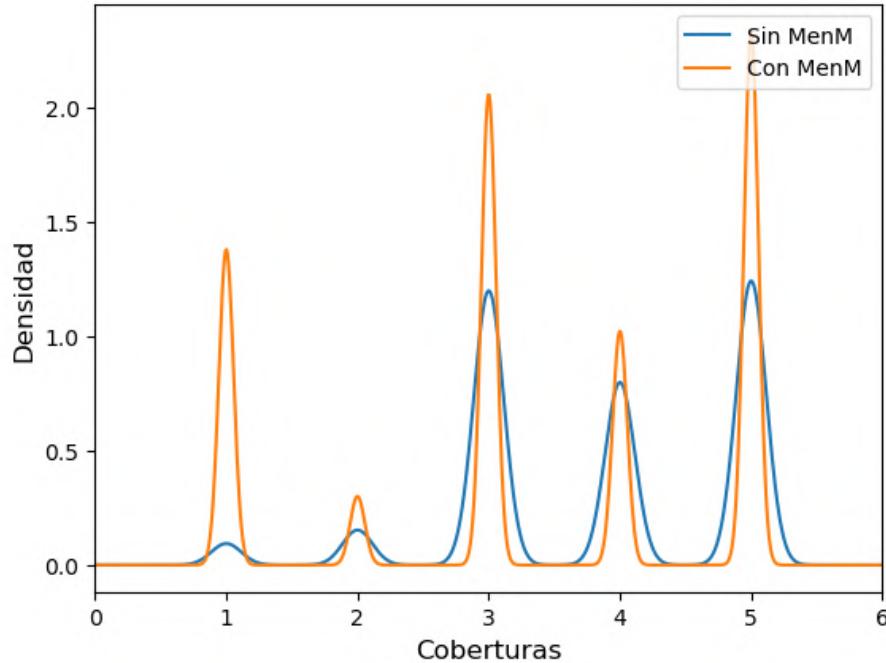


Figura 17: Coberturas sin MenM y Coberturas con MenM

Con ayuda de las gráficas y los valores reportados se puede tomar una decisión, si es útil utilizar una variable teniendo en cuenta si es significativo su cambio cuando se produce un MenM o cuando no. Si revisamos la variable pendiente el cuadro 7 nos indica cambio en la media de la pendiente y en la figura 12 observamos como los movimientos en masa se generan en pendientes bajas de 0° a 15° . Con la variable aspecto del cuadro 7 no obtenemos mucha información ya que da medias muy parecidas pero de la figura 13 se puede observar un control en los aspectos hacia el NE y NW. En la variable flujo observando el cuadro 7 notamos que para MenM hay un aumento en el flujo cosa también apreciable en la figura 14.

Para variables categóricas también se puede hacer este análisis, para la variable geología, coberturas y curvatura total de sus tablas de relación de porcentajes se puede observar que categorías son mas susceptibles a MenM y gracias a sus gráficas se puede conocer que tanto varia la distribución respecto la variable en zonas de no MenM, por ejemplo en geología se observa mucha densidad en la categoría 4 respecto a la densidad de la categoría 4 cuando no hay MenM.

5.3. Análisis multi-variado

Un análisis multivariado me permite conocer las relaciones de todas las variables con todas las variables de forma rápida en una sola

gráfica o un solo estadístico como pueden ser los coeficientes de correlación o los componentes principales o PCA.

5.3.1. Coeficientes de correlación

Un coeficiente de correlación me dicta de manera directa la correlación entre variables, siendo $|r| > 0$ correlación positiva donde si una variable aumenta la otra aumenta también o si $|r| < 0$ es correlación negativa donde si una variable aumenta la otra disminuye. Con este método se puede conocer si una variable me representa otra y la puedo eliminar o por si el contrario una variable es independiente y es necesaria en el estudio.

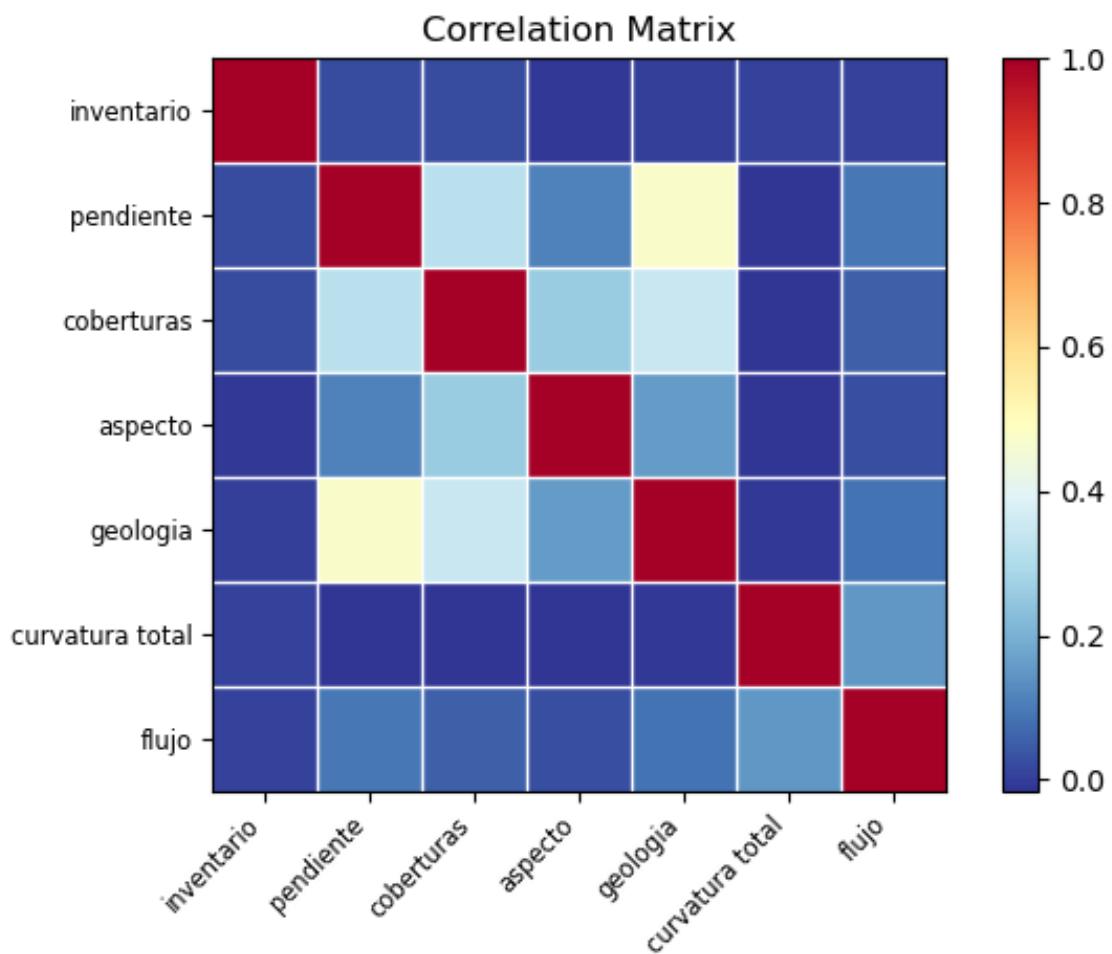


Figura 18: Coeficientes de correlación

Como se observa en la figura 18 los cuadros con valores cálidos nos indican mucha correlación y valores fríos poca correlación en este caso la mayor correlación la tienen geología y pendiente lo que podría indicar que ambas variables representan lo mismo en la afectación de movimientos en masa aun así es de alrededor 0.5 no tan alta para tomar una decisión apresurada.

5.3.2. Componentes PCA

Con un análisis PCA se pueden obtener diferentes componentes que aportan un porcentaje a la varianza de las variables, entre mayor sea mayor impacto tiene ese componente, lo que graficamos es cada componente que variables aportan mas a cada componente pudiendo identificar variables mas importantes (que aporten mucho a componentes de mayor varianza) o variables menos importantes y asi poder reducir el numero de variables.

