

**Revisión de la Aplicación de la Metodología de Amenaza Relativa a
Movimientos en Masa del SGC a escala 1:100.000 en la plancha 118 – San
Francisco**

Janer Rafael Cantillo Romero

Jesus Ramon Delgado

Director

Junio 2016.

Universidad de Pamplona
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Geología

Resumen

El objetivo principal de este trabajo consistió en investigar los atributos, variables, parámetros y ponderaciones más eficaces para lograr una mejor zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, a partir de la revisión bibliográfica de otras metodologías y mediante la consulta a los expertos. Se partió de los resultados obtenidos en el proceso de elaboración del Mapa de la Zonificación Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa de la plancha 118 – San Francisco, realizada por la Universidad de Pamplona mediante el convenio 025 de 2013 celebrado con el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en el que se aplicó el documento metodológico desarrollado por el SGC, en el 2013, posteriormente se realizó un análisis comparativo de los resultados de este trabajo, con los obtenidos con la aplicación de la metodología del SGC.

Se realizaron algunos cambios en las variables de geología, geomorfología y suelos edáficos. En la primera variable (geología), se incorporaron nuevos atributos tales como: estructuras geológicas lineales y la meteorización; en la segunda variable (geomorfología), se realizaron ajustes en el primer atributo (morfogénesis) a la calificación del atributo modelado, de acuerdo a los criterios del experto con relación al tipo de geoformas propensas a generar movimientos en masa; en el segundo atributo (morfodinámica), se suprimió el componente Relaincli, el cual fue remplazado por el componente densidad de movimientos en masa. Por último en la variable suelos edáficos, se empleó el modelo propuesto por Rosas, 2014, en el cual se incorpora la capacidad de intercambio catiónico (CIC), en la calificación del tipo de arcilla. En los atributos de cobertura vegetal y la pendiente, se suprimieron los atributos taxonomía y drenaje natural.

Se observó que los resultados de la modelación de la susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa, presentaron una mejor correlación entre los movimientos en masa y las categorías altas, al mismo tiempo hubo una mejora en la discriminación de las áreas de zonificación.

*Janer Cantillo Romero
Universidad de Pamplona
Junio 2016*

Abstract

The central objective of this work involved investigating the attributes, variables, parameters and weights most effective in achieving a better zoning susceptibility and threat mass movement through a bibliographic review of other methodologies and expert consultation. Starting from the results obtained in developing the map Zoning Susceptibility and Threat mass movement of the plate 118 - San Francisco conducted by the University of Pamplona and Colombian Geological Service (SGC) in 2015, which was strictly applied methodological document developed by the SGC in 2013, subsequently an analysis that allowed comparison of the results obtained in this work, with those obtained with the application of the methodology of the SGC.

Changes were made to the variables geology, geomorphology and soil soils. In the first variable incorporated new attributes namely, which they are linear geological structures and weathering; in the second variable comprises the morphogenetic attributes, morphodynamics and morphometry, in the first attribute rating adjustments were made attribute modeling, according to expert criteria regarding prone geofomas to generate mass movements; in the second attribute suppressed the Relaincli component, which was replaced by the component density mass movements.

And finally in the Variable edaphic soils, use the proposed model Rosas in 2014, in which is incorporated the cation exchange capacity (CIC) in qualifying the type of clay. The attributes of vegetation cover and slope, and taxonomy attributes and natural drainage are deleted.

It was observed that the result of susceptibility modeling and threatens mass movement present a better correlation between mass movements and high categories also better discrimination in the areas of zoning.

*Janer Cantillo Romero
University of Pamplona
Junio 2016*

Tabla de Contenido

Introducción	1
1 Objetivos.....	2
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Planteamiento del problema	3
2 Justificación.....	5
3 Antecedentes.....	6
4 Marco Conceptual	8
4.1 Marco Contextual.....	8
4.2 Marco Teórico	9
4.2.1 Métodos de zonificación	12
4.2.1.1 Métodos cualitativos o semicuantitativos (<i>Heurístico</i>).....	12
4.2.1.2 Métodos determinísticos.....	19
4.2.1.3 Metodología Geomorfológica	19
4.2.1.4 Metodología Probabilística o estadística.....	20
4.2.1.5 Metodologías alternativas.....	20
5 Información Básica e Insumos Generales	22
5.1 Base Cartográfica	22
5.2 Cartografía temática	22
5.3 Modelo Digital de Elevación.....	22
5.4 Imágenes de sensores remotos	25
6 Metodología.....	29
6.1 Cálculo de susceptibilidad de cada una de las variables empleando la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013).....	30
6.1.1 Geología.....	30
6.1.1.1 Densidad de fracturamiento.....	31
6.1.1.2 Fabrica y/o Estructura	32
6.1.1.3 Resistencia.....	33

6.1.1.4	. Atributos en suelos y depósitos	34
6.1.1.5	. Mapa de susceptibilidad total de la variable geología	35
6.1.2	Suelos Edáficos	36
6.1.2.1	Textura.....	37
6.1.2.2	Taxonomía	37
6.1.2.3	Drenaje Natural	38
6.1.2.4	Profundidad total del suelo	38
6.1.2.5	Tipo de Arcilla.....	39
6.1.3	Cobertura.....	40
6.1.4	Geomorfología	43
6.1.4.1	Morfometría.....	44
6.1.4.2	Morfogénesis	47
6.1.4.3	Morfodinámica	49
6.1.4.4	Susceptibilidad por geomorfología	51
6.1.5	Susceptibilidad	52
6.1.6	Amenaza Relativa	55
6.1.6.1	Factor detonante clima	55
6.1.6.2	Factor detonante sismo	56
6.1.6.3	Cálculo de la amenaza relativa.....	57
6.2	Calculo de la susceptibilidad con los criterios y variables propuestas.....	60
6.2.1	Susceptibilidad por geología	60
6.2.1.1	Estructuras geológicas lineales.....	60
6.2.1.2	Propuesta - Susceptibilidad por geología	62
6.2.2	Susceptibilidad por geomorfología	64
6.2.2.1	Morfogénesis	64
6.2.2.2	Morfodinámica	67
6.2.2.3	Morfometría.....	70

6.2.2.4	<i>Susceptibilidad de la variable geomorfología</i>	70
6.2.3	Susceptibilidad por suelos edáficos	72
6.2.3.1	<i>Pendiente</i>	72
6.2.3.2	<i>Arcillas</i>	73
6.2.3.3	<i>Cobertura vegetal</i>	73
6.2.4	Susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa	75
7	Resultados y Discusión	78
7.1	Variable geología	78
7.2	Variable suelos edáficos.....	81
7.3	Variable geomorfología.....	84
7.4	Susceptibilidad a movimiento en masa	86
7.5	Amenaza relativa.....	88
8	Conclusiones y Recomendaciones	91
9	Referencias Bibliográficas	93

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Mapa de localización del área de estudio. Fuente Autor	8
<i>Figura 2.</i> Uso del SIG, para el análisis heurístico de susceptibilidad por movimientos en masa. Modificado de (Soeters & Van Westen, 1996).	11
<i>Figura 3.</i> Diagrama de flujo del proceso analítico Jerárquico. Tomado y modificado de Ho, Dey, and Higson (2006).	13
<i>Figura 4.</i> Jerarquía en AHP tomado de Saaty (1980).	14
<i>Figura 5.</i> Diagrama con las metodologías más empleadas para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos de laderas. modificado de García (2008, p. 55).	21
<i>Figura 6.</i> Cartografía Base, Plancha 118 - San Francisco	23
<i>Figura 7.</i> Superposición del Modelo Digital del Elevación con el mapa de sobras para la Plancha 118 - San Francisco	25
<i>Figura 8.</i> Imagen Landsat 8, combinación 654	26
<i>Figura 9.</i> Ortofotomosaico del sensor Vexcel Ultracam-D en combinación 321	27
<i>Figura 10.</i> Imagen de Radar Sentinel 1, con la Combinación de las polarizaciones VV-VH-VV	28
<i>Figura 11.</i> Diagrama metodológico para zonificación de la amenaza nacional desarrollado por el SGC. ..	29
<i>Figura 12.</i> Ponderación de la calidad de la roca, según los atributos establecidos para definir las características de las unidades geológicas (Modificado de SGC, 2013).	30
<i>Figura 13.</i> Mapa de calificación del atributo Densidad de Fracturamiento con respecto a la susceptibilidad a los movimientos en masa, Plancha 118 – San Francisco	32
<i>Figura 14.</i> Mapa de calificación de la variable geológica con respecto a la susceptibilidad a los movimientos en masa, Plancha 118 – San Francisco	36
<i>Figura 15.</i> Mapa de la susceptibilidad de la variable suelos edáficos	40
<i>Figura 16.</i> Efectos de la vegetación sobre la protección del suelo Fuente: (Suarez, 2009).	41
<i>Figura 17.</i> Diagrama de los atributos calificados en la variable Cobertura de la tierra, incluyendo los porcentajes de calificación, Modificado del (SGC, 2013)	42
<i>Figura 18.</i> Procedimiento para el cálculo de la susceptibilidad de la Cobertura de la Tierra.	42
<i>Figura 19.</i> Mapa de susceptibilidad de la variable cobertura de la Tierra.	43
<i>Figura 20.</i> Diagrama de los atributos calificados de la variable geomorfología (Modificado del Servicio Geológico Colombiano – SGC, 2013)	44
<i>Figura 21.</i> Diagrama de los atributos calificados en la variable Morfometría, incluyendo los porcentajes de calificación (Modificado del Servicio Geológico Colombiano – SGC, 2013)	44
<i>Figura 22.</i> Proceso de generación del atributo Morfodinámica	49
<i>Figura 23.</i> Esquema de representación de relieve relativo.	50
<i>Figura 24.</i> Representación de la inclinación de ladera.	50
<i>Figura 25.</i> Proceso de generación del atributo Relaincli	51
<i>Figura 26.</i> Diagrama de los atributos calificados de la variable geomorfología (Modificado del Servicio Geológico Colombiano – SGC, 2013)	51
<i>Figura 27.</i> Mapa de susceptibilidad de la variable geomorfología plancha 118, San Francisco.	52
<i>Figura 28.</i> Diagrama de la jerarquía para elaborar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, con sus respectivos porcentajes. Fuente: Autor.	54
<i>Figura 29.</i> Mapa de susceptibilidad por movimiento en masa	55
<i>Figura 30.</i> Mapa del factor detonante por clima en la plancha 118, San Francisco. Fuente: (UP & SGC, 2015)	56
<i>Figura 31.</i> Mapa del factor detonante sismo, plancha 118, San Francisco. Fuente: (UP & SGC, 2015) ...	57
<i>Figura 32.</i> Clasificación del mapa de zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa Fuente: (SGC, 2013)	59

<i>Figura 33.</i> Mapa de amenaza relativa empleando la metodología del SGC (2013).....	59
<i>Figura 34.</i> Mapa de susceptibilidad por estructuras lineales.....	61
<i>Figura 35.</i> Mapa de susceptibilidad de la variable geología con el modelo propuesto.....	64
<i>Figura 36.</i> Mapa de susceptibilidad por la variable morfogénesis propuesta.....	67
<i>Figura 37.</i> Proceso de generación del atributo morfodinámica.....	68
<i>Figura 38.</i> Enjambre de deslizamientos sobre laderas deforestadas.....	69
<i>Figura 39.</i> Mapa de susceptibilidad por la variable morfodinámica.....	69
<i>Figura 40.</i> Porcentajes empleados para la susceptibilidad por la variable Geomorfología.....	70
<i>Figura 41</i> Proceso de generación de la variable geomorfología en el software ArcGis 10.2.....	71
<i>Figura 42.</i> Mapa de susceptibilidad por la variable geomorfología propuesta.....	71
<i>Figura 43.</i> Diagrama de atributos empleados en los suelos edáficos. Modificado de Rosas (2014).....	72
<i>Figura 44.</i> Procedimiento para el cálculo de la susceptibilidad de la variable Suelos Edáficos en el software ArcGis 10.2.....	74
<i>Figura 45.</i> Mapa de susceptibilidad de la variable suelos, empleando el modelo de Rosas (2014).....	74
<i>Figura 46.</i> Procedimientos para el cálculo de susceptibilidad a Movimientos en masa.....	75
<i>Figura 47.</i> Variables y ponderaciones para susceptibilidad.....	76
<i>Figura 48.</i> Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa propuesto.....	76
<i>Figura 49.</i> Procedimientos para el cálculo de la Amenaza Relativa a Movimientos en masa.....	77
<i>Figura 50.</i> Mapa de amenaza relativa empleando el modelo propuesto.....	77
<i>Figura 51.</i> Mapa de susceptibilidad por la variable geología modelo SGC.....	79
<i>Figura 52.</i> Mapa de susceptibilidad por la variable geología propuesta.....	79
<i>Figura 53.</i> Mapa de susceptibilidad por la variable suelos edáficos modelo SGC.....	82
<i>Figura 54.</i> Mapa de susceptibilidad por la variable suelos edáficos propuesta.....	82
<i>Figura 55.</i> Número de deslizamiento por categoría de susceptibilidad de la variable suelos edáficos.....	83
<i>Figura 56.</i> Movimientos en masa por nivel de susceptibilidad de la variable geomorfología.....	84
<i>Figura 57.</i> Mapa de susceptibilidad por la variable geomorfología modelo SGC.....	85
<i>Figura 58.</i> Mapa de susceptibilidad por la variable geomorfología propuesta.....	85
<i>Figura 59.</i> Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa- modelo SGC.....	87
<i>Figura 60.</i> Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa - modelo propuesto.....	87
<i>Figura 61.</i> Número de deslizamiento por categoría de amenaza relativa a movimientos en masa.....	88
<i>Figura 62.</i> Mapa de amenaza relativa - modelo del SGC con los movimientos en masa en color negro...	90
<i>Figura 63.</i> Mapa de amenaza relativa – propuesta con los movimientos en masa en color negro.....	90

