

4.5 IMPORTANCIA DE VARIABLES EN EL MODELO

Luego de entrenar los modelos de BODY y LIP, es posible identificar cuales variables tienen más importancia sobre otras para definir la probabilidad de presencia o ausencia de un movimiento en masa. Dado que se realiza 10 iteraciones en cada modelo para evaluar la precisión de estos, se obtuvo la media de la importancia de las variables en cada una de las 10 iteraciones, tanto para la modelación de BODY como LIP. Estas fueron analizadas mediante el criterio de la suma residual de cuadrados (RSS).

El RSS permite medir la cantidad de varianza en el conjunto de datos, la cual se calcula como el sumatorio de los cuadrados de la diferencia entre los valores observados de la variable dependiente (valores obtenidos de la realidad), y los valores estimados por el modelo (valores calculados por el modelo) (Milborrow, 2021). Conforme a las notas del código *earth* (Milborrow, 2021), para este criterio primero se calcula la disminución en el RSS para cada subconjunto en relación con el subconjunto anterior (es decir, compara los resultados entre 2 iteraciones sucesivas); luego, para cada variable, suma estas disminuciones de los subconjuntos generales que incluyen la variable; finalmente, para facilitar la interpretación, las disminuciones sumadas se normalizan de modo que la disminución sumada más grande sea 100, por lo cual, las variables que causan disminuciones netas más grandes en el RSS se consideran más importantes. Según este parámetro, las tres variables más importantes para el modelo que usa todo el polígono del deslizamiento (BODY), son la pendiente (SLP) con un valor de 100, la elevación (DEM) con un valor de 60 y la clasificación de las formas del terreno (LCL), específicamente en la categoría 5 (laderas abiertas) con un valor de 40, (Figura 53). Mientras que las tres variables más importantes para el modelo que usa solo el punto más elevado que identifica el deslizamiento (LIP), son la pendiente (SLP) con un valor de 100, la elevación (DEM) con un valor de 40 y la orientación Eastness (E) con un valor de 25 (Figura 54).

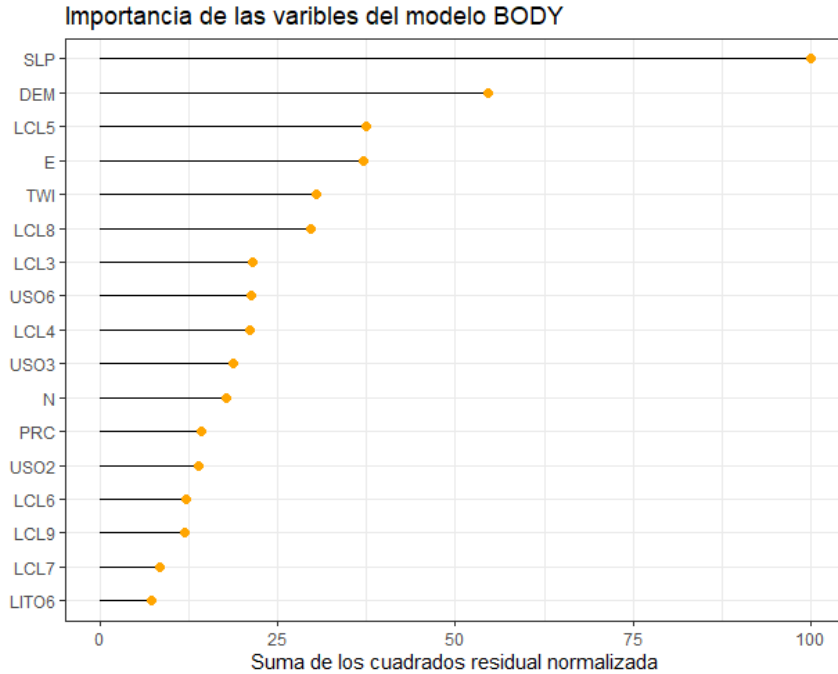


Figura 53 Media de la importancia de las variables del modelo BODY.

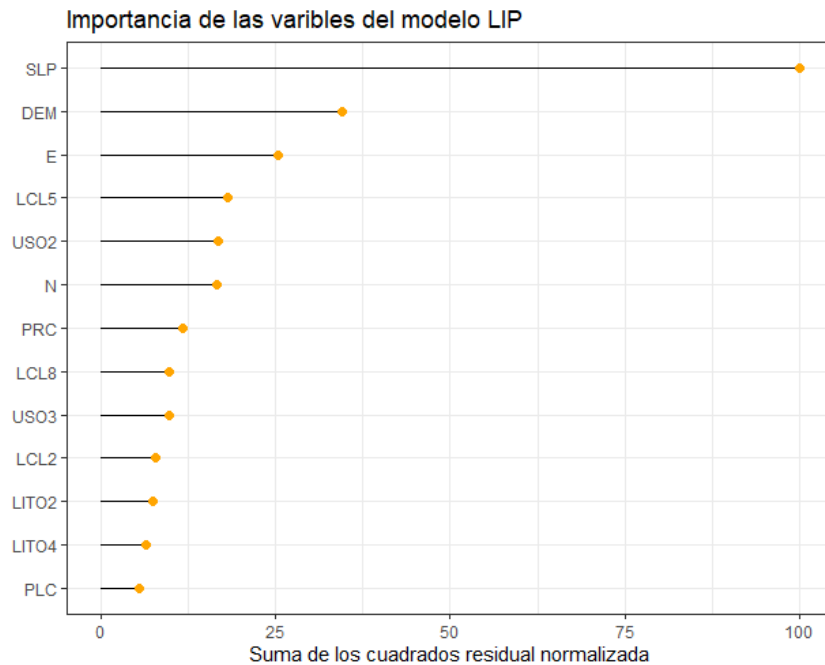


Figura 54 Media de la importancia de las variables del modelo LIP.