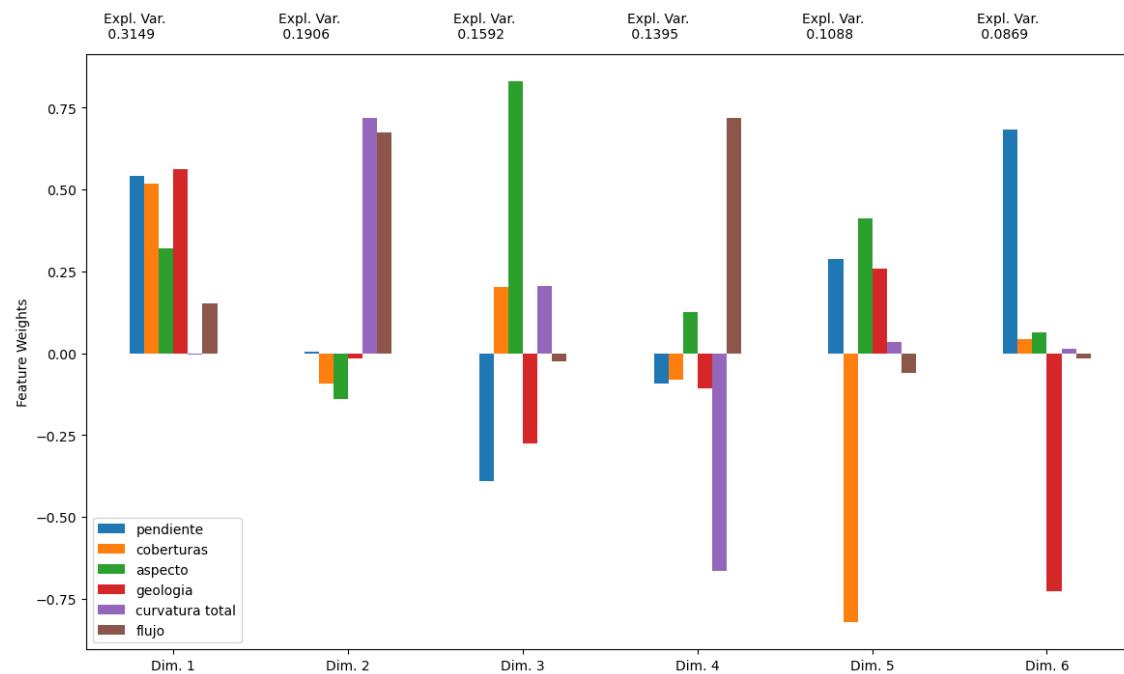


Figura 19: PCA

Como se observa en el gráfico hay 4 variables principales que aportan al componente principal 1 que son pendiente, geología, cobertura y aspecto, pero en el componente principal 2 el mayor aporte lo da la curvatura total, analizando el resto de componentes se puede indicar que las variables mas representativas son geología, pendiente, flujo acumulado y curvatura total. Si además de esto tenemos en cuenta los análisis anteriores estas variables cambian respecto a la ocurrencia de movimientos en masa además de tener una variabilidad suficiente para un buen estudio y no se correlacionan unas con otras.

A continuación se trafican las variables elegidas para las modelaciones futuras.