Lista de tablas

	Pág.
<i>Tabla 1.</i> Escala de comparaciones	15
<i>Tabla 2.</i> Índice de consistencia aleatorio (IA) en función de la dimensión de la matriz (n).....	18
<i>Tabla 3.</i> Lista de insumos para la elaboración de la zonificación de la susceptibilidad y amenaza. UP (2015).....	24
<i>Tabla 4.</i> Rangos de densidad y clasificación de susceptibilidad a nivel nacional (Servicio Geológico Colombiano -SGC, 2013).....	31
<i>Tabla 5.</i> Clasificación del atributo Textura/Fábrica, y la calificación propuesta por el SGC.....	33
<i>Tabla 6.</i> Categorías de resistencia a la compresión simple de las rocas, según Hooke, 1996, y la calificación correspondiente de acuerdo al SGC.....	34
<i>Tabla 7.</i> Clasificación de las unidades litológicas (Depósitos).....	34
<i>Tabla 8.</i> Calificación de la textura de los suelos.....	37
<i>Tabla 9.</i> Calificación de la taxonomía de los suelos a nivel de Orden	37
<i>Tabla 10.</i> Calificación del drenaje natural del suelo.....	38
<i>Tabla 11.</i> Calificación de profundidad total	39
<i>Tabla 12.</i> Calificación del tipo de arcilla.....	39
<i>Tabla 13.</i> Categorización y calificación de la susceptibilidad de la pendiente.....	45
<i>Tabla 14.</i> Categorización y calificación de la susceptibilidad de la rugosidad.....	46
<i>Tabla 15.</i> Categorización y calificación de la susceptibilidad de acuenca	46
<i>Tabla 16.</i> Atributos para la Calificación de las Unidades Geomorfológicas.....	48
<i>Tabla 17.</i> Matriz de Preferencias de la susceptibilidad.....	53
<i>Tabla 18.</i> Matriz normalizada.....	53
<i>Tabla 19.</i> Vector de suma ponderada.....	53
<i>Tabla 20.</i> Razón de consistencia.....	53
<i>Tabla 21.</i> Clasificación de las estructuras lineales.....	61
<i>Tabla 22.</i> Clasificación de geología.....	63
<i>Tabla 23.</i> Calificación morfogénica de las unidades geomorfológicas.....	66
<i>Tabla 24.</i> Calificación del atributo densidad de movimiento en masa	68
<i>Tabla 25.</i> Clases de pendiente.....	72
<i>Tabla 26.</i> Calificación de CIC	73
<i>Tabla 27.</i> Calificación de cobertura vegetal	73
<i>Tabla 28.</i> Comparación estadística del modelo propuesto vs modelo del SGC para la variable geología .	80
<i>Tabla 29.</i> Comparación estadística de modelo propuesto vs modelo SGC, para la variable suelos edáficos	83
<i>Tabla 30.</i> Comparación del modelo propuesto vs modelo SGC, para la variable geomorfología.....	84
<i>Tabla 31.</i> Comparación estadística de modelo propuesto vs modelo SGC para la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa.	86
<i>Tabla 32.</i> Comparación estadística de modelo propuesto vs modelo SGC para la zonificación de la amenaza relativa a movimientos en masa.	89

Introducción

El estudio de los fenómenos de remoción en masa se ha abordado de diferentes maneras por la comunidad científica. En los últimos años se han hecho esfuerzos por encontrar un modelo que simule la realidad, una tarea que resulta difícil y compleja, debido principalmente a que los deslizamientos son fenómenos complejos que involucran gran cantidad de parámetros que interactúan entre sí. Su cuantificación parte del criterio de expertos, y se ha observado que aún no hay un consenso, generando una subjetividad de la calificación y del modelo mismo. Sin embargo es fundamental el criterio del experto para la modelación, ya que permitirá determinar las diferentes calificaciones y ponderaciones para lograr mejores resultados.

En la presente investigación se aborda el tema de zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa a movimientos en masa empleando los sistemas de información geográfico (SIG), y el modelamiento matemático, se partió del análisis de los resultados obtenidos por la Universidad de Pamplona y el Servicio Geológico Colombiano SGC en 2015, y se observó que algunos de los resultados obtenidos difieren con lo observado en campo y los resultados esperados para las características y condiciones de los sitios. Se propuso una modificación a la metodología del SGC 2013, en la que se analizó, revisó y ajustaron las variables, atributos y ponderaciones empleadas por el SGC, además se incorporan nuevas variables y atributos.

Las condiciones físicas de un terreno relacionadas con la geología, geomorfología, suelos, clima, sismicidad y las actividades antrópicas sobre el territorio determinan la mayor o menor susceptibilidad a movimientos en masa; y en el caso de que ocurran puede traer consigo innumerables pérdidas tanto en vidas humanas como en las actividades económicas. La zonificación de amenazas a escala 1:100.000 del país, se constituye en una herramienta fundamental desde el punto de vista informativo y como un indicador para definir políticas nacionales para la inversión, atención y prevención de desastres, las cuales deben involucrarse dentro de los planes de desarrollo, el Ordenamiento Territorial (POT) y ordenación de cuencas hidrográficas (POMCAS), ya que éstas sirven de insumo y apoyo en la definición y gestión del riesgo.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Revisar, comparar y ajustar la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC) a escala 1:100.000, sobre la amenaza relativa a movimientos en masa, aplicada en particular a la plancha 118 – San Francisco.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar y aplicar las ponderaciones y los criterios más eficaces en el modelamiento de la amenaza relativa por movimiento en masa actuales.
- Elaborar el mapa de susceptibilidad a movimiento en masa a escala 1:100.000 de la plancha 118- San Francisco, mediante el modelamiento (AHP), en un sistema de información geográfica (SIG) para identificar las zonas más susceptibles de la zona de estudio.
- Elaborar el mapa de amenaza por movimientos en masa a escala 1:100.000 de la plancha 118-San Francisco, mediante el modelamiento (AHP), en un sistema de información geográfica (SIG) para identificar las zonas con mayor amenaza de la zona de estudio.
- Comparar los resultados obtenidos mediante la revisión y ajuste propuesto, con los obtenidos en la plancha 118-San Francisco, elaborada por la universidad de pamplona aplicando la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013).

1.3 Planteamiento del problema

En el desarrollo de los proyectos cartográficos es muy importante definir de antemano la escala de presentación de los resultados del proyecto, dependiendo de los objetivos, alcances y la aplicación de los criterios técnicos para la elaboración de los mapas. Los insumos deben ser óptimos en cuanto a resolución y precisión para cumplir con los requisitos de calidad a escala propuesta. Para el caso de la elaboración del mapa nacional de susceptibilidad y amenaza relativa a movimientos en masa elaborado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), se utilizaron distintos insumos tanto de cartografía básica y temática, como de imágenes de sensores remotos, cuyos insumos para la elaboración las diferentes temáticas, se encuentran a diferentes escalas; y en la mayoría de los casos la escala de los insumos es menor a la escala de trabajo utilizada y obviamente esto afecta la precisión requerida e incide directamente en los resultados.

Por otra parte y para el mismo proyecto, la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC), contempla la creación de un equipo multidisciplinario para abordar el problema desde diferentes puntos de vista, y la interrelación de estos permita aportar los elementos que van a retroalimentar la aplicación de la metodología. A partir de la revisión y recolección de información, digitalización y procesamiento, mediante el empleo del método semicuantitativo (AHP), en un Sistema de Información Geográfico (SIG), para simular una aproximación a la realidad del terreno y poder definir de esta manera las zonas más susceptibles y en donde pueda presentarse una mayor probabilidad a los movimientos de remoción en masa. De la misma manera el auge de los sistemas de Información Geográficos (SIG) o en inglés (GIS) y la Geomática, han permitido crear modelos, con una inmensa cantidad de variables que permiten obtener unos resultados mucho más ajustados a la realidad. No obstante, en el análisis es necesario mejorar las ponderaciones y la calificación de las variables analizadas. Las principales variables que influyen en el análisis de la susceptibilidad y amenaza a los movimientos en masa son múltiples y algunas de ellas son intangibles; motivo por lo cual pueden emplearse métodos Heurísticos y Empíricos. Al desarrollar y aplicar el modelo propuesto por el SGC en el 2013, se observó que en algunos sectores del mapa no hay correspondencia entre la ubicación de los movimientos en masa reportados en el inventario del Sistema de información de movimientos en masa (SIMMA)

con los resultados de susceptibilidad y amenaza presentados; ya que hay discrepancias, por ejemplo: donde se obtuvo una calificación media, deberían ser alta, y en otros sectores donde se cartografiaron áreas con susceptibilidad alta y deberían corresponder a la categoría baja.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente surgen las siguientes preguntas de investigación:

- ¿La metodología de amenaza relativa a movimientos en masa propuesta por el SGC en el 2013, incorpora las variables y criterios de calificación adecuados para obtener un resultado acorde a la realidad observada?
- ¿Cuáles serían las ponderaciones y los criterios más adecuados para lograr una zonificación más coherente con la susceptibilidad y amenaza por fenómenos de remoción en masa?
- ¿Qué otros tipos de insumos utilizados en otras metodologías podrían aportar al mejoramiento de la zonificación de la susceptibilidad y amenaza a los movimientos en masa?

2 Justificación

Según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), para el 2010, el 75% de la población colombiana se asienta en la región andina, la cual se caracteriza por presentar la mayor frecuencia de ocurrencia de Fenómenos de Remoción en Masa (FRM). Por tal motivo, es de suma importancia realizar estudios adecuados regionales y locales para determinar con mayor precisión las áreas potencialmente amenazadas por la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa (FRM).

A partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), todos los municipios del país deben realizar estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas encaminadas a la planificación del desarrollo seguro y a la gestión ambiental territorial sostenible. Por lo tanto, los mapas de amenaza, se deben considerar como un insumo válido e indispensable para los planes de ordenamiento territorial y ambiental regional, planeación del desarrollo y la gestión de riesgo en los entes territoriales del orden municipal, departamental y nacional.

En la metodología elaborada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en el 2013, se observó que las ponderaciones y criterios utilizados en las temáticas de geología, cobertura, suelos y geomorfología, susceptibilidad y amenaza, muestran resultados que discrepan, en las categorías de susceptibilidad y amenaza; ya que no hay concordancia o no coinciden con la distribución espacial real de los procesos de movimientos en masa que están ocurriendo en el terreno.

Desde el punto de vista académico, ésta investigación, provee un valioso instrumento para el mejoramiento de la metodología de zonificación de áreas susceptibles a los fenómenos de remoción en masa (FRM), ya que aporta nuevos criterios y ponderaciones que van a permitir obtener mejores resultados que estén acorde con la realidad y las condiciones físicas observadas en el terreno.

3 Antecedentes

A nivel internacional se han elaborado numerosos estudios relacionados con el tema tratado, dentro de los principales se citan los siguientes:

- ***Metodología de Mora Varshon***

Zonificación de la susceptibilidad a los deslizamientos: resultados obtenidos para la península de Papagayo mediante la modificación del método Mora Vahrson (Mora et al., 1992). (Mora, Chaves, & Vasquez, 2002), el estudio tiene como objetivo obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de diversos indicadores morfodinámicos, obtenidos de la observación, medición y distribución espacial.

- ***Metodología de Van Westen***

Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS based hazard zonation (Van Westen, Rengers, Terlien, & Soeters, 1997). En el cual se considera el análisis del terreno en donde se presentaron fallas de talud en un tiempo pasado, como base para la evaluación del riesgo de movimientos sobre laderas. En dicha investigación se utilizaron los sistemas de información geográfica (SIG).

En la evaluación de amenazas por movimientos en masa en paisajes montañosos: ejemplos en el Estado Vargas Venezuela (Elizalde & Mauveína, 2000), en este estudio se propone un método para evaluar las amenazas de ocurrencia de procesos de movimientos en masa en áreas montañosas.

- ***Metodología SGC - IDEAM***

A nivel nacional y local, El Servicio Geológico Colombiano (antiguo INGEOMINAS), (INGEOMINAS, Montero, & Cortes, 2001) generó el Mapa Nacional de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa a escala 1:1.500.000, con la intención de obtener una visión nacional de la distribución de este tipo de eventos en el país. Teniendo en cuenta la importancia de ésta temática a nivel nacional, en el año 2009, decide realizar la actualización de este mapa, mejorando la escala a 1:500.000 en virtud de la disponibilidad de información cartográfica y de los factores desencadenantes a esta escala; paralelamente, el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), decide actualizar el Mapa de Susceptibilidad a los Deslizamientos de Tierra que habían realizado

en el año 2000. En el año 2009, mediante un convenio interinstitucional, celebrado entre las dos entidades, realizaron la actualización de los dos mapas, generando los Mapas de Susceptibilidad y el Mapa de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa a escala 1:500.000.

A nivel más local, en Colombia, se han elaborado diversos estudios relacionados con la temática, dentro de los cuáles y como más destacados se encuentran:

- ***Zonificación de amenaza en las cuencas de los ríos Bolo y Fraile***

La Zonificación de amenazas por procesos de remoción en masa en las cuencas de los ríos Bolo y Fraile, Valle del Cauca (Castro, Vargas, & Moreno, 1998). En éste estudio se integró la cartografía temática, el análisis del grado de influencia de las variables físicas del terreno y los factores detonantes, para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza a los movimientos en masa, en las cuencas de los ríos Bolo y Fraile, localizadas en flanco occidental de la cordillera Central de los Andes Colombianos.

- ***Metodología IGAC – CORANTIOQUIA***

En el año 2014, la Corporación Autónoma Regional Del Centro De Antioquia – (CORANTIOQUIA), en convenio con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, elaboraron el estudio denominado:” *Estimación y elaboración cartográfica de amenazas por inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa con el uso de tecnologías geoespaciales. Fase II Zona Oriental Jurisdicción de CORANTIOQUIA*, a escala 1:25.000”.

- ***Zonificación de la amenaza relativa a los movimientos en masa plancha 118 – San Francisco.***

En el año 2015, la Universidad de Pamplona (UP), mediante el Convenio 025 del año 2013, celebrado con el Servicio Geológico Colombiano (SGC), realizaron los estudios para la elaboración del mapa de amenaza relativa por movimiento en masa a escala 1:100.000, de 12 planchas del bloque 8, dentro de las cuales se incluye la plancha 118 – San –Francisco, estas 12 planchas forman parte integral del mapa nacional de amenaza relativa a los movimientos en masa a escala 1:100.000 del país.

4 Marco Conceptual

4.1 Marco Contextual

La plancha 118 – San Francisco, motivo de la zona de estudio, se encuentra localizada al sur de la serranía de San Lucas (Cordillera Central), al Suroeste de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, formando parte del sur del departamento de Bolívar, el sureste de Antioquia y una parte en el departamento de Santander. Cubre una extensión de 2400 km² y está limitada por las siguientes coordenadas planas magna sirgas N [1'240.000 – 1'280.000] y E [940.000 – 1'000.000] e incluye parte de los municipios de Yalí, Vegachí, Yondó, Remedios, Cantagallo, San Pablo, y Barrancabermeja, Cimitarra y Puerto Berrío.