También es posible observar las características más importantes de cada variable por medio de las gráficas de la probabilidad residual de las mismas dentro de las cuales se compara los valores de cada variable respecto a la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos (Figura 53, Figura 54).

En el caso del modelo BODY, la Figura 55 muestra los valores de cada variable con respecto a la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa para las 8 (DEM, USO, PRC, SLP, LCL, TWI, N y E) de las 10 variables independientes utilizadas. En el caso de la variable de elevación (DEM) los valores superiores a 500 y menores de 700 indican una mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. En el uso del suelo (USO) la categoría 2 (cultivos permanentes) es una indicadora de mayor probabilidad de movimientos en masa, mientras que la categoría 6 (mosaico de cultivos y pastos) indica una baja probabilidad de estos. Para la curvatura de perfil (PRC), los valores negativos son fuertes indicadores de ocurrencia de deslizamientos, mientras que para la pendiente (SLP) son los valores superiores a 40 grados. En el caso de la clasificación de las formas del terreno (LCL) las categorías 0 (drenajes), 1 (drenajes de mitad de ladera), 2 (drenajes de cabecera), 6 (parte superior de ladera), 7 (crestas locales) y 8 (crestas de mitad de ladera) indican una alta probabilidad de presencia de deslizamientos en estas áreas; mientras que un fuerte indicador de lo contrario es la clase 4 (planicies). Con la variable del índice de humedad (TWI) los valores superiores a 10 indican alta probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, así como con la variable Eastness (E) cuando hay valores positivos y cercanos a 1. Por último, con la variable Northness (N) la probabilidad de ocurrencia aumenta hacia valores positivos, pero decae fuertemente en valores cercanos a 1. (Figura 55).

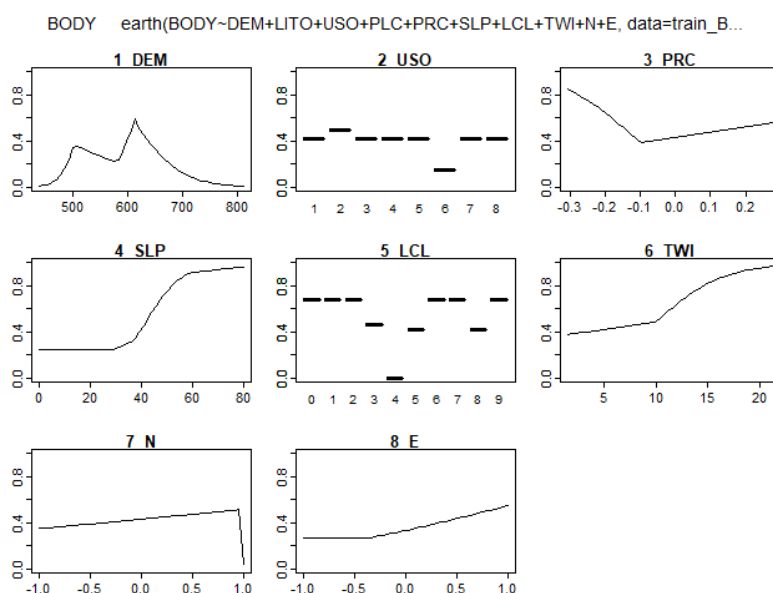


Figura 55 Predictores categóricos y continuos del modelo BODY

En cuanto a las variables utilizadas para el modelo LIP, la Figura 56 presenta los gráficos de 8 variables independientes (DEM, USO, PRC, SLP, LCL, TWI, N y E) de las 10 usadas. Para la variable de elevación (DEM) valores entre 600 msnm y 700 msnm indican una alta probabilidad de deslizamiento, sobre todo en valores cercanos a 600. Para la variable de uso del suelo (USO) las categorías 2 (cultivos permanentes) y 3 (granos básicos) representan mayor probabilidad de movimientos en masa. Para la curvatura en planta (PLC) los valores de cero indican alta probabilidad de deslizamientos, y para la curvatura de perfil los valores menores a -0.2 y mayores a 0.1, indican una elevada probabilidad de movimientos en masa. Por otra parte, la variable de pendiente (SLP) con valores superiores a 40 grados permiten identificar una ocurrencia mayor de deslizamientos. Sin embargo, para la variable de clasificación de formas del terreno (LCL) casi todas las clases son significativas para la presencia de deslizamientos, y las poco significativas son la categoría 5 (laderas abiertas) y 8 (crestas de mitad de ladera). Por último, tanto en el Northness (N) y Eastness (E) cuanto más positivos sean los valores, mayor es la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa. (Figura 56).