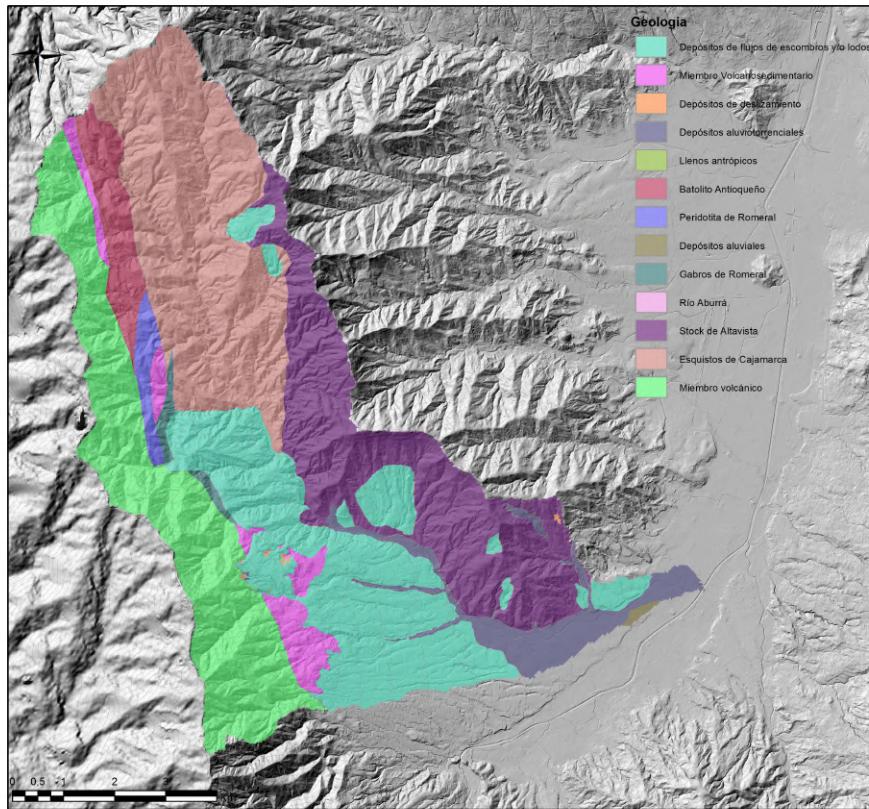


Figura 20: Geología

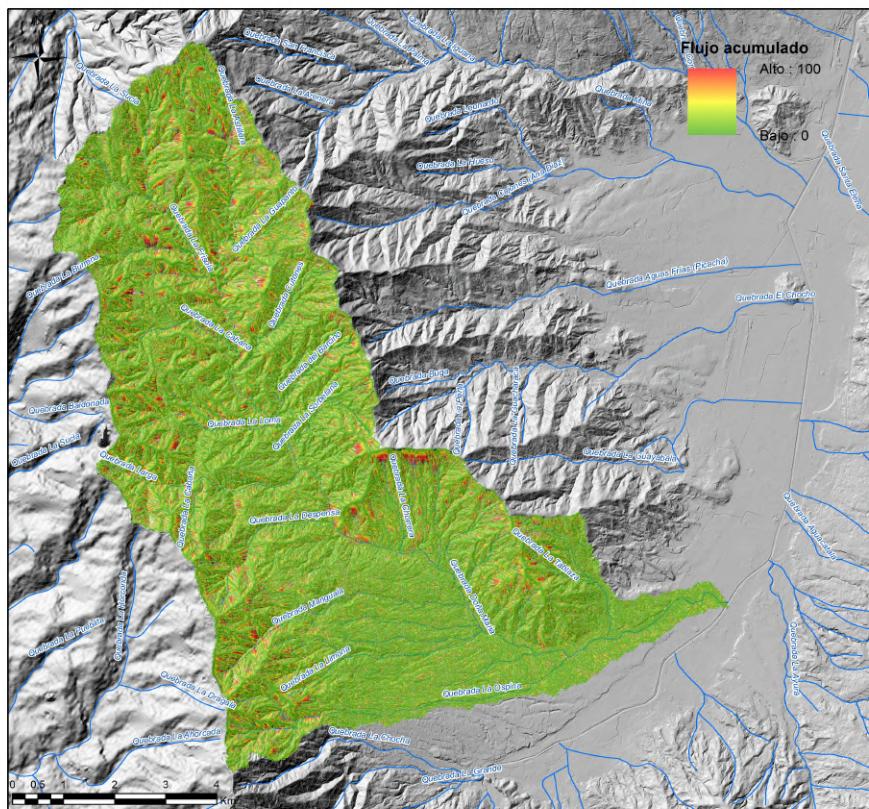


Figura 21: Flujo acumulado

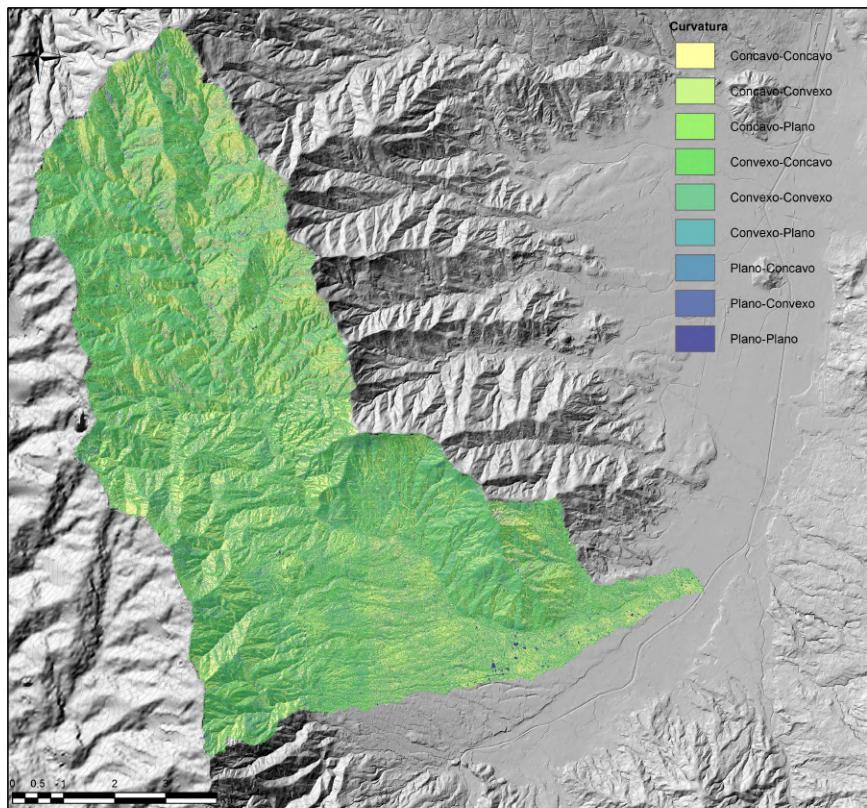


Figura 22: Curvatura

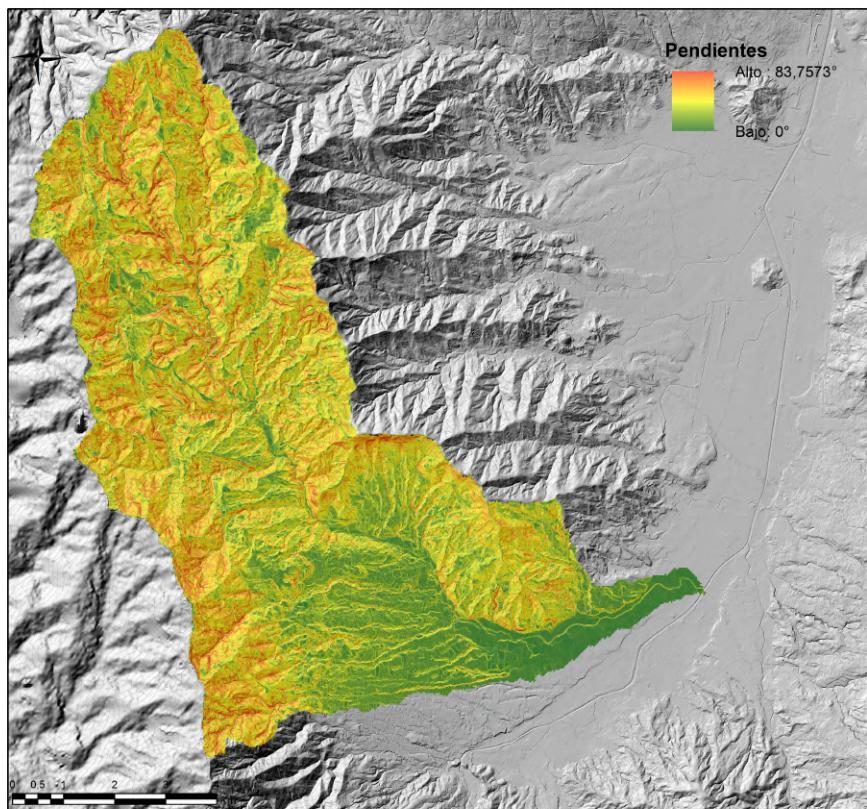


Figura 23: Pendientes

6. Método heurístico

Para este trabajo se utilizo como método heurístico un método de decisión multicriterio específicamente un análisis jerárquico de procesos (AHP) formulado por Satty en la década de los 60, consta de generar una matriz con las variables y comparar par con par la importancia relativa de una frente a la otra dando escalas de 1 a 9, 1 siendo igual de importante y 9 siendo extremadamente mas importante, para valores de $1/3$ a $1/9$ se utilizan para referirse a que una variable es menos importante que otra. Las variables usadas son las definitivas para este trabajo, pendiente, geología, curvatura total y flujo acumulado.

	Pendiente	Geología	Curvatura	Flujo
Pendiente	1.00	3.00	5.00	7.00
Geología	0.33	1.00	3.00	5.00
Curvatura	0.20	0.33	1.00	3.00
Flujo	0.14	0.20	0.33	1.00

Cuadro 11: Cuadro de comparacion AHP

Calculando los vectores y valores propios de la matriz y normalizando el vector con mayor valor propio obtenemos los pesos de cada variable de forma sistemática dando como resultado. Pendiente= 0.55, Geología= 0.26, Curvatura= 0.12, Flujo acumulado= 0.07.

Para cada variable es necesario generar unas clases y darle pesos a estas, el numero de clases debe ser igual ya que estas representaran el dominio del mapa final, usando criterio de experto se generaron para cada variable de la siguiente forma, 0 significa susceptibilidad muy baja, 0.25 susceptibilidad baja, 0.5 susceptibilidad media, 0.75 susceptibilidad alta y 1 susceptibilidad muy alta. Las clases para las variables quedaron de la siguiente forma:

Rango	Categoría	Valor
0-10	Muy baja	0
10-15	baja	0.25
15-25	Media	0.5
25-35	Alta	0.75
≥ 35	Muy alta	1

Cuadro 12: Categorías pendientes

Rango	Categoría	Valor
6, 9 y 10	Muy baja	0
11 y 13	baja	0.25
12, 2 y 7	Media	0.5
4, 8 y 5	Alta	0.75
1 y 3	Muy alta	1

Cuadro 13: Categorías geología

Rango	Categoría	Valor
6 y 9	Muy baja	0
1 y 5	baja	0.25
3 y 4	Media	0.5
7 y 8	Alta	0.75
2	Muy alta	1

Cuadro 14: Categorías curvatura

Rango	Categoría	Valor
0-5	Muy baja	0
5-10	baja	0.25
10-20	Media	0.5
20-30	Alta	0.75
30-100	Muy alta	1

Cuadro 15: Categorías flujo acumulado

Ahora aplicando una función básica de método heurístico con los pesos obtenidos anteriormente podemos generar un mapa de susceptibilidad básico.

$$0,55 \cdot Pendiente + 0,26 \cdot Geología + 0,12 \cdot Curvatura + 0,07 \cdot Flujo Acumulado$$