El modelo de Elevación Digital (DEM), fue suministrado por el SGC, la base cartográfica, los límites municipales, departamentales y la grilla fueron proporcionados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

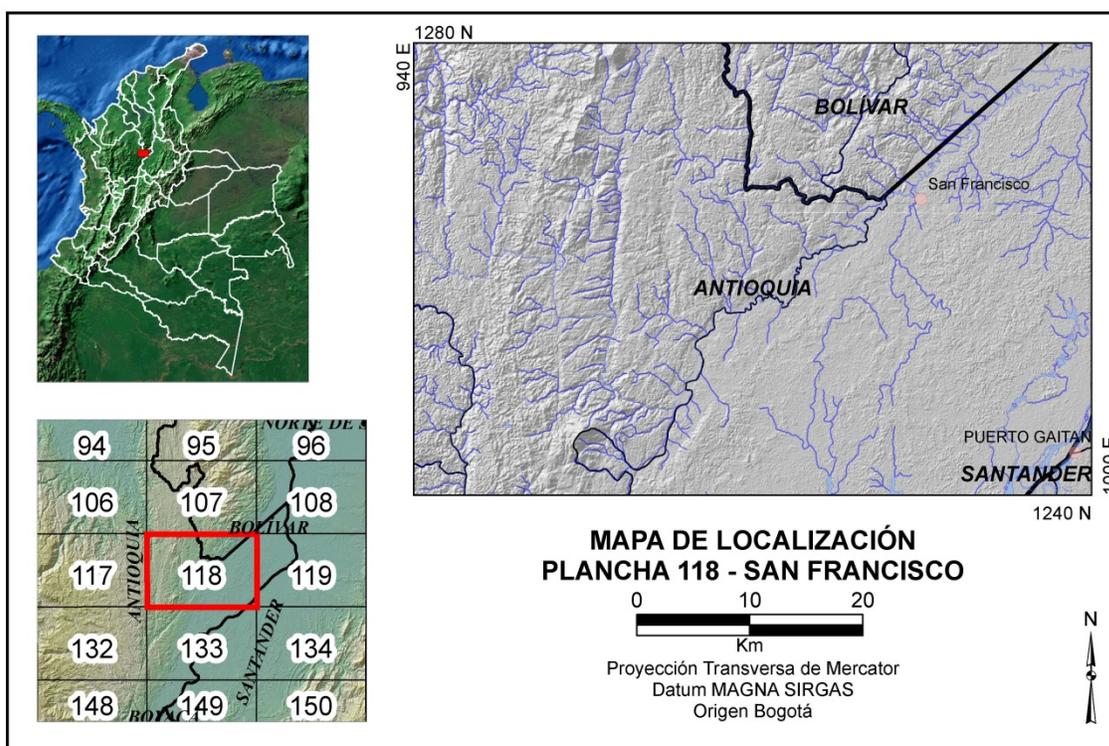


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Fuente Autor

4.2 Marco Teórico

Los modelos de predicción para los deslizamientos, generalmente intentan identificar áreas donde es más probable que ocurran dichos deslizamientos o movimientos en masa, y con base en el conocimiento de un conjunto de características medioambientales en una determinada región (Guzzetti, Carrara, Cardinali, & Reichenbach, 1999). La principal hipótesis de estos modelos se basa en el principio del *Uniformismo*, es decir que los movimientos en masa que se producirán en un futuro, serán más probables que ocurran bajo las mismas condiciones que se dieron en el pasado y las que se están dando en el presente (Carrara, Cardinali, Guzzetti, & Reichenbach, 1995; Guzzetti et al., 1999; Varnes, 1978).

En el caso de que se utilicen métodos que relacionen la distribución de los deslizamientos ocurridos en un pasado, junto con los factores condicionantes a la inestabilidad de laderas, se definirá un modelo con las zonas de mayor peligro de ocurrencia; pero no indicarán ningún periodo de retorno o probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos en un tiempo dado. De hecho, muchas de las zonificaciones regionales de amenaza por movimientos en masa, proveen una clasificación de las unidades del terreno en términos de susceptibilidad; pero, no incluye la componente temporal de peligrosidad o amenaza.

Por su naturaleza, la evaluación de la susceptibilidad, es un problema muy complejo y multivariante, en el que se ven involucrados muchos factores, intentando extrapolar datos locales a grandes áreas. Este proceso lleva implícito una gran incertidumbre (García, 2008; Suarez, 2009; Vargas, 1999). Un deslizamiento es controlado por leyes físicas que pueden ser determinadas en forma empírica, estadísticamente o de modo determinístico (García, 2008, p. 72).

El uso del SIG en últimos años para la evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza a movimientos en masa, se ha visto incrementado a causa del desarrollo de programas como: Arcgis Advance (ESRI), QGIS, IDRISI, ILWIS, GRASS, entre otros; así como un rápido acceso para obtención de datos mediante el uso de GPS y técnicas de Teledetección (Sensores Remotos). A partir de un modelo digital del terreno (MDT) y empleando herramientas SIG, es posible obtener diferentes mapas (morfológicos, morfodinámicos o de

pendientes), característicos de la zona (CVC & INGEOMINAS, 2001 ; Vargas, 1999), los cuales serán utilizados posterior en la evaluación y análisis de la susceptibilidad y/o amenaza. De este modo, los atributos del terreno son derivados a partir de un modelo digital del terreno (MDT), complementado con fotointerpretación, reduciendo el tiempo y el alto costo de la toma de datos de campo. Por otra parte, el SIG permite una rápida combinación y evaluación de los atributos del terreno (Vargas, 1999, pp. 109,150).

Las metodologías de evaluación de la susceptibilidad y/o amenaza a los movimientos en masa pueden ser divididas en dos (2) métodos: directos o indirectos. La representación directa está sustentada en el método geomorfológico, que está basado en la experiencia y el conocimiento directo que tengan los profesionales de las condiciones del terreno para determinar el grado de susceptibilidad. Los métodos indirectos utilizan modelos estadísticos o determinísticos, para predecir las áreas propensas a los deslizamientos, basado en la información obtenida de la interrelación entre los diferentes factores condicionantes a los deslizamientos y la distribución de los deslizamientos (Van Westen, 2004, pp. 47-49; Van Westen, 2000).

La evaluación de áreas susceptibles a los deslizamientos, está basada en una correlación espacial entre las características del terreno y la ocurrencia de los deslizamientos. Para la estimación de la susceptibilidad a los deslizamientos, se toman en consideración los registros históricos, la geología local, litología (comportamiento físico y químico de rocas y suelos), la estructura, geomorfología (pendientes), condiciones hidrológicas (nivel del agua subterránea), vegetación (forma y tipo de cubierta vegetal) y el clima (precipitación y temperatura) de la región. Adicionalmente, los SIG, se han empleado en la línea de investigación de los deslizamientos, donde han tenido una buena aplicabilidad en la evaluación de la susceptibilidad, la amenaza y/o el riesgo de deslizamientos y su posterior representación cartográfica. Por este motivo, el uso de los SIG, se ha incrementado enormemente, con el desarrollo de las técnicas de evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos y sus aplicaciones (Van Westen, 2004).

Los sistemas de información (SIG), se utilizan como una herramienta rápida de captura y cuantificación, pero también son utilizados para el análisis de parámetros (Figura 2). Los criterios con los cuales se designan las clases, pueden variar de un polígono a otro

polígono. Sin embargo, el análisis se puede hacer, utilizando los valores de los pesos en cada mapa de parámetros y cada mapa recibe un diferente peso.

El profesional especializado decide qué mapas y qué valores de peso empleará, basado en su propia experiencia (Suarez, 2009). En los métodos Heurísticos, se emplean variables cualitativas y cuantitativas; dentro de las variables cualitativas, se encuentran: la geología, geomorfología, suelos y cobertura de la tierra; y dentro de las variables cuantitativas, se encuentran: la pendiente, longitud de la pendiente, rugosidad y acuenca, las cuales son derivadas a partir del modelo digital de elevación (DEM) (SGC, 2013) .

El procedimiento seguido del SIG, en este caso, es el siguiente:

- Clasificación de cada mapa de parámetros de acuerdo con las clases relevantes.
- Asignación de valores de peso a cada parámetro (por ejemplo: en la escala de 1 a 10).
- Asignación de pesos a cada mapa de parámetros.
- Cálculo de los pesos para cada pixel y clasificación en clases de amenaza.

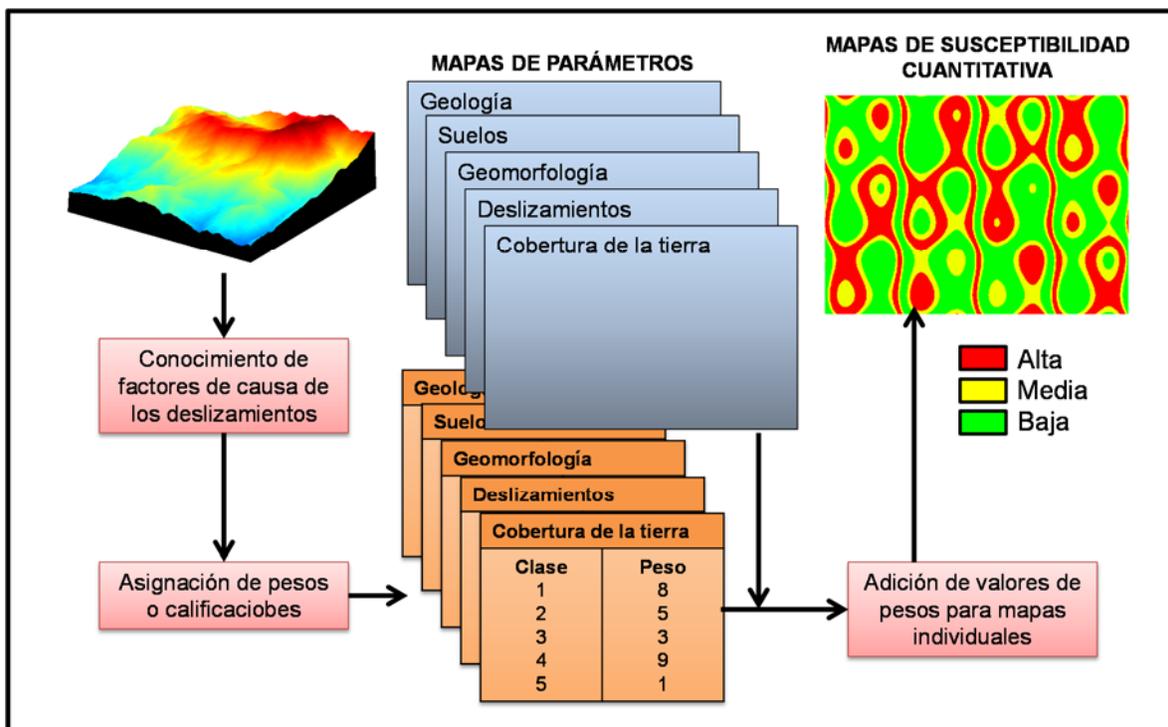


Figura 2. Uso del SIG, para el análisis heurístico de susceptibilidad por movimientos en masa. Modificado de (Soeters & Van Westen, 1996).

4.2.1 Métodos de zonificación

En función del procedimiento utilizado en la evaluación y confección de mapas de peligrosidad o susceptibilidad del terreno a los deslizamientos de laderas, se distinguen cinco metodologías: geomorfológica, semi-cuantitativa, determinística, probabilística y alternativa.

4.2.1.1 Métodos cualitativos o semicuantitativos (*Heurístico*)

Este método, se basa en el conocimiento a priori de los factores que producen la inestabilidad de las laderas en un área determinada. Los factores se ordenan y ponderan según el valor asumido o esperado en la formación de los deslizamientos (Carrara et al., 1995; CVC & INGEOMINAS, 2001 ; SGC, 2013; Vargas, 1999). El principal inconveniente está en que en la mayoría de los casos, el conocimiento existente entre los factores condicionantes a la inestabilidad a los deslizamientos es inadecuado y muy subjetivo, y depende directamente de la formación y experiencia del experto. Entre las metodologías semicuantitativas, se pueden citar como Ejemplo: el método AHP, el índice estadístico, el método de Mora-Varhson y el método de Rodríguez, 2001.

No es recomendable aplicar, ni estandarizar metodologías de este tipo soportadas en valores preestablecidos de otros estudios, es mejor a partir de los datos obtenidos del conocimiento directo del área de estudio (Vargas, 1999, p. 133)

4.2.1.1.1 Método del proceso de análisis jerárquico (*analytical hierarchy process, AHP*)

El proceso de análisis jerárquico (AHP), fue desarrollado por Saaty (1980). Está diseñado para resolver problemas de criterios múltiples. El AHP, realiza una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión. Tratando directamente con pares ordenados de prioridades de importancia, preferencia o probabilidad de pares de elementos en función de un atributo o criterio común representado en la jerarquía de decisión (Saaty, 1980). Este consiste en un método semi-cualitativo que integra la comparación por pares, realizada por expertos a partir de una matriz de atributos, ayuda a los tomadores de decisiones a escoger entre muchas

alternativas posibles sobre la base de criterios múltiples, lo cual se resuelve mediante la jerarquización de los problemas planteados.