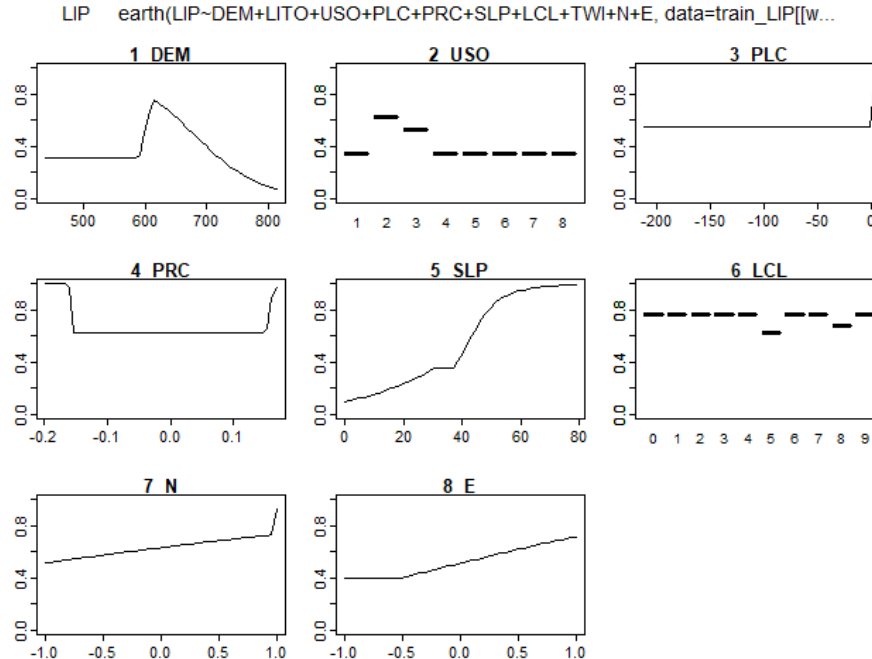


Figura 56 Predictores categóricos y continuos del modelo LIP

4.6 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Para evaluar la exactitud de los modelos entrenados para BODY y LIP se obtiene de cada uno las curvas de características operativas del receptor (*receiver operating characteristic curves* - ROC). En estas se identifican todos los posibles valores límite (*cut-off values*) de la tasa de los verdaderos positivos (sensibilidad) respecto a la tasa de los falsos positivos (1-especificidad). En ambas gráficas el área bajo la curva (AUC) debe ser cercana a 1, donde se esperan altos valores de sensibilidad y casi nulos valores de 1-especificidad, lo que indica una mejor capacidad de discriminación. Entonces las curvas que se acercan a este punto van a tener mayor área bajo su curva con respecto a las que se encuentren más lejanas a este punto ideal.

Del modelo BODY se obtiene una curva ROC para evaluar los datos de entrenamiento (curva roja Figura 57) y otra curva ROC para examinar los datos de evaluación (curva azul Figura 57). El valor del área bajo la curva (AUC) para los datos de entrenamiento es de 0.910 y 0.915 para los datos de validación para el inventario de datos poligonal (modelo BODY).

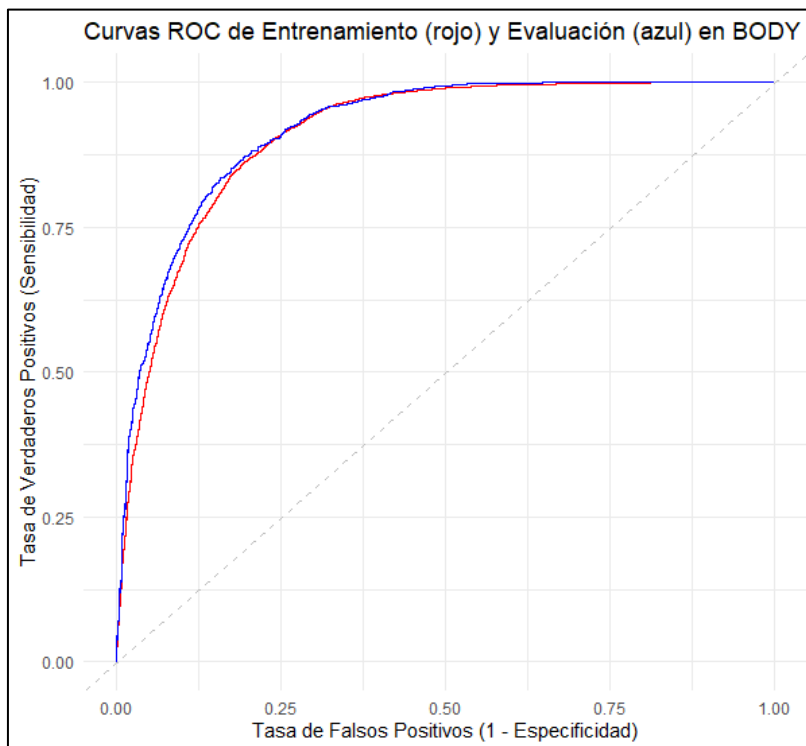


Figura 57 Curva ROC de comparación de resultados obtenidos con el inventario de movimientos en masa poligonales BODY provenientes del corte de entrenamiento (rojo, AUC = 0.9096) y validación (azul, AUC = 0.9146)

Del modelo LIP se obtiene la curva ROC evaluando los datos de entrenamiento (curva roja Figura 58) y la curva ROC evaluando los datos de evaluación (curva azul Figura 58). Los valores del área bajo la curva (AUC) son 0.9285 para los datos de entrenamiento y 0.94 para los datos de validación.