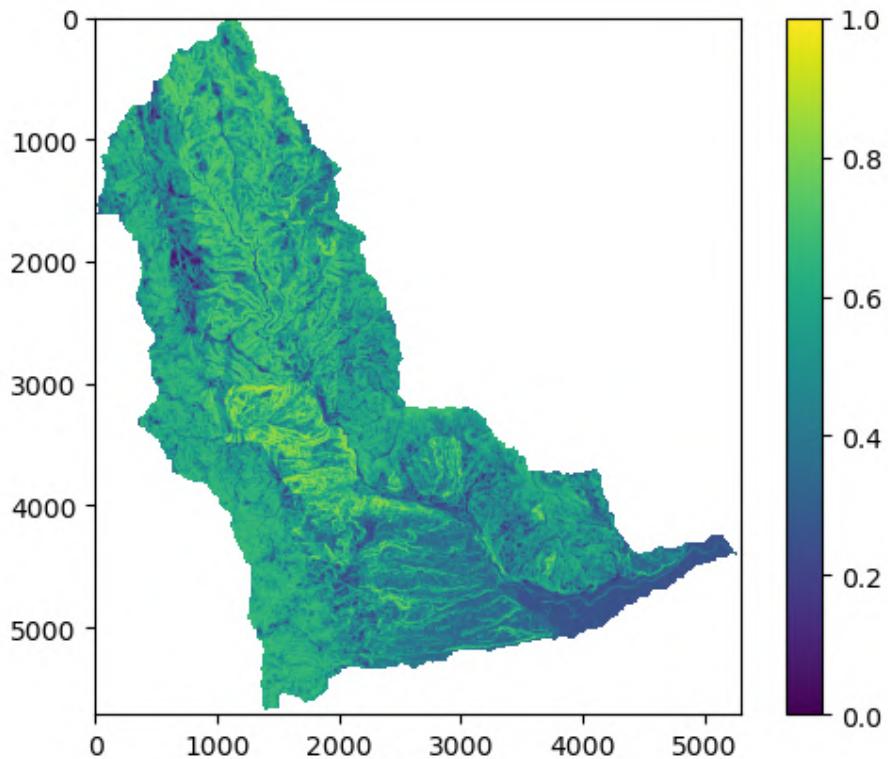


Figura 24: Susceptibilidad método heurístico en python

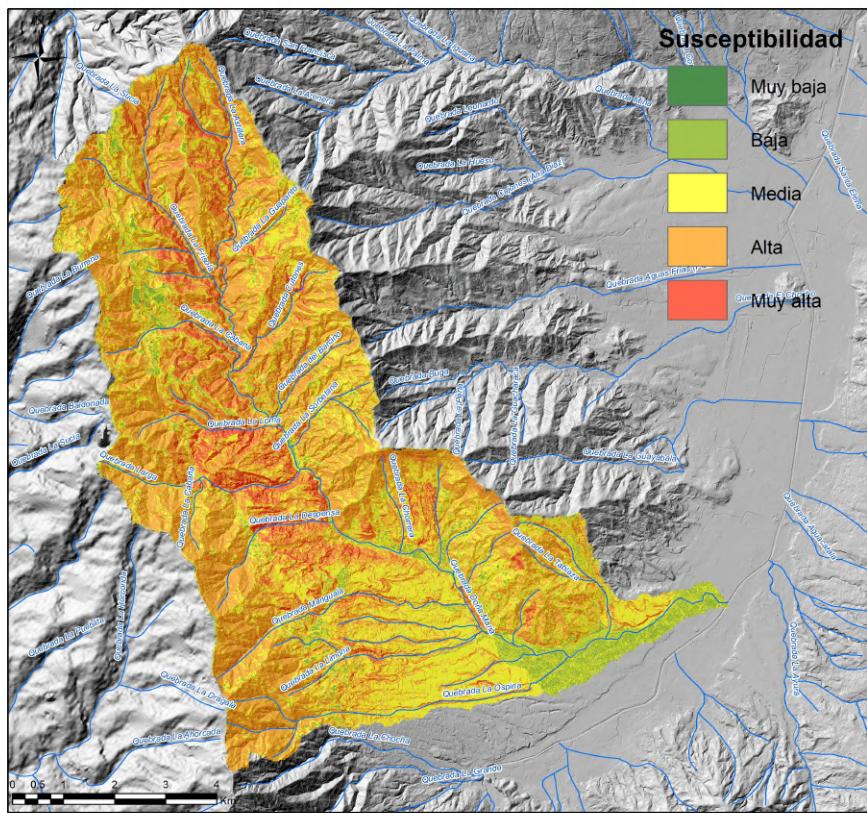


Figura 25: Susceptibilidad método heurístico

7. Métodos bivariados

Los métodos bivariados son métodos basados en datos que analizan el comportamiento de las variables con y sin movimientos en masa, pudiendo de esta forma generar unas variables clasificadas según su relación a los movimientos en masa las cuales luego se suman y se obtiene un mapa de susceptibilidad.

Existen varios métodos bivariados como: Frequency ratio model, Statistical index model, Peso de la evidencia, Evidential Belief Function y Certainty Factor. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas, su uso se dispone del autor dependiendo de sus necesidades.

En este caso al ser uno de los modelos mas usados y el recomendado por el servicio geológico Colombiano (SGC) se hará la practica de usar el modelo peso de la evidencia.

Para esto calculamos los pesos positivos y negativos de cada clase para cada variable, usando la formula:

$$W^+ = \frac{\frac{N_{pix1}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix3}}{N_{pix3} + N_{pix4}}} \text{ y } W^- = \frac{\frac{N_{pix2}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}}}$$

Donde N_{pix1} es el numero de píxeles con movimientos en masa N_{pix2} numero píxeles con movimientos en masa que no son de la clase, N_{pix3} numero de píxeles sin movimientos en masa que son de la clase y N_{pix4} numero de píxeles sin movimientos que no son de la clase. Los valores positivos de W^+ indica que la presencia de la clase favorece la ocurrencia de movimientos y los valores negativos indica que la ausencia de la clase favorece la ocurrencia de movimientos mientras que los valores positivos de W^- indica que la presencia de la clase no favorece la ocurrencia de movimientos y valores negativos indica que la ausencia de la clase no favorece la ocurrencia de movimientos. Por ultimo se calcula el contraste que sera la resta entre W^+ y W^- , este contraste se graficara para cada variable es decir que las clases de las variables pasaran a ser el contraste resultado. Este procedimiento se realiza con todas las variables para el final sumarlas todas y generar un mapa de susceptibilidad.

A continuación se presentan los mapas de las variables clasificadas con el contraste.