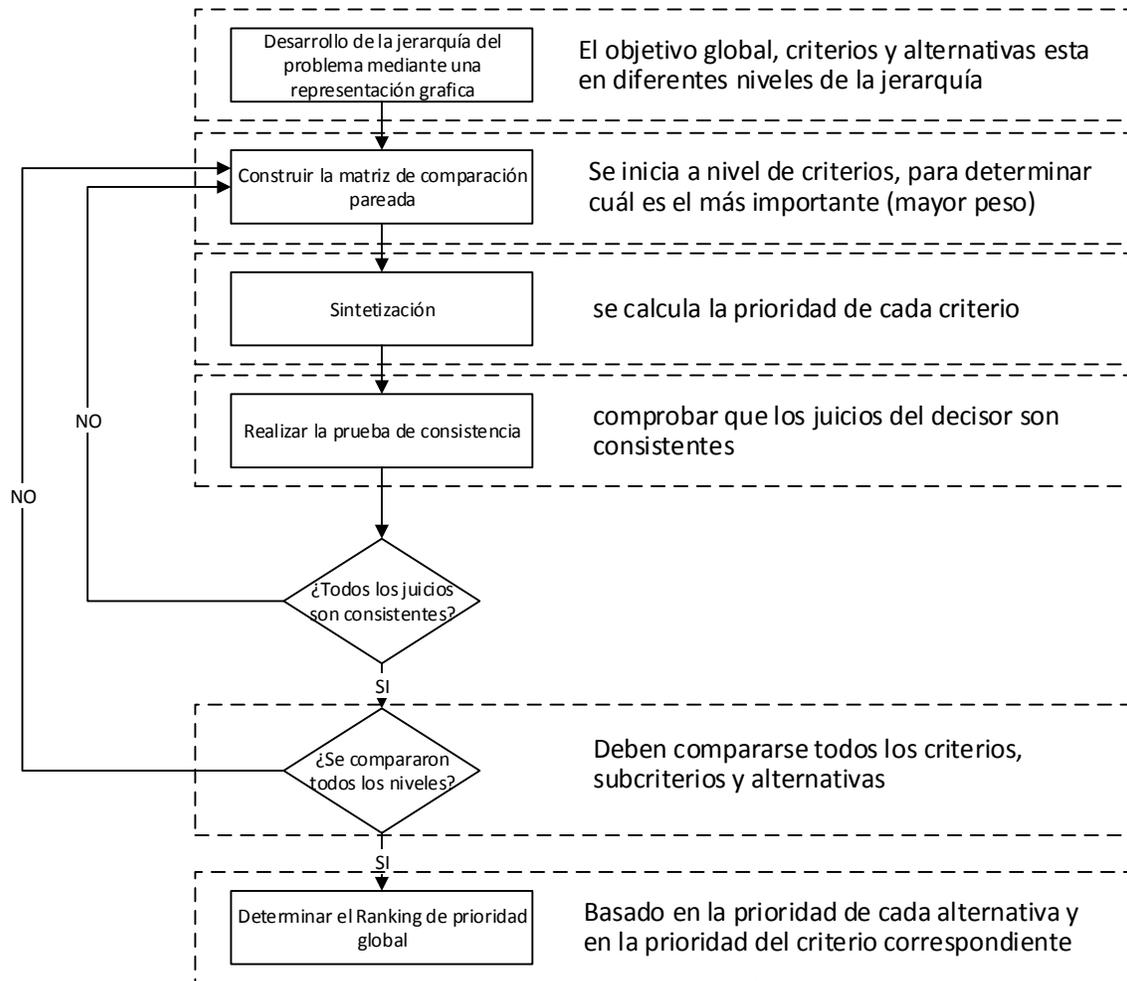


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso analítico Jerárquico. Tomado y modificado de Ho, Dey, and Higson (2006)

Este método consta básicamente de tres principios:

1. Construcción de las Jerarquías

Consiste en la estructuración del problema mediante la construcción de una jerarquía de atributos, siendo el nivel superior el objetivo propuesto, los siguientes criterios deben ser explícitos y tienen que evidenciar sus relaciones ante el problema planteado. Su construcción es la parte más creativa del proceso y requiere de un consenso entre todas las

partes implicadas en el proceso de decisión. Esto es particularmente válido en el caso de los Proyectos Complejos abordados por equipos multidisciplinares.

Este consiste en modelar el problema de la decisión que se pretende resolver como una jerarquía. Este hecho es una de las principales características del método, de ahí que el término "jerárquico" aparece en su denominación. En la Figura 4, se presenta la forma general que adopta una jerarquía. En el vértice superior de la jerarquía se sitúa la meta u objetivo que se pretende alcanzar. El problema de decisión consiste en elegir la alternativa que mejor contribuye a la consecución de la meta del nivel superior de la jerarquía.

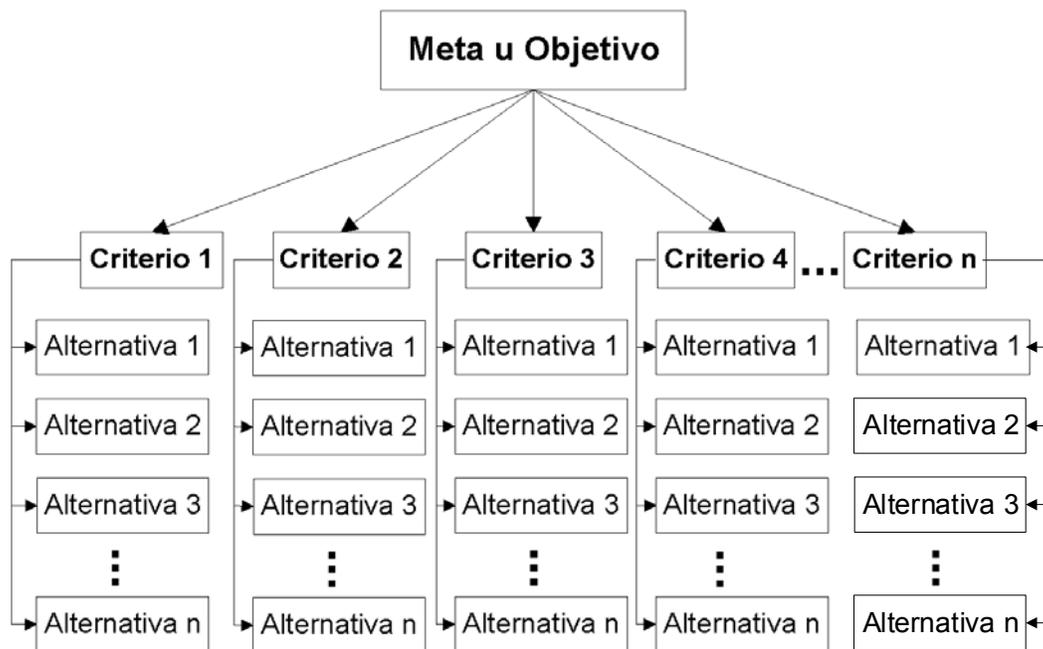


Figura 4. Jerarquía en AHP tomado de Saaty (1980)

2. Establecimiento de Prioridades

El objetivo de este paso consiste en construir un vector de prioridades o pesos que evalúa la importancia relativa que la unidad decisora otorga a cada criterio. El problema clave que se plantea en este punto, es responder a cómo se puede asignar un valor numérico a cada criterio que represente, del modo más ajustado posible, la preferencia del decisor de un criterio frente a otro.

El método AHP, utiliza una estrategia de asignación indirecta por la que el decisor sólo tiene que realizar una valoración sobre la importancia del criterio verbalizada en términos cualitativos y después acudir a una escala, que previamente ha sido establecida, para obtener los valores numéricos que se corresponden con su valoración. Por tanto, como paso previo a la resolución del problema de asignación de pesos, se debe definir la correspondencia entre la valoración cualitativa del decisor y la asignación numérica, la escala sugerida por Saaty es la siguiente:

Tabla 1. Escala de comparaciones

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicación
1	Ambos elementos son de igual importancia	Ambos elementos contribuyen con la propiedad en igual forma.
3	Moderada importancia de un elemento sobre otro	La experiencia y el juicio favorece a un elemento por sobre el otro
5	Fuerte importancia de un elemento sobre otro	La experiencia y el juicio favorece fuertemente a un elemento por sobre el otro.
7	Muy fuerte importancia de un elemento sobre otro	Un elemento es de muy fuerte importancia y su dominancia se ha demostrado en la práctica.
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro.	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es de gran magnitud de diferencia.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	Usados como valores de consenso entre dos juicios.
0	No hay relación	Un elemento no contribuye al objetivo
Recíprocos	$a_{ij} = 1/a_{ji}$	Si la actividad i tiene un peso asignado al compararlo con la actividad j , entonces a j le corresponde el recíproco al ser comparado con la actividad i .

Fuente: Saaty (1980)

Luego el decisor debe establecer las prioridades mediante comparación entre pares y, así, determinar los pesos relativos de los criterios. Los números de la escala representan la proporción en la que uno de los elementos que se consideran en la comparación pareada domina al otro respecto a una propiedad o criterio que tienen en común. El elemento menor tiene el valor recíproco o inverso respecto al mayor, es decir, si x es el número de veces que un elemento domina a otro, entonces este último es $x - 1$ veces dominado por el primero, de

tal modo que $x^{-1} \cdot x = x \cdot x^{-1} = 1$. Este es el principio del axioma de comparación recíproca que ya ha sido comentado.

Para determinar los pesos de los criterios el decisor, haciendo uso de la escala fundamental, debe construir una matriz R, de tal modo que el término r_{ij} representa la prioridad relativa entre el criterio C_i y el criterio C_j , con respecto a la meta del problema. Este término será mayor, igual o inferior a uno, dependiendo de cuál de los dos criterios sea el más importante para el logro de la meta. La matriz obtenida tiene la siguiente forma:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Donde $r_{ij} \cdot r_{ji} = 1$. Una Matriz con esta propiedad se denomina **matriz recíproca**.

Para establecer las prioridades de los criterios (w_i), este método emplea los conceptos matemáticos de valor propio (autovalor) y vector propio (autovector).

Si los pesos (w , $i=1, 2, \dots, n$) fueran conocidos, la matriz de comparaciones pareadas tendría la siguiente configuración:

$$W = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix}$$

Si, se quisiera obtener el vector de pesos a partir de esta matriz, se debe resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$W * w = \lambda * w$$

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$$

Donde λ es un valor propio de W y w el vector propio asociado. La matriz W tiene una forma especial, además de ser una matriz recíproca, su rango es igual 1 debido a que cada fila es múltiplo constante de la primera. Por ello, esta matriz tiene **un único valor propio distinto de cero**. Como la suma de los valores propios de una matriz es igual a su traza (suma de los elementos de la diagonal principal) y todos los elementos de la diagonal principal son iguales a 1, puede afirmarse que el único valor propio distinto de cero de W es igual a la dimensión de la matriz, es decir igual a n ($\lambda = n$).

Se puede observar que la suma de los elementos de la matriz de cualquier columna j es igual a:

$$\frac{1}{w_j} \sum_{i=1}^n w_i = \frac{1}{w_j}$$

Por tanto, si se normaliza la matriz W mediante la suma de las columnas, en cada una de ellas se obtiene el vector w , por lo que el promedio de cualquier fila i será igual a w_i .

Dado que los pesos no son conocidos y la matriz de comparaciones R , se construye con los juicios del decisor, los que no necesariamente serán totalmente consistentes, la matriz R puede concebirse como una perturbación de la matriz W . Por tanto, puede que posea más de un valor propio distinto de cero. El máximo valor propio (λ_{max}) está asociado a un vector propio z , y se considera que z es una buena aproximación del vector de prioridades o pesos w . Por tanto, puede escribirse:

$$R * \hat{w} = \lambda_{max} \cdot \hat{w}$$

Basado en todos estos conceptos Saaty, propone estimar el vector de pesos (vector propio) aplicando el siguiente procedimiento:

1. Obtener la matriz normalizada (R_{Norm}), dividiendo cada elemento de la columna j -ésima por la suma de todos los elementos de dicha columna:

$$R_{Norm} = \left[r_{ijNorm} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \right]$$

2. Estimar el vector de pesos (\hat{w}) calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada. El vector \hat{w} de pesos será igual a:

$$\hat{w} = \left[\hat{w}_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{1jNorm}, \hat{w}_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{2jNorm}, \dots, \hat{w}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ijNorm}, \dots, \hat{w}_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{njNorm} \right]$$

3. Comprobar la consistencia de los juicios

Si R fuera una matriz completamente consistente¹, entonces el λ_{max} sería igual a n. Sin embargo, el decisor cometerá ciertas inconsistencias en sus juicios y resulta conveniente medir el grado de inconsistencia de los juicios emitidos por el decisor, dado que si no se ha sido cuidadoso con las valoraciones, el vector de prioridades o pesos obtenidos puede ser poco representativo.

La consistencia se puede medir mediante el índice de consistencia (IC), que tiene la siguiente expresión:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Esta medida puede utilizarse para mejorar la consistencia de los juicios, si se la compara con el número apropiado de la Tabla 2, que recoge el índice de *consistencia aleatorio* (IA):

Tabla 2. Índice de consistencia aleatorio (IA) en función de la dimensión de la matriz (n)

N	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404
N	9	10	11	12	13	14	15	16
RI	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

El índice de consistencia aleatorio (IA), se define como el índice de consistencia aleatorio medio obtenido mediante la simulación de 100.000 matrices recíprocas, generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty (1/9, 1/8, 1, ..., 8, 9) ver Tabla 1.

¹ Un matriz es consistente si satisface la condición $r_{ik} \cdot r_{kj} = r_{ij}$

Si se calcula el cociente entre el índice de consistencia (IC) y el índice de consistencia aleatorio (IA), se obtiene el denominado *ratio de consistencia (RC)*.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

- Si $RC = 0$, la matriz es consistente.
- Si $RC \leq 0.10$, la matriz R tiene una inconsistencia admisible, lo que significa que se la considera consistente y el vector de pesos obtenidos se admite como válido.
- En caso de que $RC > 0.10$, la inconsistencia es inadmisibles y se aconseja revisar los juicios.

Para calcular el índice de consistencia el valor de λ_{max} , se obtiene de la ecuación:

$$R \cdot \hat{w} = \lambda_{max} \hat{w}$$

Se multiplica la matriz R por el vector \hat{w} y se obtiene un vector columna, luego cada componente de él se divide por las del vector \hat{w} y se genera otro vector columna formado por los valores propios de la matriz R. Se promedian dichos valores y se obtiene λ_{max} .

4.2.1.2 Métodos determinísticos

Se utiliza para el estudio de la estabilidad de una ladera o talud concreto. Estos métodos están basados en el equilibrio límite o en modelos numéricos. Los datos de entrada son parámetros geotécnicos derivados de ensayos de laboratorio con el fin de calcular el factor de seguridad de la ladera. El grado de fiabilidad de estos métodos es alto en el caso en que los datos utilizados sean los adecuados. Sin embargo, su principal inconveniente es la baja idoneidad para zonificaciones rápidas y áreas extensas (Van Westen, 1993).

4.2.1.3 Metodología Geomorfológica

Se basa en la determinación de las condiciones de inestabilidad de una ladera mediante técnicas geomorfológicas y cartográficas. La validez y el detalle del análisis de los mapas resultantes son su principal ventaja, siempre que estos sean realizados por un buen experto. El grado de subjetividad es muy alto y depende directamente de la experiencia del profesional experto (García, 2008).

4.2.1.4 Metodología Probabilística o estadística

Se basa en las relaciones observadas entre cada factor y la distribución del deslizamiento actual y pasado (Carrara et al., 1995). Puede utilizarse cuando se dispone de abundante información, tanto cualitativa como cuantitativa, y aplicando los modelos estadísticos que pueden ser: bivariantes o multivariantes. Estos métodos se caracterizan por su objetividad. La potencia del método estadístico, depende directamente de la calidad y cantidad de los datos adquiridos, siendo en ocasiones el coste de adquisición de algunos factores, el principal inconveniente.

4.2.1.5 Metodologías alternativas

Se pueden considerar otras metodologías como: las redes neuronales, fuzzy o algoritmos genéticos (García, 2008), para la evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos de laderas.