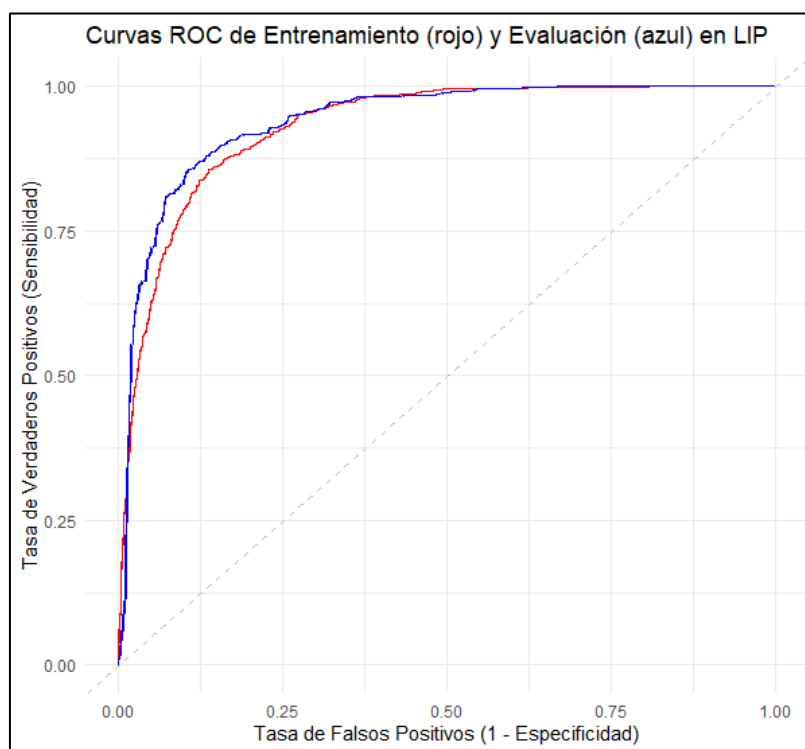


Figura 58 Curva ROC de comparación de resultados obtenidos con el inventario de movimientos en masa LIP provenientes del corte de entrenamiento (rojo, AUC = 0.9285) y validación (azul, AUC = 0.94)

Para determinar la precisión de cada modelo (BODY y LIP), se realizaron 10 repeticiones de estos. De cada modelo obtenido se obtuvo el AUC tanto con los datos de entrenamiento (75%) como con los datos de validación (25%) y para evaluar la precisión de estos se obtuvo la media y la desviación estándar de cada grupo (Cuadro 17).

Iteración	AUC de entrenamiento de BODY	AUC de validación BODY	AUC de entrenamiento de LIP	AUC de validación de LIP
1	0.92	0.913	0.939	0.948
2	0.91	0.915	0.928	0.94
3	0.913	0.913	0.94	0.931
4	0.912	0.91	0.938	0.941

Iteración	AUC de entrenamiento de BODY	AUC de validación BODY	AUC de entrenamiento de LIP	AUC de validación de LIP
5	0.913	0.912	0.934	0.945
6	0.914	0.921	0.938	0.94
7	0.914	0.913	0.934	0.933
8	0.914	0.912	0.936	0.935
9	0.912	0.915	0.935	0.939
10	0.912	0.917	0.937	0.932
MEDIA	0.913	0.914	0.936	0.938
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.002	0.003	0.003	0.005

Cuadro 17 Valor AUC de los datos de entrenamiento y validación de los modelos BODY y LIP

A través del gráfico *Boxplot* (grafico de cajas y bigotes) de la Figura 59 se resume la variación de los valores del AUC para los modelos de BODY y LIP, usando los datos de entrenamiento y validación. En general los resultados de los datos de entrenamiento tanto para BODY y LIP presentan una menor variación en comparación a los resultados de la validación en ambos grupos. Por otra parte, se observa una diferencia entre los valores obtenidos en LIP y BODY, identificando una mejor capacidad de predicción con los modelos de LIP respecto a los de BODY.