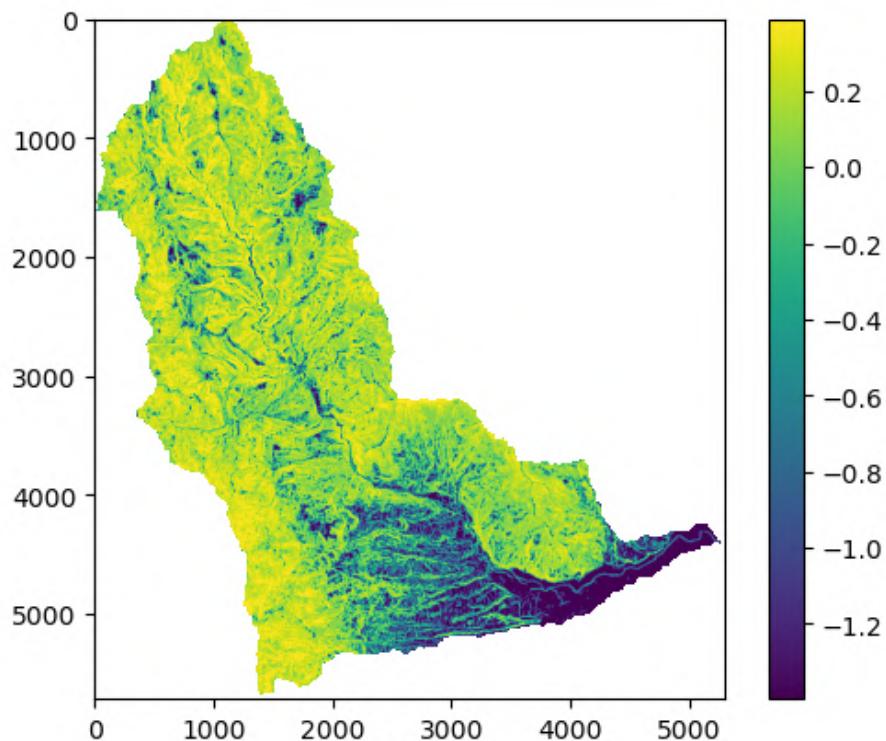


Figura 26: Variable pendiente clasificada

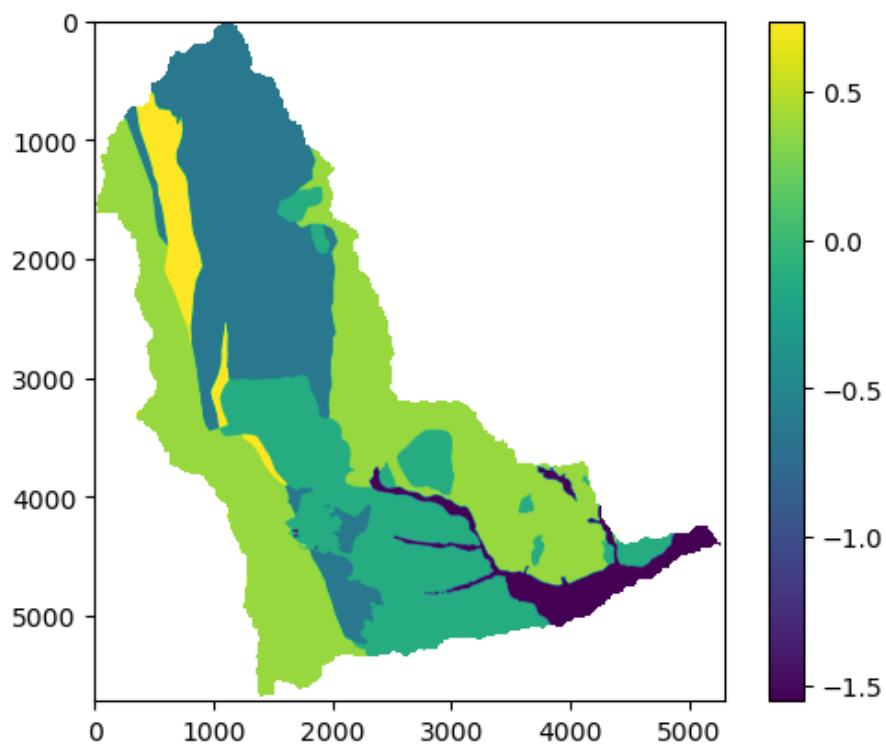


Figura 27: Variable geología clasificada

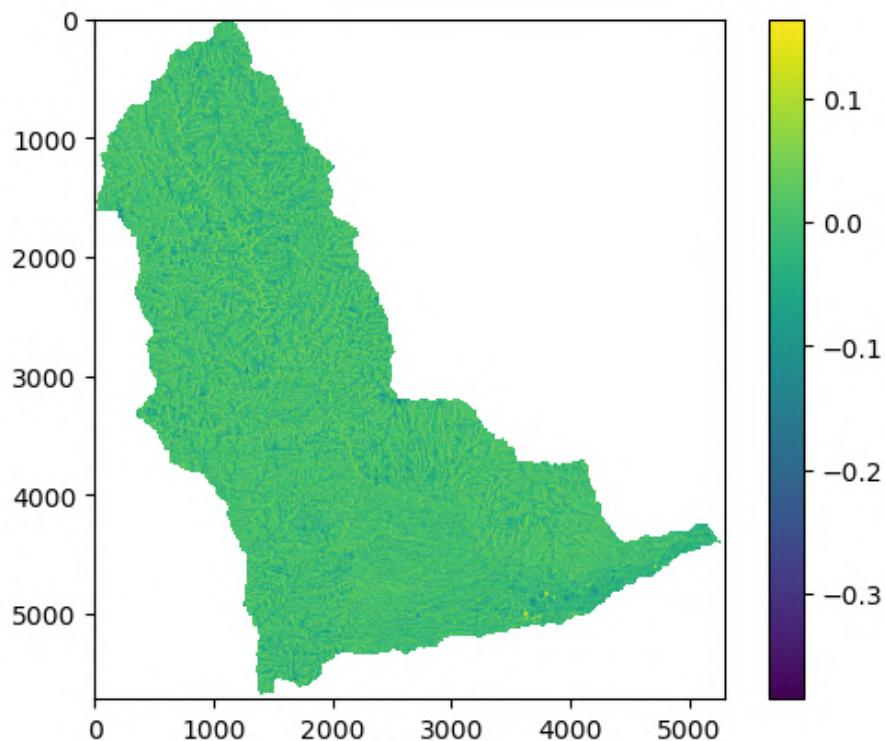


Figura 28: Variable curvatura total clasificada

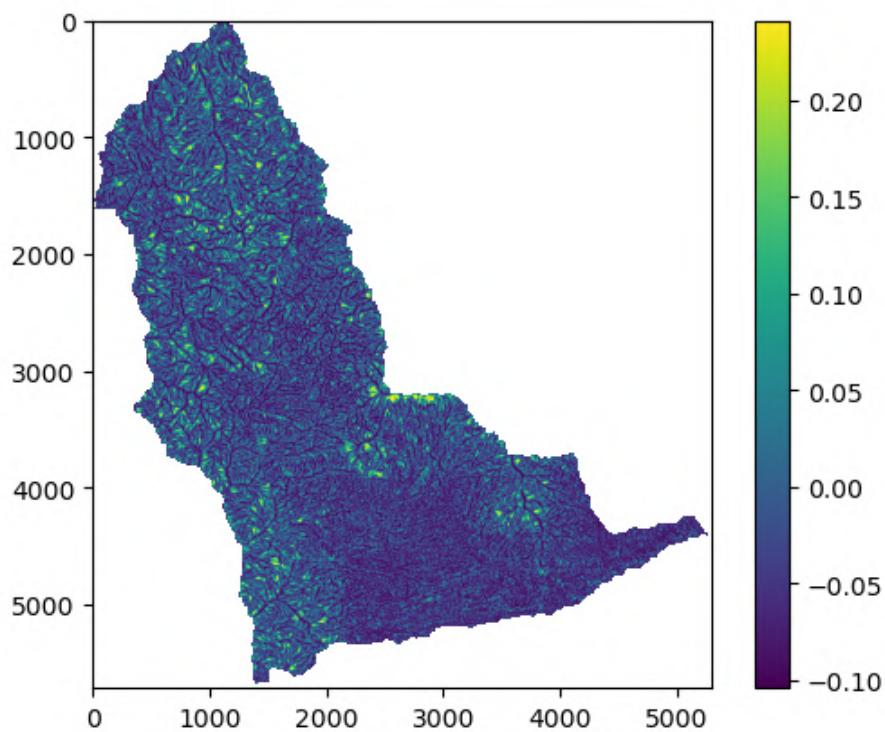


Figura 29: Variable flujo acumulado clasificado

El mapa de susceptibilidad generado fue:

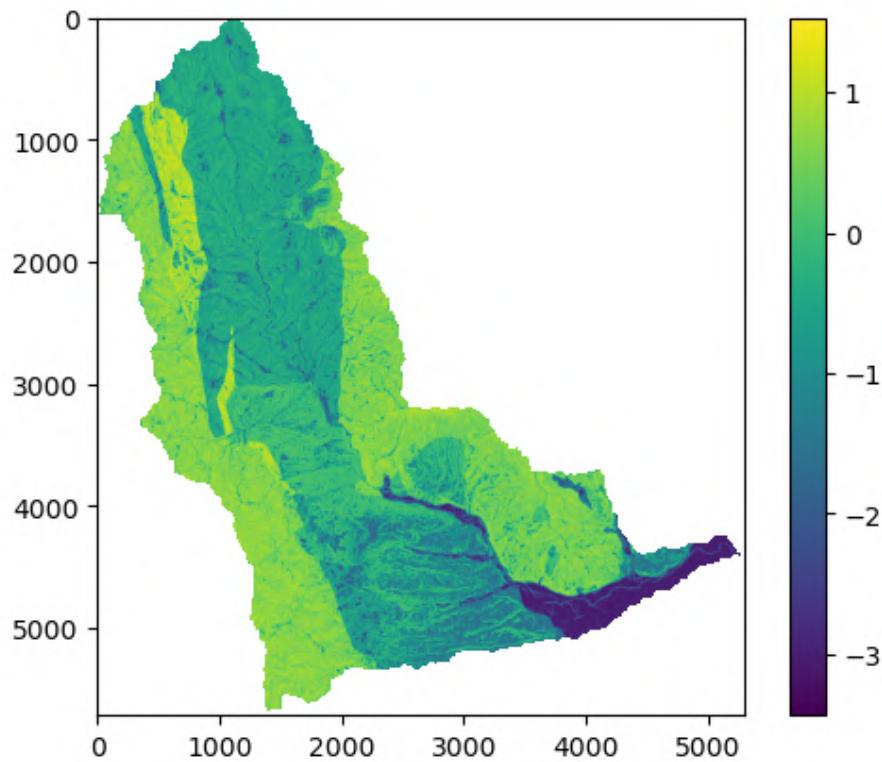


Figura 30: Susceptibilidad bi-varada generada por python

Se puede hacer una clasificación resultando la variable susceptibilidad en una variable categorica de 5 clases.

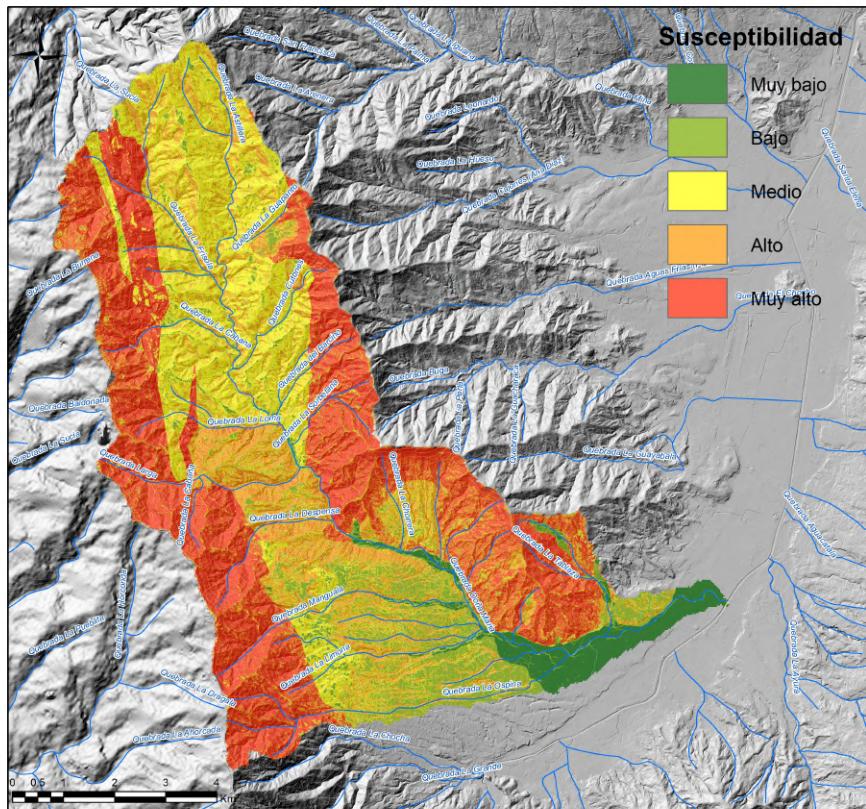


Figura 31: Susceptibilidad bi-variada clasificada

8. Métodos multivariados

Los métodos multivariados evalúan la variable de movimientos en masa cono todas las variables independientes al tiempo, dando pesos a cada una de estas y teniendo en cuenta el area ocupada por las variables, son metodos completamente estadísticos y existen una gran variedad de estos con diferentes usos.