En la Figura 5, se presenta un diagrama con las metodologías más empleadas para la evaluación de la amenaza y susceptibilidad a los movimientos en masa, que abarca desde la metodología determinista, semi-cuantitativa, estadística, que se subdivide a su vez en dos grupos, bivariado y multivariado, redes neuronales y fuzzy.

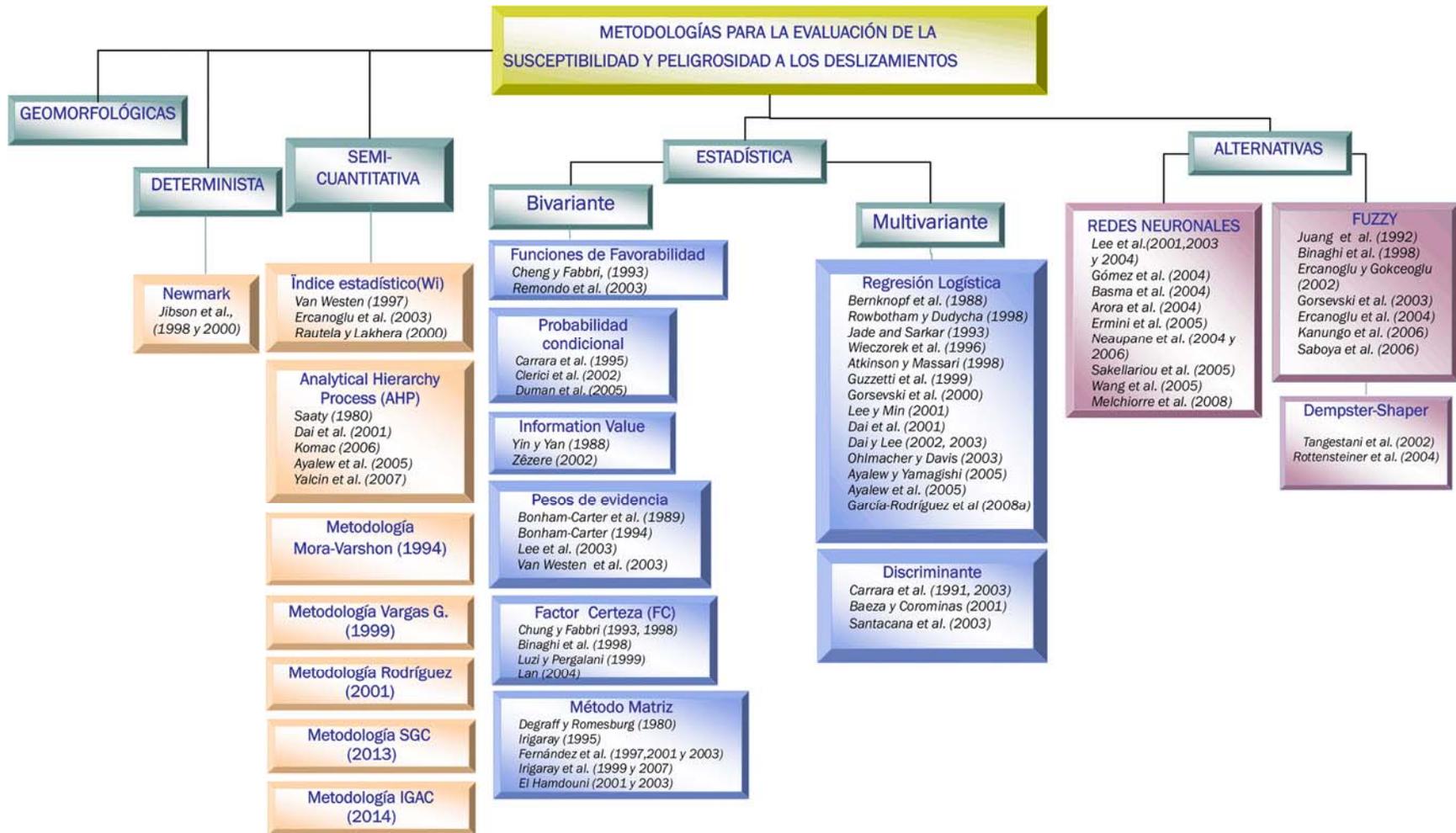


Figura 5. Diagrama con las metodologías más empleadas para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos de laderas. modificado de García (2008, p. 55)

5 Información Básica e Insumos Generales

La zonificación de amenaza por movimientos en masa, está sujeta al uso de información básica e insumos generales, como bases cartográficas, modelo digital de elevación (DEM) y sensores remotos. Estos elementos permiten definir y delimitar correctamente el área de estudio, los objetivos generales y específicos, y los alcances del presente trabajo. Además, se utilizan mapas temáticos con información interdisciplinaria relacionada, tales como: geología general, geomorfología, cobertura de la tierra, suelos, clima, entre otros (SGC, 2013).

5.1 Base Cartográfica

Se utilizó la base cartográfica de la zona, correspondiente a la Plancha topográfica básica No 118 – San Francisco, a escala 1:100.000, suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC (2005). La información contenida en esta base cartográfica comprende curvas de nivel cada 100 m, redes de drenaje, cuerpos de agua, orografía, límites administrativos y construcciones, entre otros. A partir de este insumo, la información representada cartográficamente se encuentra georreferenciada en el sistema de coordenadas Magna Sirgas (Figura 6).

5.2 Cartografía temática

En la Tabla 3. Se relacionan los insumos adquiridos y suministrados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), que fueron utilizados para la generación del Mapa de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:100.000.

5.3 Modelo Digital de Elevación

Los modelos digitales de elevación (DEM) son archivos en formato *raster* que representan la elevación por medio de píxeles que cubren un área rectangular determinada a una escala específica. Un modelo digital de elevación permite generar mapas del relieve del

terreno y modelos de sombras en tres dimensiones, usualmente a una resolución de 30 x 30 metros de tamaño de pixel.

El modelo digital de elevación utilizado para la elaboración del mapa de zonificación de amenazas por movimientos en masa para generar las variables geométricas y el mapa de sombras de la Plancha 118 – San Francisco, fue suministrado por el IGAC, y producido por la misión SRTM del año 2000 a una resolución de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m en el Ecuador) para casi todo el globo terráqueo, entre las latitudes 60 grados norte y 56 grados sur (Farr, 2007) con un error de altitud vertical medio de 6,2 m (nivel de confianza de 90%) y un error de geolocalización de 9 m para Suramérica (Rodríguez, 2006).

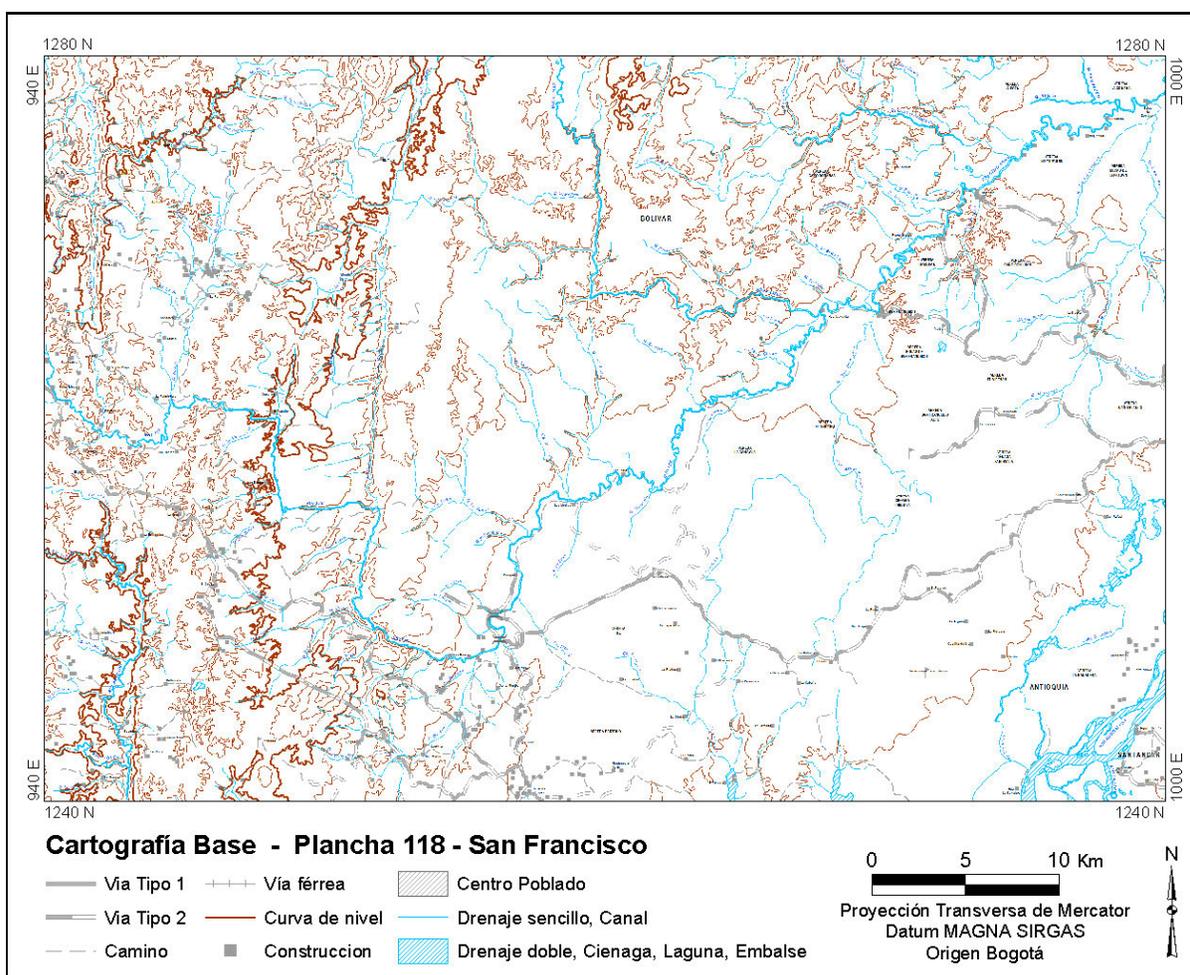


Figura 6. Cartografía Base, Plancha 118 - San Francisco

Tabla 3. Lista de insumos para la elaboración de la zonificación de la susceptibilidad y amenaza. UP (2015)

INSUMOS	ESCALA	RESOLUCIÓN	FORMATO	FUENTE
Cartografía Base	1:100.000		GeoDataBase	IGAC
Modelo Digital de Elevación	1:100.000	1 arco seg (30,86 m)	Raster	NASA (IGAC)
DEM ALOS PALSAR	1:100.000	12,5 metros	Raster	Alaska Satellite Facility
Imágenes Landsat 7 y 8	1:100.000	30 y 15 m	Raster	NASA (USGC)
Imágenes Sentinel	1:100.000	10 m	Raster	ESA
Imágenes RapidEye	1:100.000	7 m	Raster	BNI (IGAC)
Imágenes Google Earth	1:100.000	1 m	Raster	Google Earth, Bing Map, World Imagery
Fotografías Aéreas a color (Ortofoto)	1:10.000	30 cm	Raster	IGAC - CORANTIOQUIA
Planchas y memorias de unidades geológicas	1:250.000		Vector	SGC
Mapa y memorias de suelos	1:100.000		Vector	IGAC
Capa cobertura IDEAM-IGAC norte	1:100.000		Vector	IDEAM
Detonante Sismo	1:100.000		Vector	SGC
Detonante Lluvia	1:100.000		Vector	IDEAM
Documento metodológico de la zonificación de la Susceptibilidad y amenaza por movimiento en masa escala 1:100.000	No aplica		Digital	SGC
Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicado a la zonificación de amenaza por movimiento en masa escala 1:100.000	No aplica		Digital	SGC
Documento Movimientos en masa de la región andina: Una guía para la evaluación de la amenaza	No aplica		Digital	SGC

El modelo de sombras en conjunto con la base cartográfica se empleó principalmente para definir las unidades geomorfológicas y estructuras geológicas presentes en el área superficial de la Plancha 118-San Francisco siguiendo con los parámetros y lineamientos de clasificación establecidos por el Servicio Geológico Colombiano – SGC (2013) (Figura 7).

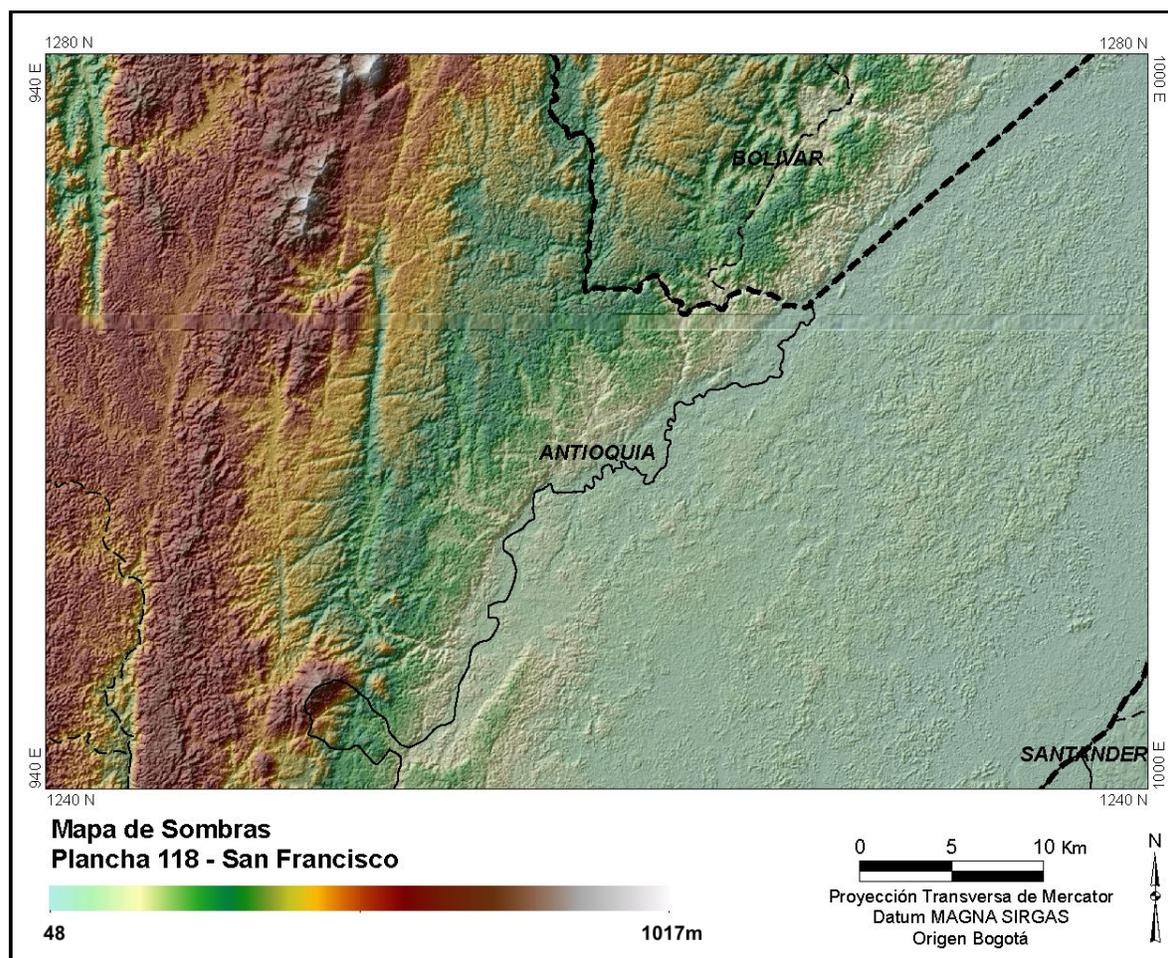


Figura 7. Superposición del Modelo Digital del Elevación con el mapa de sombras para la Plancha 118 - San Francisco

5.4 Imágenes de sensores remotos

Los sensores remotos son herramientas utilizadas para la identificación e interpretación temática basada en la captura de la energía reflejada por los objetos sobre la superficie de la tierra; y luego se encargan de convertir la energía en una señal registrada y presentada en una imagen de una forma adecuada, que permita obtener información de interés (Servicio Geológico Colombiano – SGC, 2013).