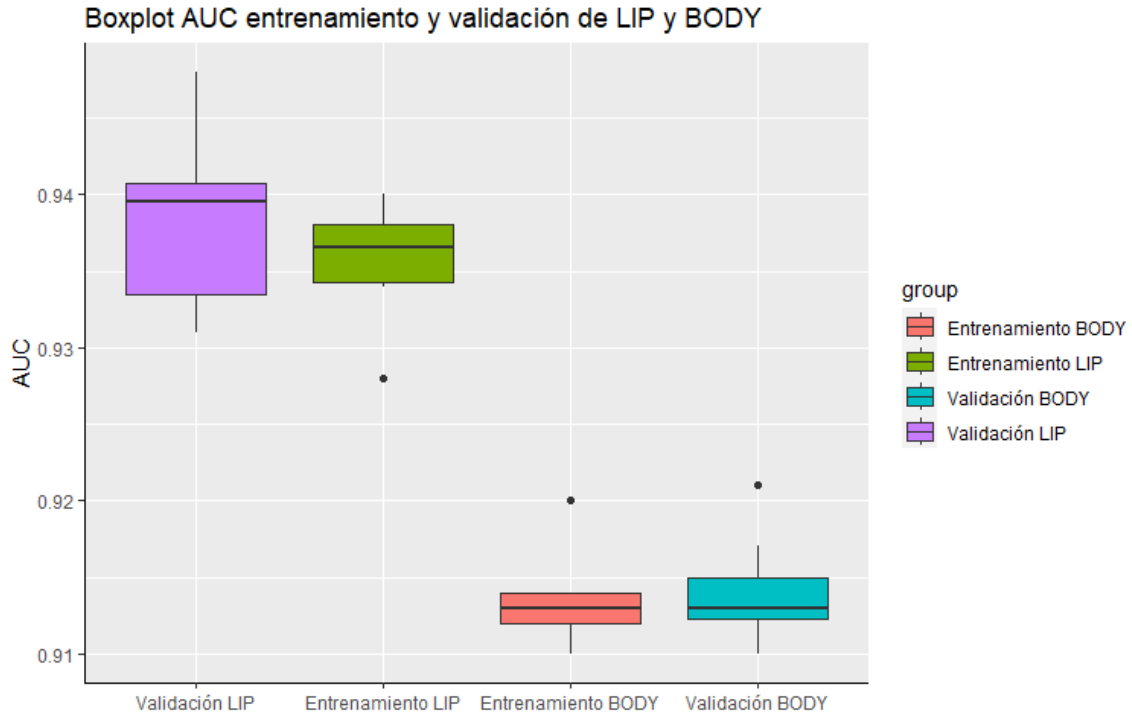


Figura 59 Desempeño de los modelos implementados BODY y LIP

4.7 MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD

Los resultados obtenidos mediante el mapa de susceptibilidad por flujos de detritos para el modelo BODY mostrado en la Figura 60, indican que la probabilidad de ocurrencia mayor a 0.8 concentra el 21.66% del área de estudio donde se tienen dos combinaciones de factores: la primera (con el 10,17% del total del área de estudio compuesta por ambas cuencas), se presenta con la combinación de condiciones locales donde la litología es prevalentemente depósitos volcánicos de la Formación San Salvador, hay presencia de cultivos anuales asociados con cultivos permanentes, para el uso de suelo, pendientes mayores de 50 % y el terreno clasificado como laderas abiertas, mientras que la segunda (con un 11.5% de las unidades de mapeo) se concentran en la combinación de condiciones locales de Formación geológica San Salvador, uso de suelos de granos básicos, pendientes mayores a 50% y formas de relieve de drenajes de mitad de ladera.

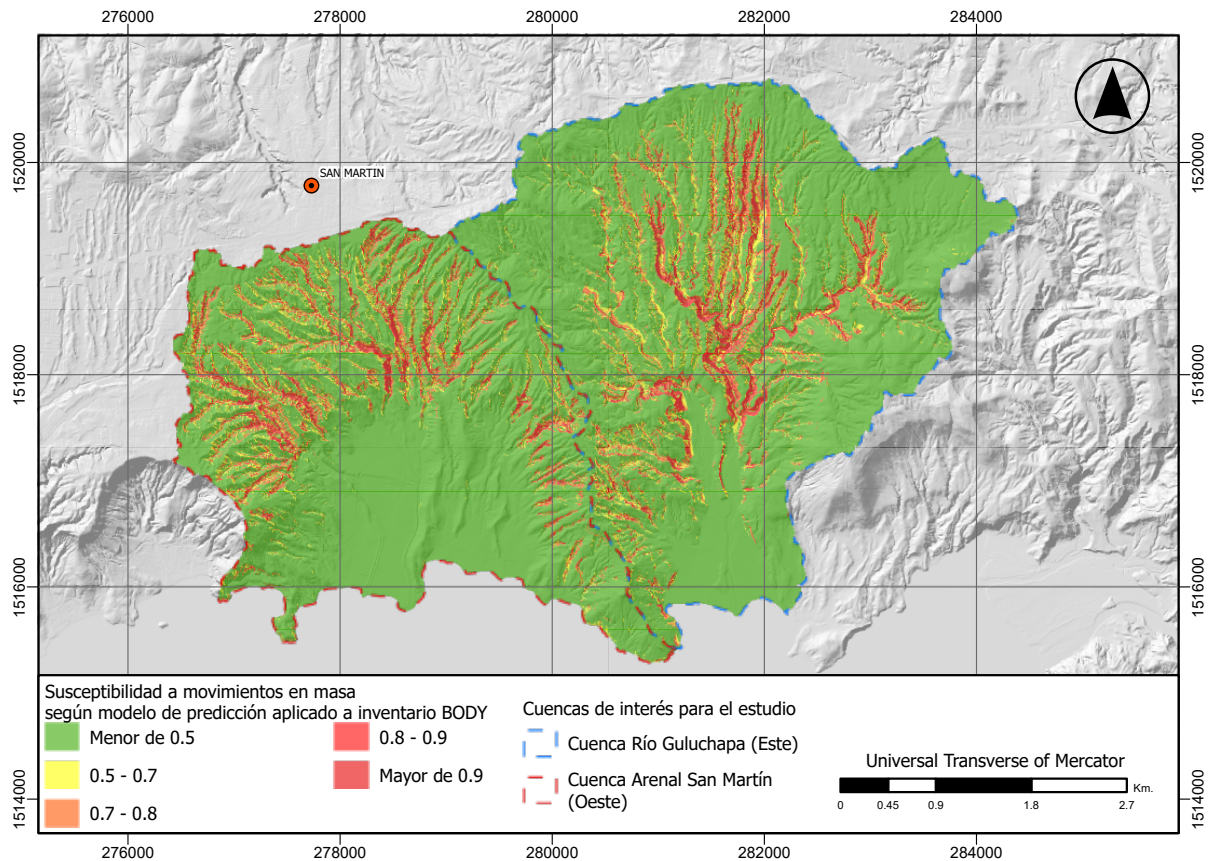


Figura 60 Susceptibilidad a movimientos en masa según modelo de predicción aplicado a inventario BODY

En el caso del mapa de susceptibilidad para el modelo LIP mostrado en la Figura 61, los resultados obtenidos muestran que las unidades de mapeo con susceptibilidad arriba de 0.8 corresponden al 28.32% de las unidades de mapeo del total de la zona de estudio compuesta por la cuenca de la Quebrada El Arenal y la Cuenca Guluchapa. De esta fracción, se tiene la combinación predominante de factores donde las condiciones locales son Formación geológica San Salvador, uso de suelos de cultivos anuales asociados con cultivos permanentes, pendientes mayores de 50 grados y una clasificación de relieve descrita como laderas abiertas, que representan el 17.26 % del total del área de estudio, mientras que el 11.06% complementario se ve reflejado por condiciones locales de Formación geológica San Salvador, uso de suelos de granos básicos, pendientes mayores a 50% y formas de relieve de drenajes de mitad de ladera.