8.1. Método de regresión logística

Resumiendo el método de regresión logística este toma cada celda y evalúa la posibilidad que una celda sea inestable osea tenga un valor de 1, esta evaluación toma en cuneta todas las variable y los pesos de estas que se calculan teniendo en cuenta el área ocupada por estos y la variabilidad del mismo. Para este caso utilizamos las variable Geología, Pendiente, Flujo acumulado y curvatura total, para las variables geología y curvatura total se tuvo que convertirlas en variables Dummys ya que aunque estos métodos permiten trabajar con variables categóricas se necesita de un tratamiento previo de separar la variable en todas sus clases.

Hecho esto se procede con el calculo del modelo el cual se debe correr con los vectores completos es decir sin Nans, se corrigen los vectores y podemos generar los pesos y evaluar el modelo con estos la matriz origen de fusionar cada vector. Como resultado se obtiene un mapa de susceptibilidad el cual no se necesito de criterio de experto para generarlo ya que todo lo hizo el modelo.

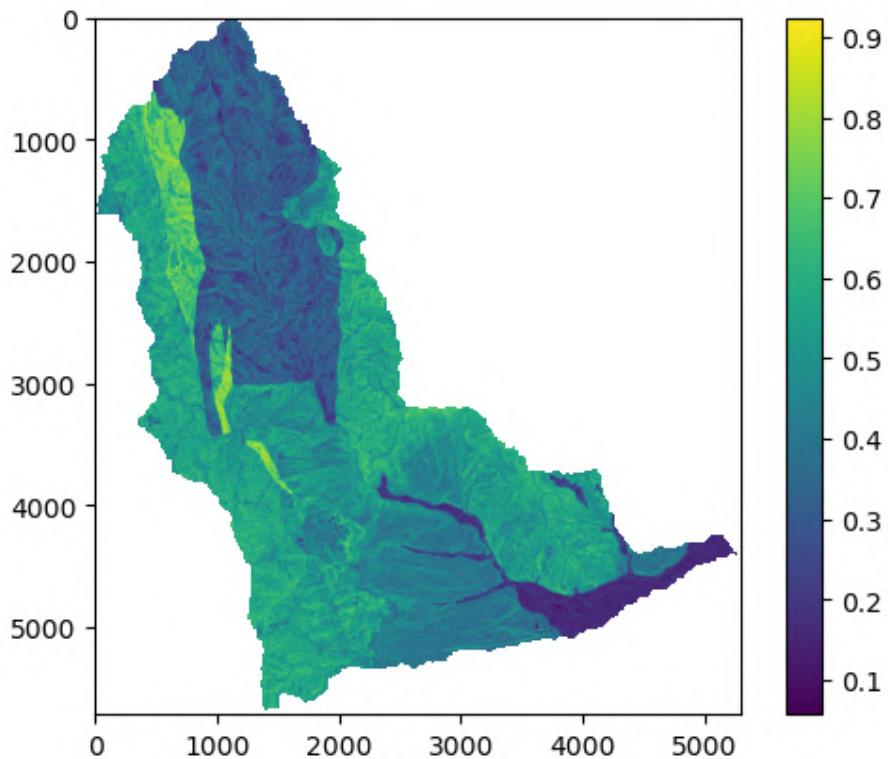


Figura 32: Susceptibilidad regresión logística generado por python

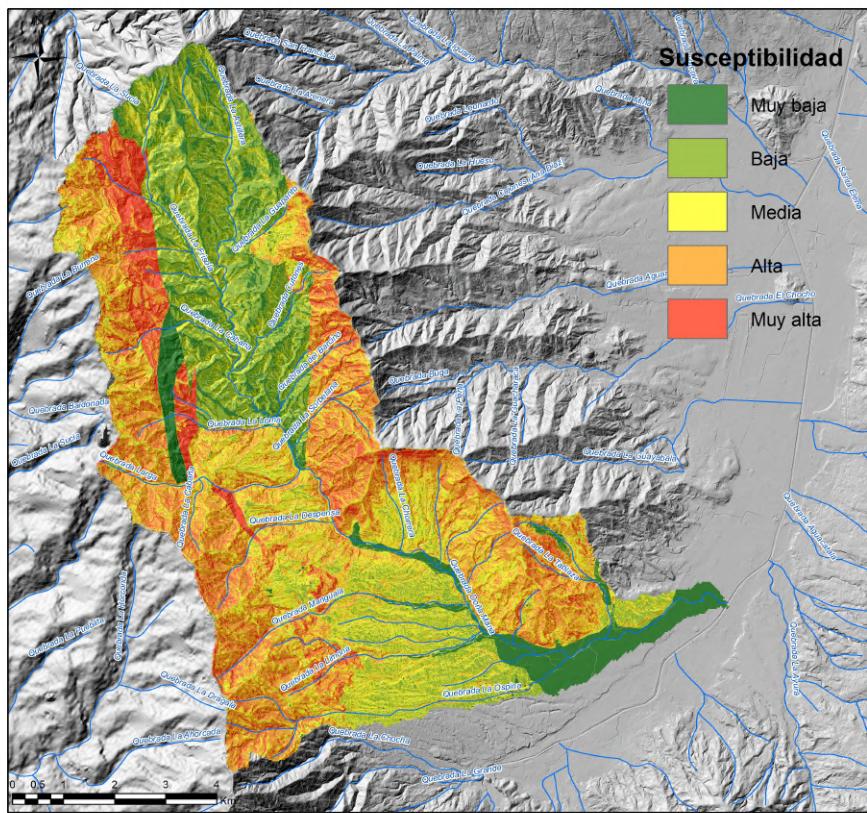


Figura 33: Susceptibilidad regresión logística clasificada

8.2. Redes neuronales

El método de redes neuronales funciona como la construcción de un cerebro donde cada nodo se conectan entre si, tenemos nodos de salida, de procesamiento y de entrada, en entrada estarian nuestras variables, de procesamiento el modelo y de salida el mapa resultado, para este caso utilizamos MLP (Multi Multi-layer Perceptron classifier por sus siglas en inglés) el cual es una aproximación básica de la librería sklearn. Para este caso se utilizaron 3 capas ocultas con x nodos.