Las imágenes de satélite (SPOT y LANDSAT), presentan grandes ventajas en la identificación y cartografía de elementos del terreno, debido a su resolución espacial (10-20 m/píxel en SPOT y 15-30 m/píxel en LANDSAT).

Para la fotointerpretación de la plancha 118 – San Francisco, se utilizó un set de imágenes Landsat que cubren la zona y tomadas en diferentes fechas; para compensar las coberturas de nubes, de algunas imágenes, se utilizaron combinaciones con las bandas (543) y (654), (Figura 8).

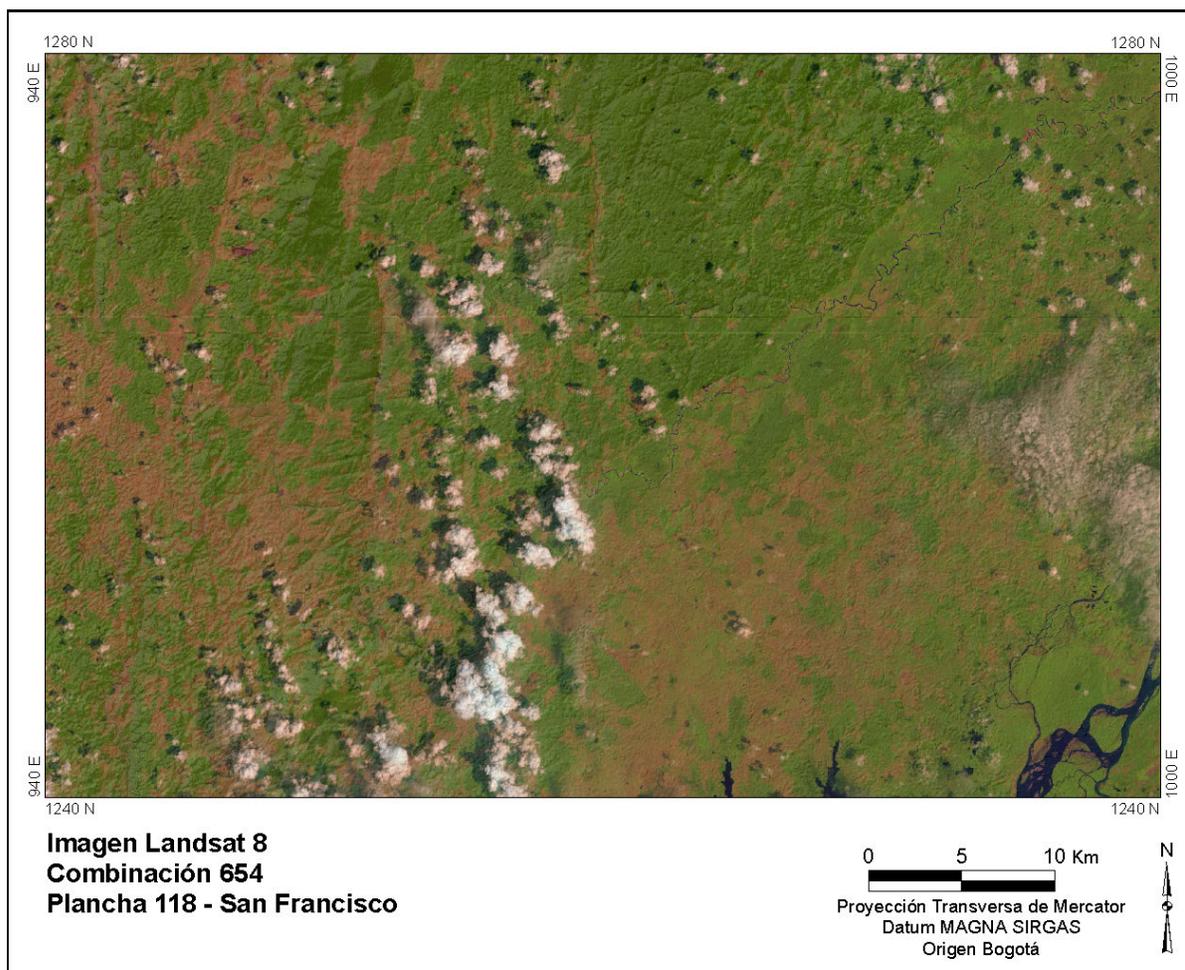


Figura 8. Imagen Landsat 8, combinación 654

La fotogrametría es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de fotografías aéreas, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado. Uno de los productos de la

fotogrametría digital es la ortofoto. Una Ortofoto es una fotografía o un conjunto de fotografías cuyas imágenes de los objetos se encuentran en su verdadera posición planimétrica.

En la Figura 9, se observa una Ortofoto empleada en el proyecto, cuenta con una resolución espacial de 50 cm, una resolución espectral de 4 bandas y fecha de toma en el 2011. Esta ortofoto, fue obtenida a partir del servidor WMS de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia). Esta ortofoto ampliada a mayor tamaño, fue de gran utilidad para la observación, captura e inventario de los movimientos en masa, detección de procesos de erosión e identificación de la cobertura de la tierra y usos de los suelos.

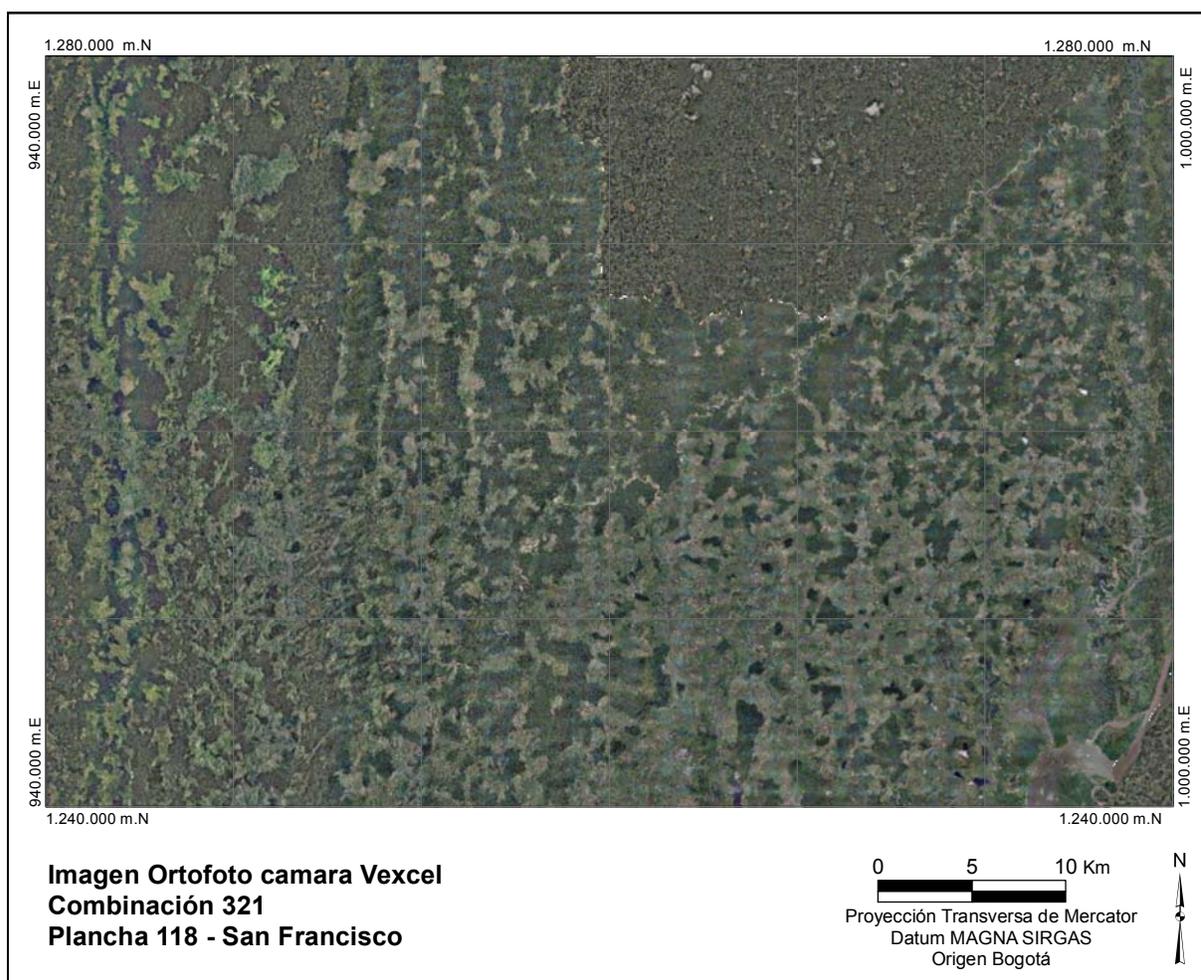


Figura 9. Ortofotomosaico del sensor Vexcel Ultracam-D en combinación 321

El radar es un sensor activo que se desplaza a bordo de una plataforma (avión o satélite) y registra información en el rango de las microondas, emitiendo pulsos de energía hacia la superficie terrestre y luego almacena las señales de respuesta de los objetos sobre la superficie de la Tierra. El radar trabaja con pulsos de energía emitidos artificialmente, por eso los sistemas de radar permiten controlar las condiciones de la adquisición, frecuencia, polarización y geometría de la observación y pueden coleccionar datos tanto de día como de noche; esto es muy ventajoso en las regiones tropicales cubiertas por bosque y alta nubosidad y en las zonas polares, donde los prolongados períodos de oscuridad dificultan la adquisición de imágenes convencionales. El RADAR (Radio Detection And Ranging), es un sistema de teledetección, que transmite pulsos de microondas que van barriendo la superficie terrestre y recibe la porción de energía que es reflejada (o retrodispersada) de vuelta hacia el sensor. En el proyecto, se utilizó una serie de imágenes Sentinel 1, las cuales tienen una resolución espacial de 10 metros en Banda C y la polarización en VV y VH., ver Figura 10.

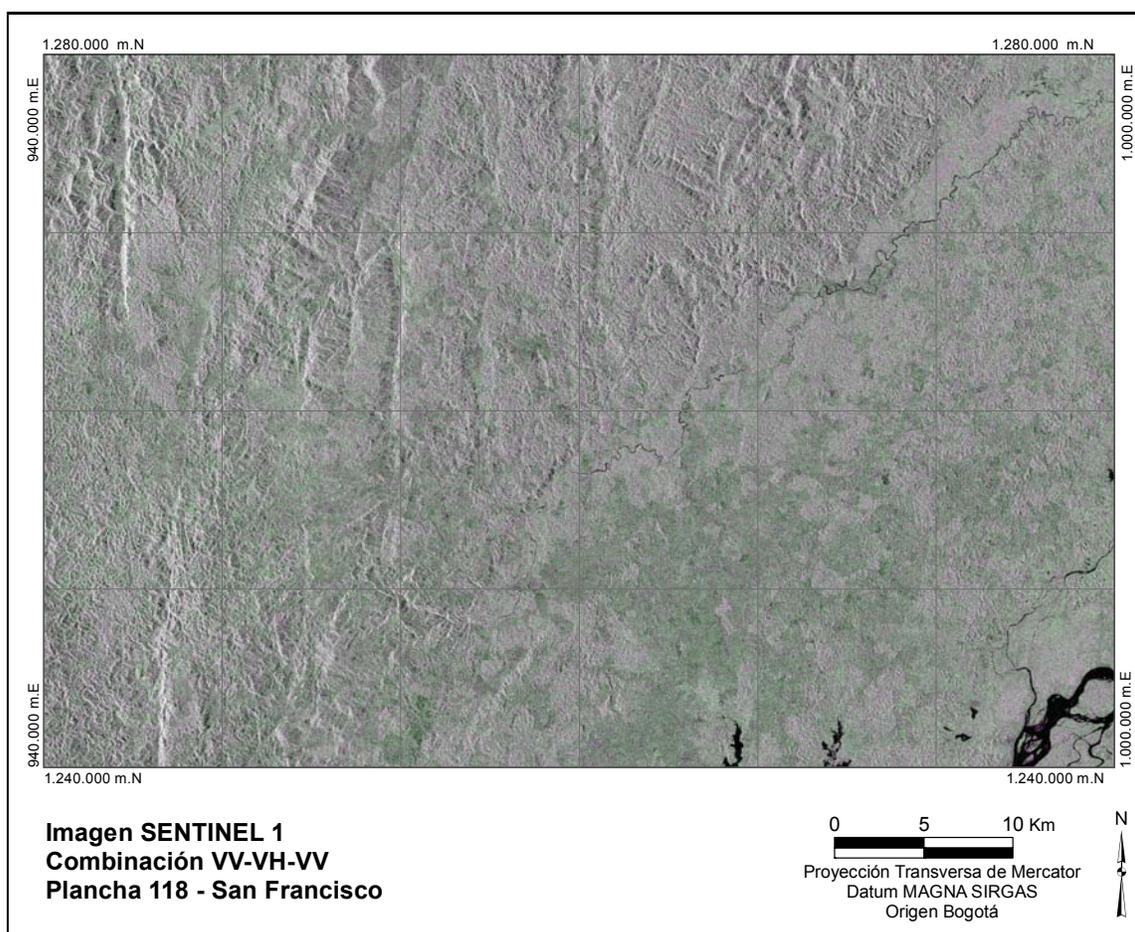


Figura 10. Imagen de Radar Sentinel 1, con la Combinación de las polarizaciones VV-VH-VV

6 Metodología

Para la generación del mapa de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa se emplearon variables cualitativas (geología, geomorfología, suelos y cobertura de la tierra) y cuantitativas (pendiente, longitud de la pendiente, rugosidad y acuenca); estas últimas, se derivaron del modelo digital de elevación (DEM). Se aplicó un enfoque heurístico a partir del trabajo realizado en la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:100.000 del año 2011, elaborado por el Servicio Geológico Colombiano. Se aplicó un análisis multicriterio que involucra la utilización de datos geográficos, debiendo establecer las preferencias y combinaciones (o agregaciones) de los datos y de acuerdo con las reglas de decisiones específicas que han sido implementadas en ambiente SIG (Malczewski, 2006). Para los efectos de los análisis heurísticos y para determinar el Índice de Susceptibilidad a los Movimientos en masa, se propuso la utilización de procesos de análisis jerárquicos (AHP, por sus siglas en inglés).