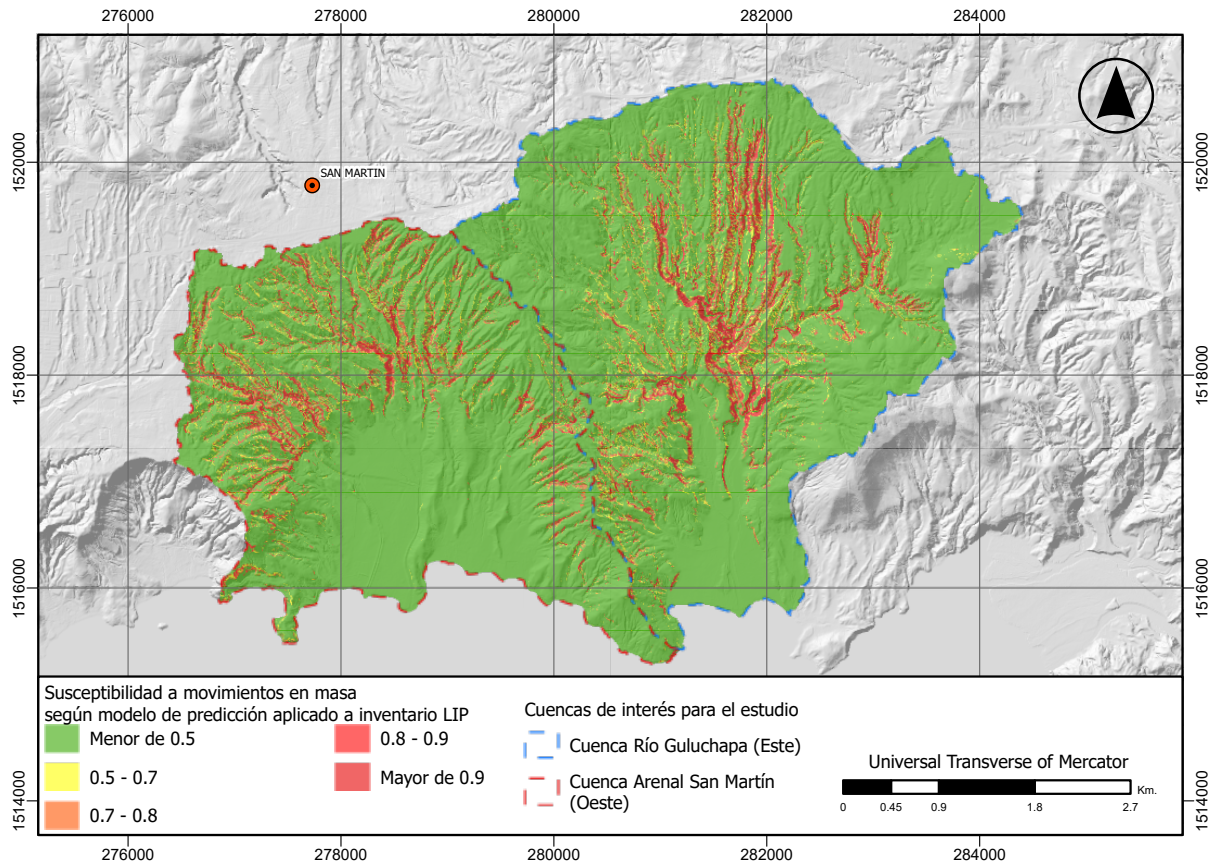


Figura 61 Susceptibilidad a movimientos en masa según modelo de predicción aplicado a inventario de eventos LIP

En la Figura 62 se muestra el mapa de susceptibilidad obtenido mediante el modelo BODY clasificado en “Muy baja”, “Baja”, “Moderada”, “Alta” y “Muy alta”. Esta figura también muestra un acercamiento del mismo mapa con la superposición del inventario utilizado para el modelo BODY de datos de tipo poligonal, haciendo notar el buen funcionamiento para la predicción de la ocurrencia de eventos de movimientos en masa. Por lo tanto, el mapa muestra la buena consistencia entre la elaboración de inventarios de eventos de tipo poligonal (BODY) y la zonificación de áreas de áreas susceptibles a deslizamientos.