Como resultado obtenemos un mapa de la siguiente forma

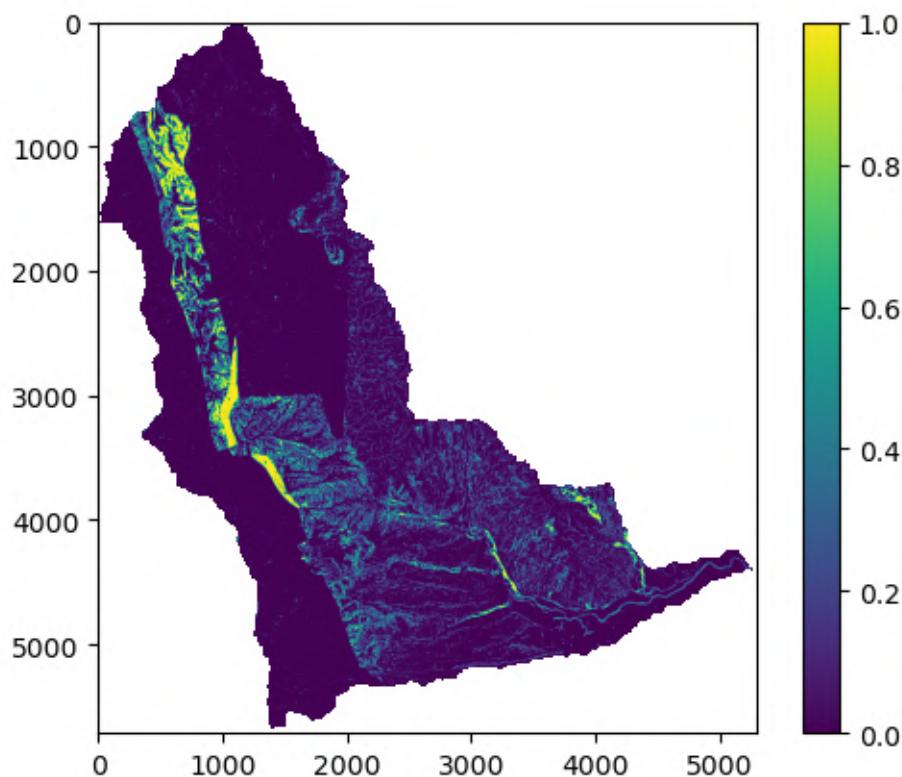


Figura 34: Susceptibilidad Redes neuronales generada por python

9. Evaluación del modelo

Debido a la variada de modelos que tenemos es necesario conocer la eficacia de cada uno para elegir un modelo final del cual extraer nuestro mapa de susceptibilidad o amenaza definitivo, para esto se utiliza una evaluación por desempeño y predicción usando curvas ROC y matrices de confusión. Esta evaluación se uso para modelos multivariados tales como regresión logística y redes neuronales ya que otros métodos como heurísticos o bivariados al no utilizar como

variable los movimientos del inventario no se considera que se acerquen a una aproximación real.

Como resultado se obtuvieron las siguientes gráficas para cada modelo, donde se muestra la eficiencia de desempeño y capacidad de predicción.