En la Figura 11, se presenta la metodología utilizada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), para la elaboración del mapa Nacional de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa, escala 1:100.000.

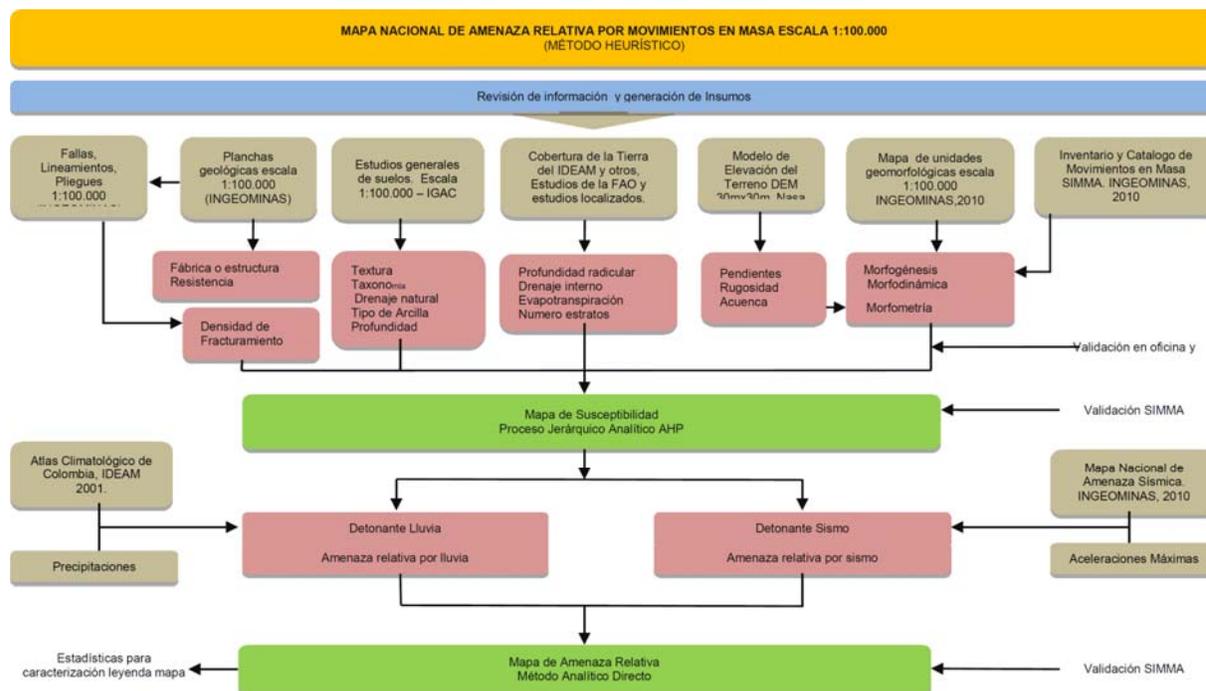


Figura 11. Diagrama metodológico para zonificación de la amenaza nacional desarrollado por el SGC

6.1 Cálculo de susceptibilidad de cada una de las variables empleando la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013)

6.1.1 Geología

La geología representa un insumo temático muy importante para la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa. Las variables geológicas están controladas principalmente por: la litología, teniendo en cuenta los elementos básicos, junto con las propiedades y características de los materiales rocosos. La clasificación litológica fue propuesta por la Comisión de Cartografía de la International Association of Engineering Geology (IAEG) en 1981.

La unidad de mapeo implementada en el presente trabajo corresponde al EG (Grupo de ingeniería) propuesta por el ENGINEERING GEOLOGICAL MAPPING IAEG en UNESCO (1976). Esta unidad abarca las unidades litoestratigráficas con características paleogeográficas, tectónicas y litológicas similares. Para la ponderación de la calidad de la roca, se tuvieron en cuenta tres atributos: densidad de fracturamiento, fábrica y/o estructura y resistencia (Figura 12).

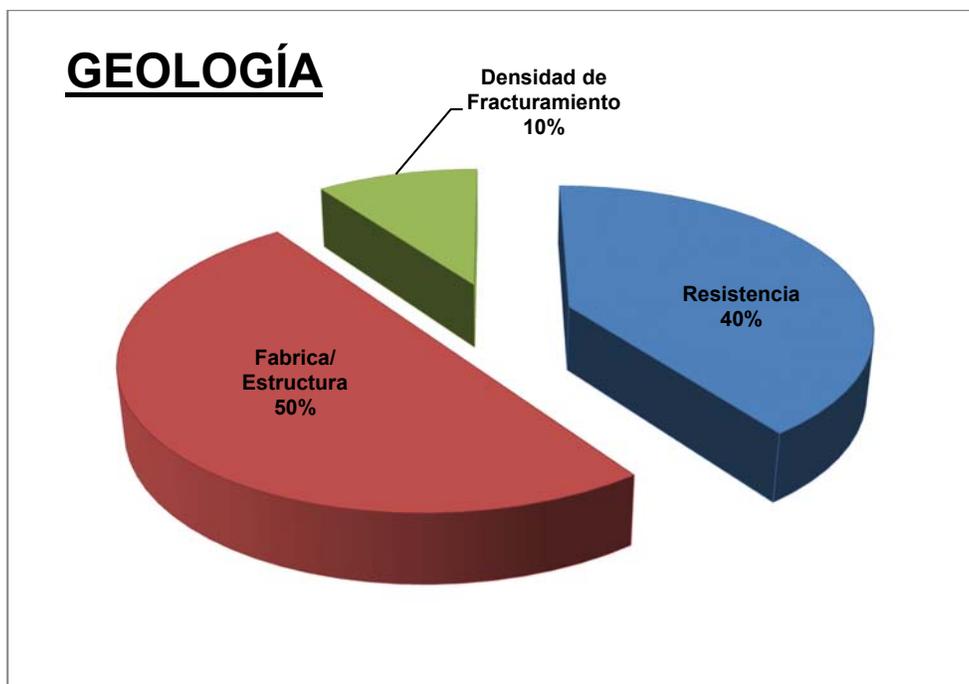


Figura 12. Ponderación de la calidad de la roca, según los atributos establecidos para definir las características de las unidades geológicas (Modificado de SGC, 2013).

6.1.1.1 Densidad de fracturamiento

La densidad de fracturamiento es un atributo que depende mucho de los sistemas de fallas presentes en la zona y su acción sobre las unidades litológicas observadas. Esta variable se genera con base en las fallas calificadas del proyecto “Zonificación de Amenazas por Movimientos en Masa escala 1:500.000” y teniendo en cuenta las estructuras del Mapa Geológico de Colombia (INGEOMINAS, 2007) escala 1:500.000. Durante el estudio, se analizaron: las fallas, pliegues, y lineamientos. En la Tabla 4 se muestran los rangos de densidad y su clasificación de susceptibilidad a nivel nacional.

Tabla 4. Rangos de densidad y clasificación de susceptibilidad a nivel nacional (Servicio Geológico Colombiano -SGC, 2013)

Rango de densidad (m/km ²)	Descripción	Clasificación
0.089 – 2.215	Muy baja	1
2.215 – 3.809	Baja	2
3.809 – 5.404	Media	3
5.404 – 7.530	Alta	4
7.530 – 22.591	Muy alta	5

Hacia el occidente del área de trabajo, domina una zona montañosa que corresponde a la parte suroriental de la Serranía de San Lucas, donde se evidencian dos grupos de lineamientos: uno en dirección N-S, al occidente dominado por el Sistema de Fallas de Palestina, y otro en dirección NE-SW, al oriente donde sobresale la Falla Resbalón. La parte oriental de la plancha es muy plana y corresponde a la parte occidental y más distal del Valle Medio del río Magdalena.

En la plancha 118, la variable densidad de fracturamiento varía de 1 a 5, de la siguiente manera (Figura 13):

- **Densidad de fracturamiento muy alta (5):** en la plancha 118 – San Francisco, está dada por rocas del Neis de San Lucas (MPsl) y el Batolito de Segovia (J2Se), muy afectadas por el Sistema de Fallas de Palestina.
- **Densidad de fracturamiento alta (4):** en la plancha 118 – San Francisco, está dada por rocas afectadas por la confluencia entre las fallas del Sistema de Palestina y el bloque occidental, donde se encuentran: la Formación Mesa (N2m), las Sedimentitas de Segovia

(KSe), el Batolito de Segovia (J2Se), la Formación Malena (J1Ma), y el Neis de San Lucas (MPsl).

- **Densidad de fracturamiento moderada (3):** está asociado a algunos lineamientos de las fallas principales.
- **Densidad de fracturamiento baja (2):** está asociada a los lineamientos, como también a las fallas de la plancha.
- **Densidad de fracturamiento muy baja (1):** está asociada a la zona más distal, donde están las áreas con densidad de fracturamiento baja.

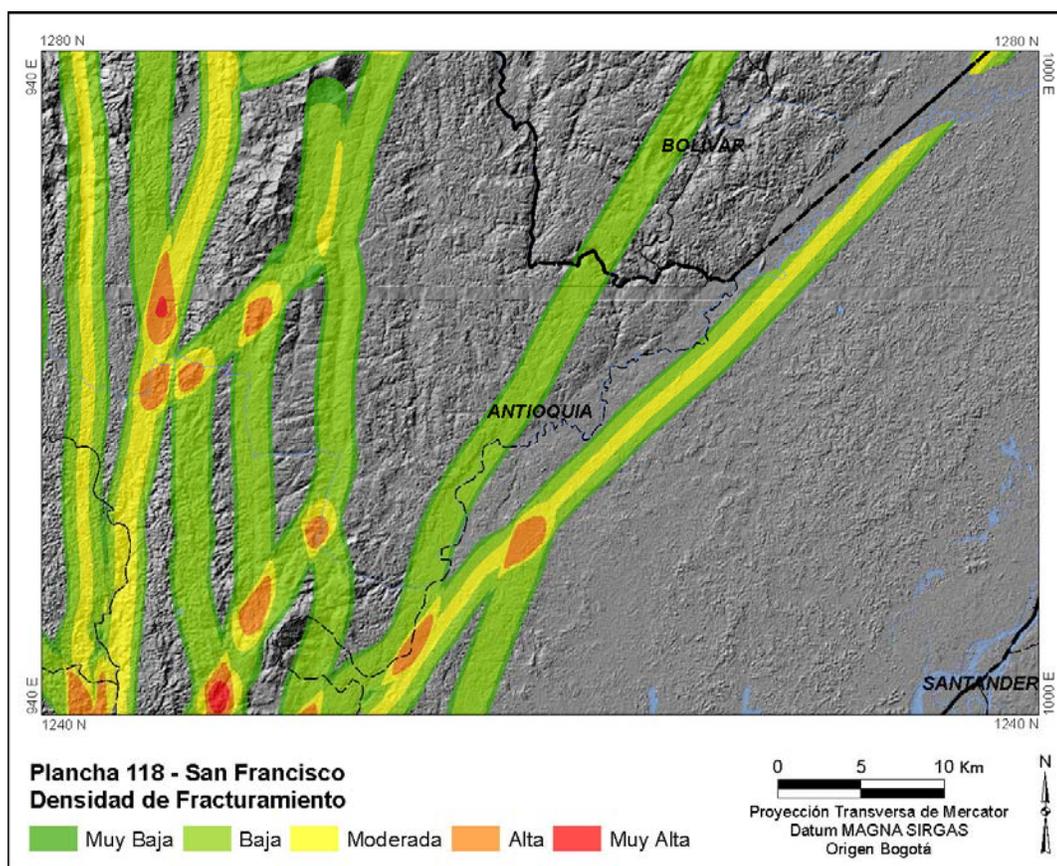


Figura 13. Mapa de calificación del atributo Densidad de Fracturamiento con respecto a la susceptibilidad a los movimientos en masa, Plancha 118 – San Francisco

6.1.1.2 Fabrica y/o Estructura

El comportamiento de los suelos y las rocas depende de la fábrica, principalmente debido a la anisotropía que se genera según la orientación de las partículas y afectando las propiedades geomecánicas de la roca. Las rocas se pueden clasificar según su fábrica/estructura, siendo útil esta clasificación para establecer las diferencias de

comportamiento de las rocas en cuanto a su resistencia y direccionalidad de las propiedades mecánicas (SGC, 2013).

En la Tabla 5. Se presenta la clasificación del atributo Textura/Fábrica y su correspondiente clasificación.

Tabla 5. Clasificación del atributo Textura/Fábrica, y la calificación propuesta por el SGC.

Calificación propuesta por el SGC	Textura/Fábrica	Descripción
1	Cristalina Masiva	En rocas de cualquier origen (ígneo, metamórfico o sedimentario) cuyas partículas minerales están entrelazadas y con orientación aleatoria. Corresponde a las rocas más resistentes y menos deformables, salvo las rocas volcánicas cuya calidad es un poco dispersa, según sean porosas o no lo sean. Ejemplos: granitos, basaltos, calizas, cherts, cuarcitas y mármoles.
2	Cristalina Bandeada	En rocas cuyas partículas minerales, están mecánicamente entrelazadas, conformando bandas composicionales con alguna influencia direccional. Ejemplo: Neis.
3	Clástica Cementada	En rocas con partículas cementadas, con resistencia y deformación variable, dependiendo de la calidad del material cementante, la relación matriz-clastos y el grado de empaquetamiento general que posea. Ejemplos: areniscas y conglomerados.
4	Clástica Consolidada	En estas rocas presentan comportamiento variable esfuerzo-deformación, con direccionalidad de sus propiedades mecánicas. La resistencia se acrecienta con el grado de consolidación diagenética. Ejemplos: arcillolitas, lodolitas y shales.
5	Cristalina Foliada Rocas de Falla	En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, con una orientación preferencial a lo largo de la cual las rocas son menos resistentes. Su calidad se dispersa como consecuencia de su fábrica orientada, es decir, por los planos de esquistosidad y foliación. Ejemplos: Pizarras, filitas, esquistos y milonitas.