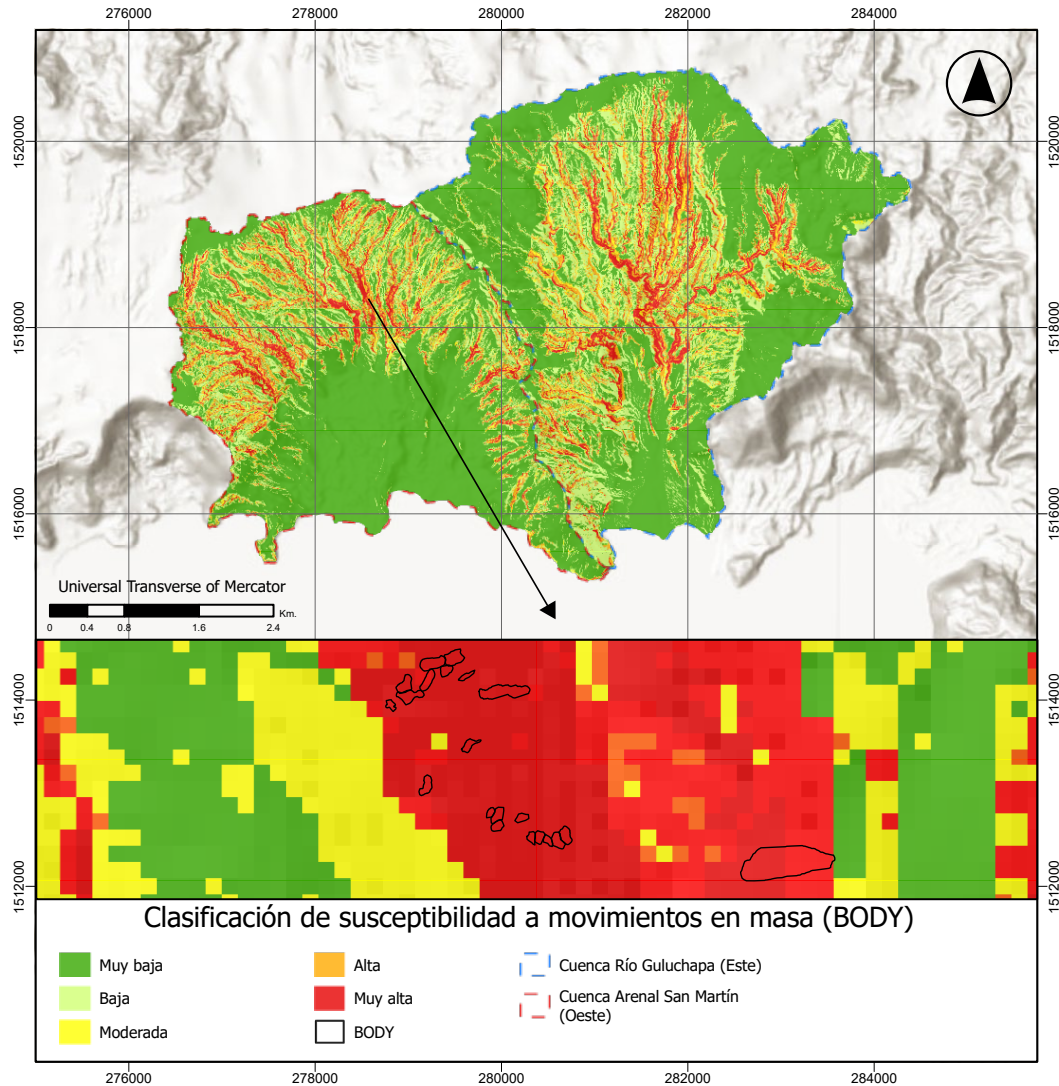


Figura 62 Susceptibilidad a movimientos en masa según modelo de predicción aplicado a inventario de eventos BODY

En la Figura 63 se muestra el mapa de susceptibilidad obtenido mediante el modelo LIP y clasificado en “Muy baja”, “Baja”, “Moderada”, “Alta” y “Muy alta”. En este se realiza un acercamiento a un área del mapa con el fin de evaluar el inventario de LIP con respecto a la susceptibilidad predicha por el modelo LIP. El mapa muestra la buena consistencia entre el inventario LIP y la zonificación de áreas de susceptibilidad ya que coinciden, resaltando la alta capacidad para la predicción de la ocurrencia de eventos de movimientos en masa.