Regresión logística

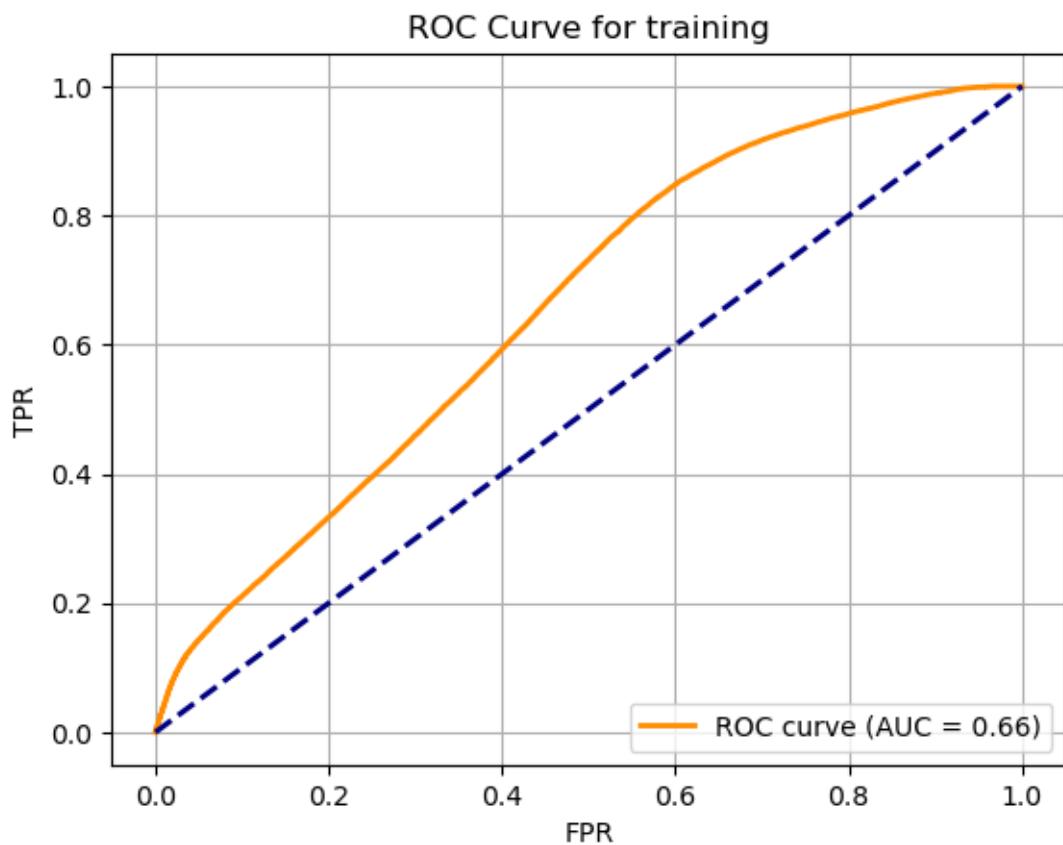


Figura 35: Curva ROC de desempeño

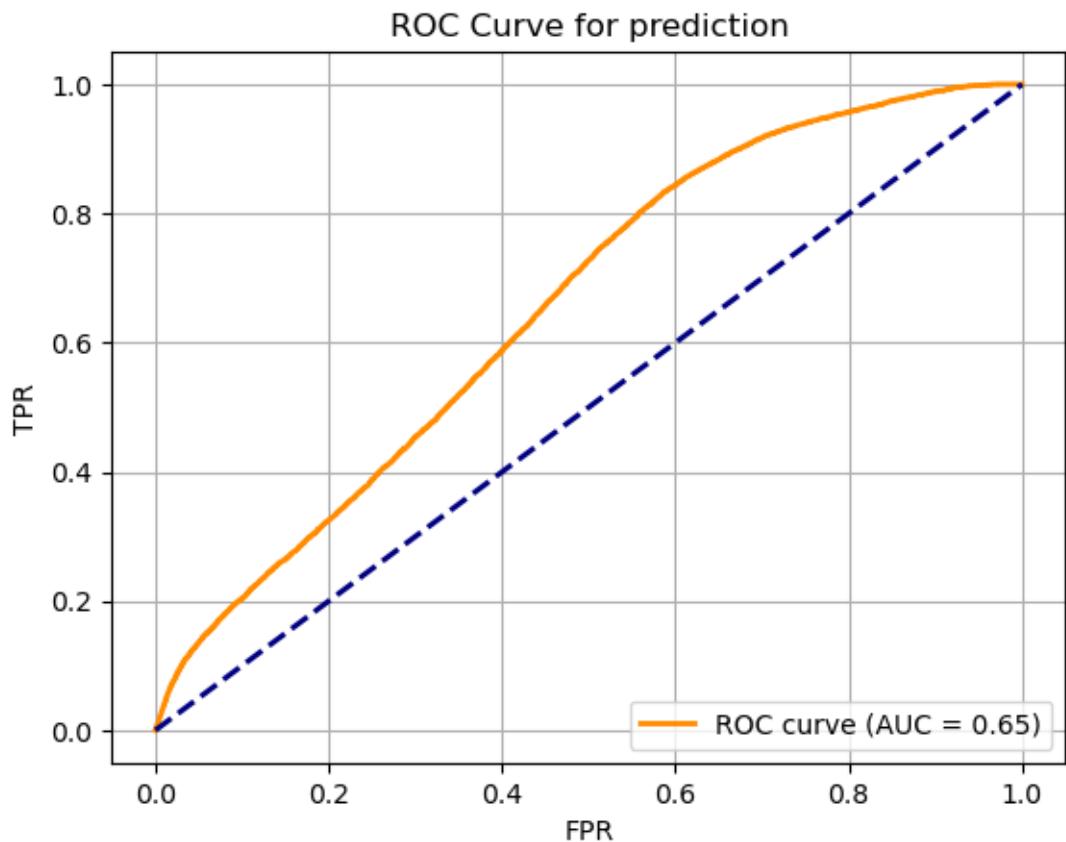


Figura 36: Curva ROC de capacidad de predicción

Redes neuronales

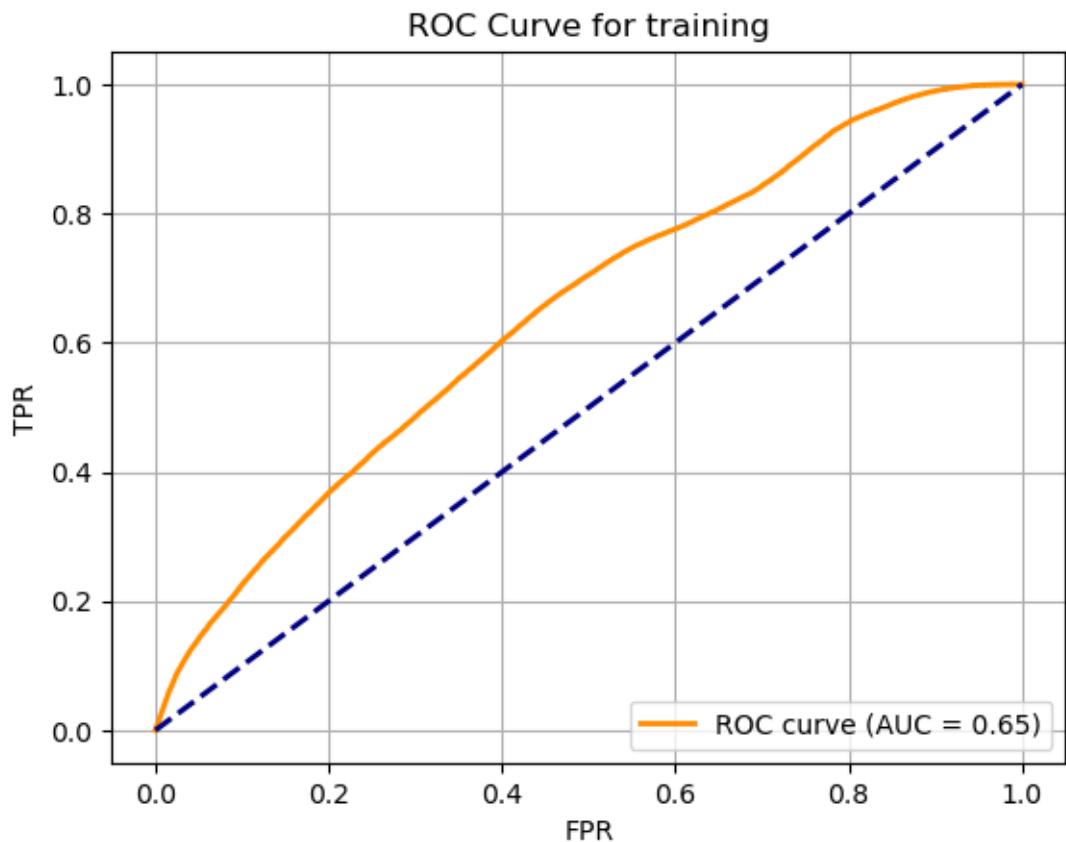


Figura 37: Curva ROC de desempeño

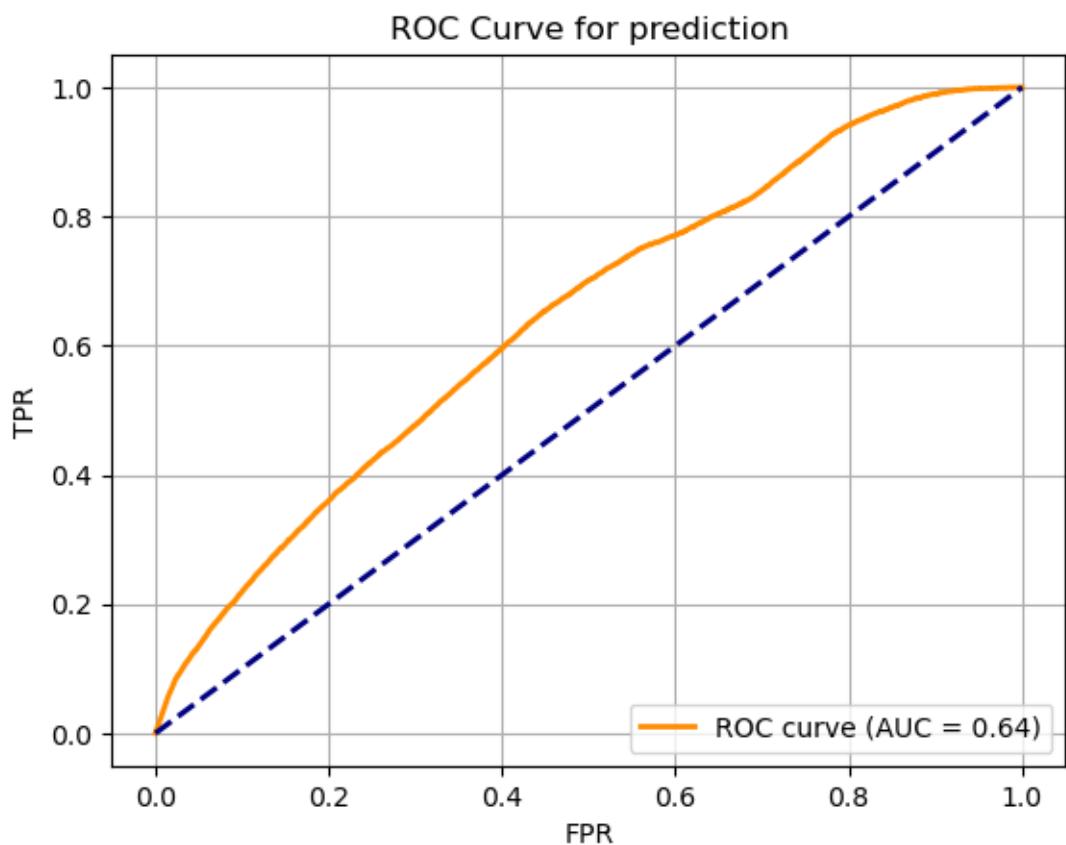


Figura 38: Curva ROC de capacidad de predicción

Observando los resultados obtenidos podemos concluir que ambos modelos son aceptables dentro del rango de alcance de este trabajo, aun así hay una clara superioridad del modelo con redes neuronales frente al de regresión logística por ende este sera nuestro modelo con el cual generaremos nuestro mapa de susceptibilidad final.

Usando como criterio del SGC, el cual nos menciona que susceptibilidad alta es donde se encuentran el 80 % de los movimientos en masa, media el 18% y baja el 2% Y usando la curva ROC para hayar los valores necesarios tenemos que la susceptibilidad alta es aquella ≥ 0.45 , media $\geq 0.16 < 0.45$ y baja < 0.16 . El mapa generado queda de la siguiente forma.

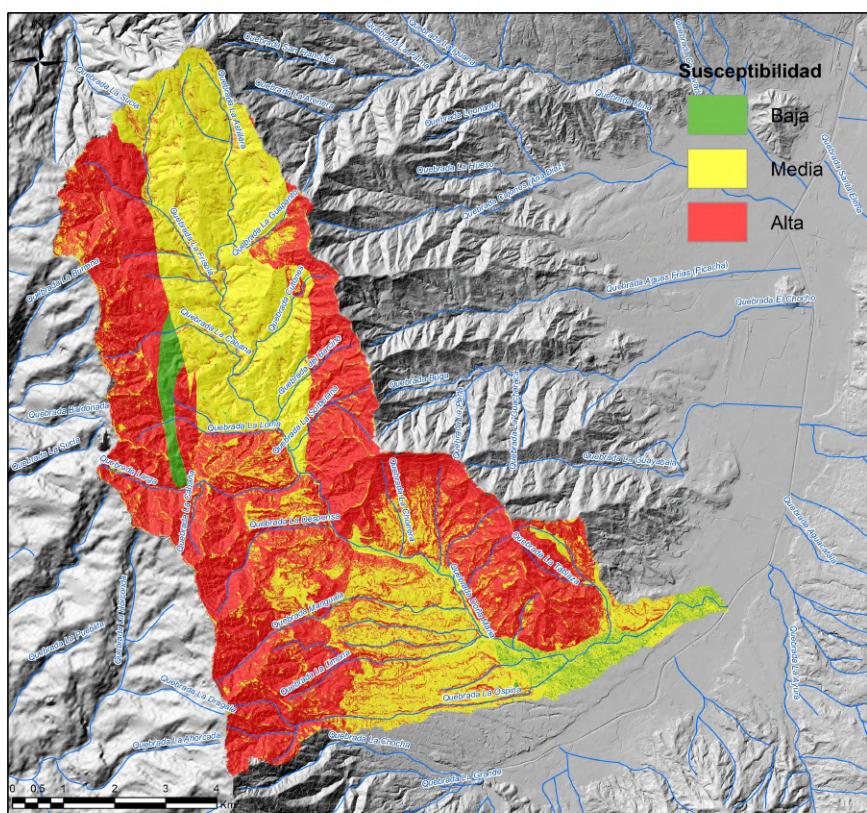


Figura 39: Mapa de susceptibilidad cuenca la Doña Maria