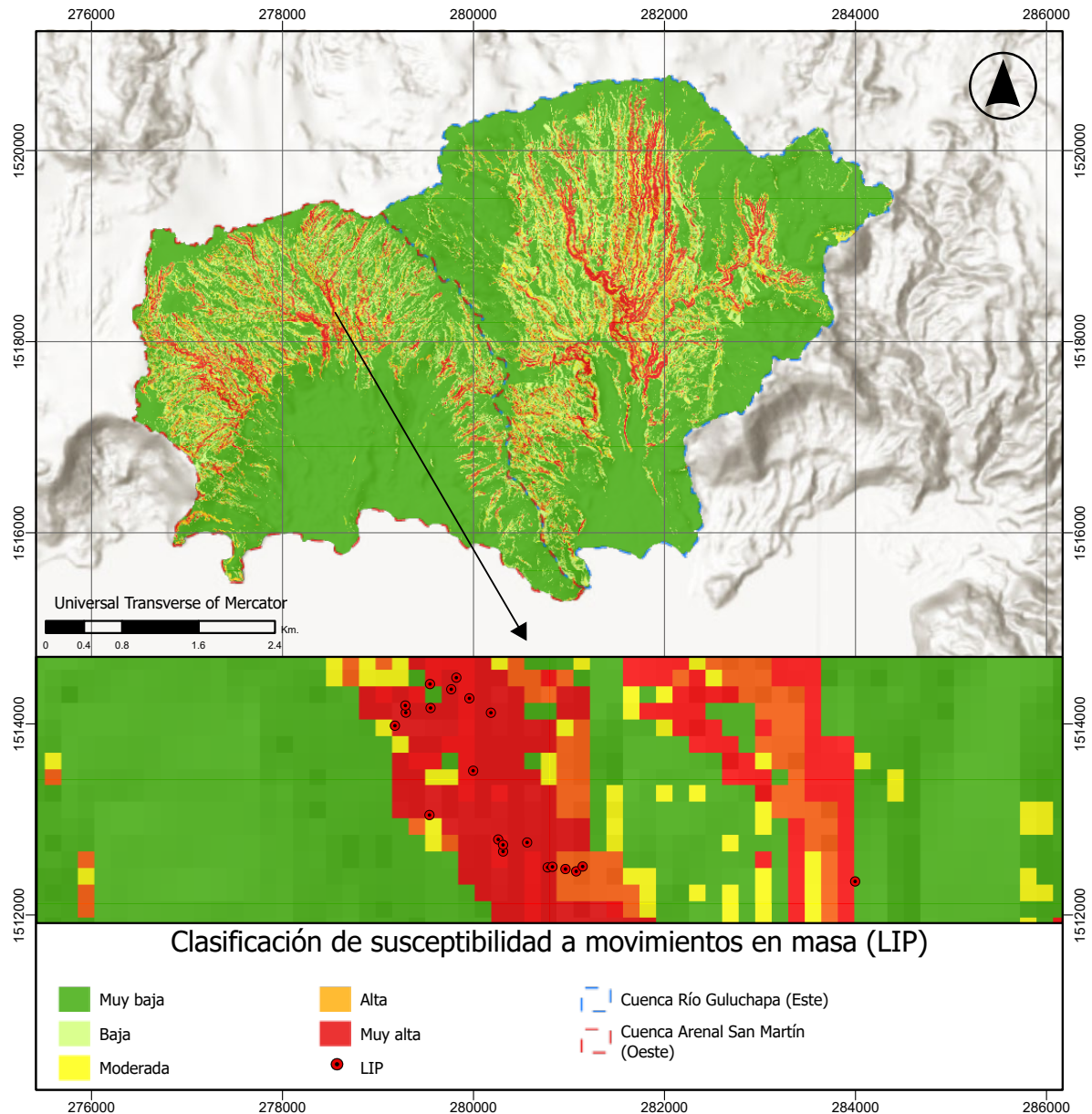


Figura 63 Susceptibilidad a movimientos en masa según modelo de predicción aplicado a inventario de eventos LIP

Por último, en la Figura 64 se puede observar en porcentaje la distribución de la susceptibilidad en toda el área de estudio, obtenido con los modelos de BODY y LIP. En ambos mapas el mayor porcentaje del área es ocupado por los niveles de susceptibilidad “Muy baja” correspondientes a 57.25% y 66.53% para BODY y LIP, respectivamente. A este le sigue la susceptibilidad “Baja”, con valores de 22.62% y 17.49% para BODY y LIP, respectivamente. Los valores correspondientes a susceptibilidad “Alta” y “Muy alta” suman un 16.44% para BODY y un 12.74% para LIP, siendo un valor aún menor respecto a las susceptibilidades “Baja” y “Muy baja” en cada caso.

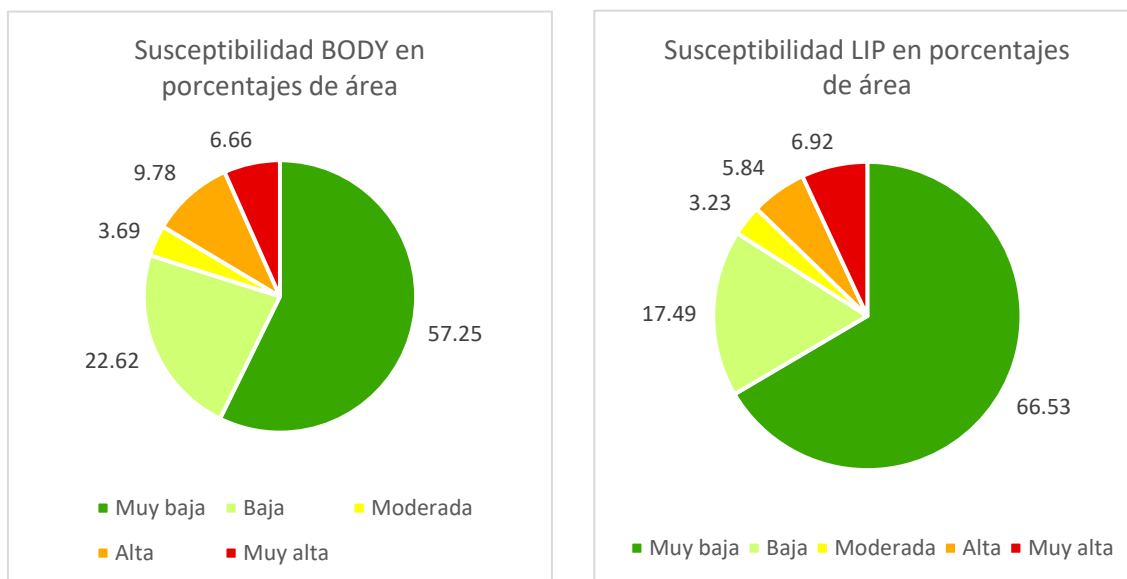


Figura 64 Susceptibilidad en porcentajes de área para el modelo BODY y LIP