Fuente: (SGC, 2013)

6.1.1.3 Resistencia

Las propiedades mecánicas de las rocas, incluyen la resistencia a la compresión simple, impacto y penetración por otro cuerpo. Estas propiedades, son el producto de la composición química y mineralógica de los materiales, como también de su textura y de su estructura, lo que permite caracterizar la resistencia de los materiales frente a los agentes de deterioro.

Los rangos de referencia que se adoptan son los incluidos en el Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza Relativa por Movimientos en

Masa (Servicio Geológico Colombiano, 2013) y están basados en información documentada, los datos de Fabrica y estructura a nivel nacional e internacional.

En la Tabla 6, se presenta la calificación propuesta para los diferentes tipos de rocas dependiendo de su resistencia, según Hooke, 1996 y el SGC. Los rangos de resistencia utilizados para las diferentes unidades calificadas, fueron tomados de la Tabla 7., del *documento metodológico para la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000*, del SGC, 2013.

Tabla 6. Categorías de resistencia a la compresión simple de las rocas, según Hooke, 1996, y la calificación correspondiente de acuerdo al SGC.

Grado	Nombre	Resistencia a la compresión (Mpa)	Calificación
R6	Extremadamente dura	>250	1
R5	Muy dura	100-250	1
R4	Dura	50-100	2
R3	Moderadamente dura	25-50	3
R2	Blanda	5-25	4
R1	Muy blanda	1-5	5
R0	Extremadamente blanda	0,25-1	5

Fuente: (SGC, 2013)

6.1.1.4. Atributos en suelos y depósitos

En el Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza Relativa por Movimientos en Masa (Servicio Geológico Colombiano – SGC, 2013), se le atribuye a los depósitos en general, una resistencia menor de 10 Kg/cm², que corresponde a un valor razonable para este tipo de unidad litológica. Para la ponderación de los depósitos, se tiene en cuenta esta frontera de resistencia y su comportamiento en taludes y laderas del país. La clasificación de los depósitos, de acuerdo con la metodología, se realiza según el ambiente morfogenético predominante en 7 grupos:

Tabla 7. Clasificación de las unidades litológicas (Depósitos).

Ambiente	Depósito	Calificación
Denudacional	Depósitos coluviales	5
	Depósitos de detritos	4
	Depósitos de tierras	5
	Depósitos de terraza sobre elevada	4
	Depósitos costras ferruginosas o calcáreas	1
	Depósitos de lodos	5

Ambiente	Depósito	Calificación
Fluvial y Lagunar	Depósitos de cauce y llanura aluvial	1
	Depósitos de terrazas aluvial	2
	Depósitos paludales	1
	Depósitos lagunares o lacustres	1
	Depósitos de abanicos aluviales	3
Marino	Depósitos marino aluviales (fluviomarinos)	2
	Depósitos intermareales	1
	Sustrato de manglar	1
	Depósitos de playón	1
	Depósitos de origen arrecifal	1,5
	Depósitos de playas y dunas	1,5
Eólico	Depósito de arenas	2
	Depósito de loes	2,5
Volcánico	Depósito de caída piroclástica	5
	Depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza	4
	Depósito de flujo piroclástico de ceniza y pómez o ignimbrita	5
	Depósito de oleada piroclástica	5
	Depósito de avalancha de escombros	4
	Depósito de flujo de escombros o lahar o flujo de lodo volcánico	3
Glacial y periglacial	Depósitos fluvioglaciares/glaciofluviales	4
	Depósitos glaciolacustres	2
	Depósito glacial till de ablación	3,5
	Depósito glacial till basal	3
Antropogénico	Rellenos de basuras o rellenos sanitarios	5

Fuente: (SGC, 2013)

6.1.1.5 .Mapa de susceptibilidad total de la variable geología

La susceptibilidad por parámetros geológicos define las propiedades inherentes del terreno a desarrollar movimientos en masa y marca tendencia a partir de la composición de los materiales del subsuelo, la capacidad de soportar esfuerzos y la respuesta de dichos materiales expresada en términos de fracturamiento y deformación.

La susceptibilidad por la geología describe un escenario preliminar y natural del tipo de material que constituye el subsuelo y es representado en un modelo vectorial constituido por los atributos: Calificación Textura, Calificación Resistencia y Calificación Densidad de Fracturamiento:

0,5 (Calificación Textura/Fábrica)

+ 0,4 (Calificación Resistencia)

+ 0,1(Calificación Densidad de Fracturamiento)

Susceptibilidad Geológica

Una vez se obtiene la susceptibilidad geológica de las unidades rocosas, se incorporan los depósitos, para obtener el mapa de susceptibilidad geológica de la Plancha 118 – San Francisco, ver Figura 14.

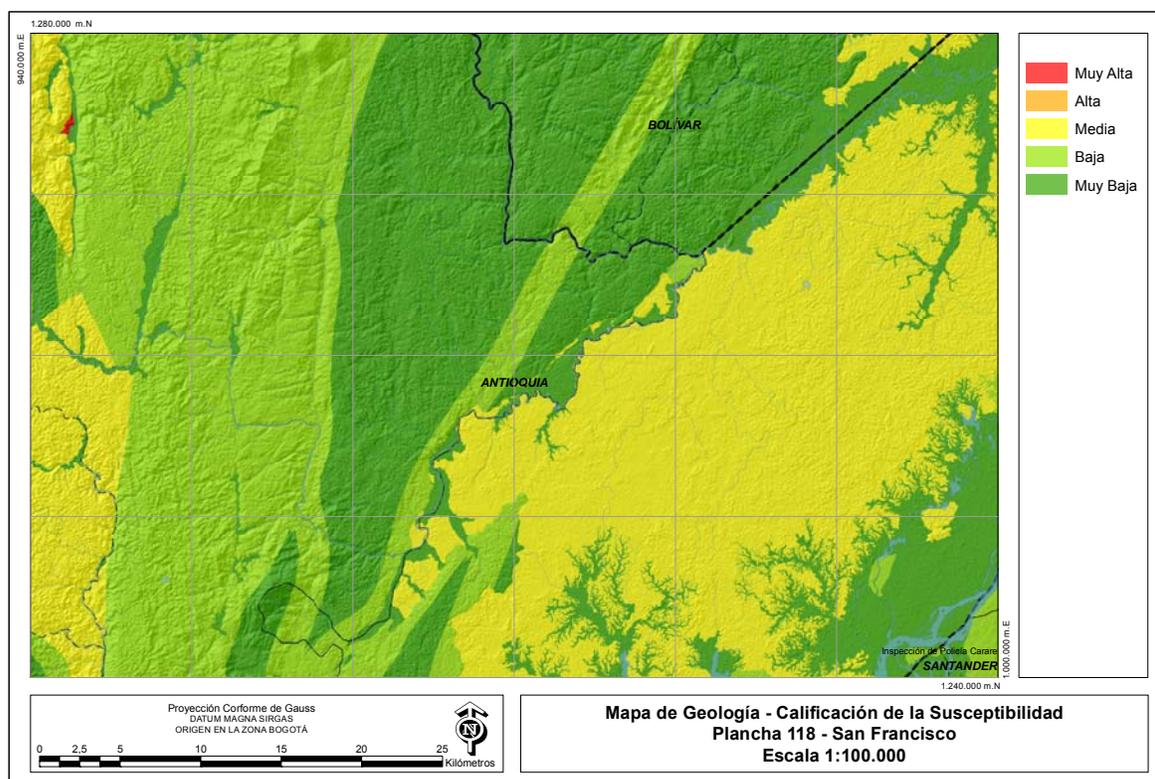


Figura 14. Mapa de calificación de la variable geológica con respecto a la susceptibilidad a los movimientos en masa, Plancha 118 – San Francisco

6.1.2 Suelos Edáficos

En su significado tradicional, el suelo es el medio natural por excelencia para el desarrollo de las plantas terrestres; ya sea que tenga o no horizontes discernibles. Una definición más estructurada es: “El suelo es un cuerpo natural compuesto de material sólido (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurre en la superficie de tierra, ocupa un

espacio y se caracteriza porque tiene horizontes o capas que lo diferencian del material parental inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, traslocaciones y transformaciones de energía y materia y/ o porque es capaz de soportar plantas establecidas o arraigadas en un ambiente natural” (SSS, 1998, 1999).

6.1.2.1 Textura

Para la calificación del atributo textura, se debe tener en cuenta la variabilidad de este dentro del perfil, debido a que cada horizonte puede poseer una categoría textural diferente (ver Tabla 8), por lo tanto, se tabulan los horizontes que posee cada perfil, con su profundidad inicial, final y su clase textural; como cada horizonte posee un espesor, este determina el peso dentro del perfil a través del cociente del espesor del horizonte, sobre la profundidad del perfil, de tal modo que el promedio ponderado de todos los horizontes del perfil sea la susceptibilidad textural del perfil.

Tabla 8. Calificación de la textura de los suelos

Clase textural	Calificación
Gr, A, FAGrP,	1
AF, FAGr, FArAGr, FArGr, FGr,	2
ArA, ArGr, FA, FArLGr,	3
F, F Org, FAr, FArA, FArL,FL, FLOrg,	4
Ar, ArL,	5

Fuente: (SGC, 2013)

A= Arena; L= Limo; Ar= Arcilla; F= Franco; Gr= Grava; P= Piedra; Org=Orgánico

6.1.2.2 Taxonomía

Para la calificación, se toma el nivel del Orden de cada componente taxonómico, dentro de las unidades cartográficas de suelos sujetas a la evaluación ver Tabla 9.

Tabla 9. Calificación de la taxonomía de los suelos a nivel de Orden

Orden de suelos	Calificación
Oxisol, Ultisol.	1
Alfisol.	2
Mollisol, Andisol, Espodosol.	3
Vertisol, Aridisol.	4
Inceptisol, Entisol, Histosol.	5

Fuente: (SGC, 2013)

6.1.2.3 Drenaje Natural

Este atributo está muy relacionado con las características del relieve, especialmente la pendiente y su forma, es así como en pendientes pronunciadas (>4% y de forma rectilínea y plano convexas, el agua tiende a fluir y escurrirse sobre la superficie terrestre, en contraposición a pendientes más suaves y de forma plana o cóncava, donde el agua tiende a estancarse e infiltrarse en el suelo, en su conjunto el movimiento del agua que entra al suelo y/o corre en su superficie, definen la condición de drenaje, la cual a su vez tiene relación directa con el régimen de humedad del suelo. Esta propiedad además tiene relación directa con la textura del suelo, la estructura, la densidad aparente que condicionan la porosidad y la circulación del agua, caracterizados por la velocidad de infiltración y a la conductividad hidráulica del suelo. La variable es leída directamente de los perfiles modales, que caracterizan a cada unidad de los suelos y es calificada de acuerdo a su susceptibilidad con la Tabla 10.

Tabla 10. Calificación del drenaje natural del suelo

Clase	Categoría de susceptibilidad
Excesivo	1
Moderado excesivo	
Bueno (Bien)	2
Moderado	3
Imperfecto	4
Pobre	
Muy pobre	5
Pantanosos	

Fuente: (SGC, 2013)

6.1.2.4 Profundidad total del suelo

La metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013), hace referencia a la profundidad total de perfil, hasta donde fue descrito y no la profundidad efectiva para fines agronómicos, el cual puede ser restringido por limitantes tanto físicos, como químicos (nivel freático, sales o sodio, entre otros).

Tabla 11. Calificación de profundidad total

Profundidad (cm)	Calificación
0 - 25	1
25 - 50	2
50 - 100	3
100 - 150	4
mayor a 150	5

Fuente: (SGC, 2013)

6.1.2.5 Tipo de Arcilla

Con base en la Tabla 12, se califican las UCS de acuerdo con el tipo de arcilla, a partir de la génesis y evolución de los suelos.

Tabla 12. Calificación del tipo de arcilla.

Grupos de tipo de arcilla	Calificación	Tipo	Subgrupo	Orden
Caolinita Caolinita, Biotita	1	1:1	Oxisoles	Oxisoles Espodosoles Ultisoles
Caolinita, Sesquioxidos, Montmorillonita, Vermiculita Caolinita, Gipsita, Muscovita, Montmorillonita	2	1:1 2:1	Ultisoles Espodosoles	Entisoles Inceptisoles
Montmorillonita, Clorita, Caolinita Montmorillonita, Vermiculita, Caolinita	3	2:1 1:1	Mollisoles Aridisoles Inceptisoles Entisoles Alfisolos, Sub. Vertic	Mollisoles Aridisoles Alfisolos
Muscovita, illita, Vermiculita, Montmorillonita Muscovita, Montmorillonita, Vermiculita Talco, Muscovita, Vermiculita, Montmorillonita	4	2:1 2:2	Vertisoles	Vertisoles
Alofana, Gipsita, Halloisita, Imogolita Montmorillonita, Vermiculita M.O	5	2:1 1:1 2:2	Andisoles Histosoles	Andisoles Histosoles

Fuente: (SGC, 2013)

Una vez determinada la calificación de todos los atributos del indicador de suelos, se procede a integrar bajo la ecuación de susceptibilidad según el (SGC, 2013), mediante la suma de las calificaciones de las variables (calificadas de 1 a 5) y multiplicadas a su vez por el peso que se le dio a cada una de ellas, para las UCS, en la siguiente forma:

$$C = 0.3 * Te + 0.15 * Ta + 0.2 * Pt + 0.2 * Ar + 0.15D$$

Donde:

C = Calificación total dada a las unidades de suelos (1 a 5)

Te = Textura ponderada del perfil modal del suelo, asignada a cada unidad de suelos con un peso en la función de 0,30

Ta = Calificación de la taxonomía a nivel de orden con un peso de 0,15, también puede ser a nivel de subgrupo según criterio del experto

Pt = Profundidad total del suelo, peso de 0,20.

Ar = Calificación del tipo de arcilla, peso 0,20.

D = Drenaje natural, peso 0,15

El resultado obtenido de la susceptibilidad mediante la metodología del (SGC, 2013) aplicando los criterios y ponderación se ilustra en la Figura 15.

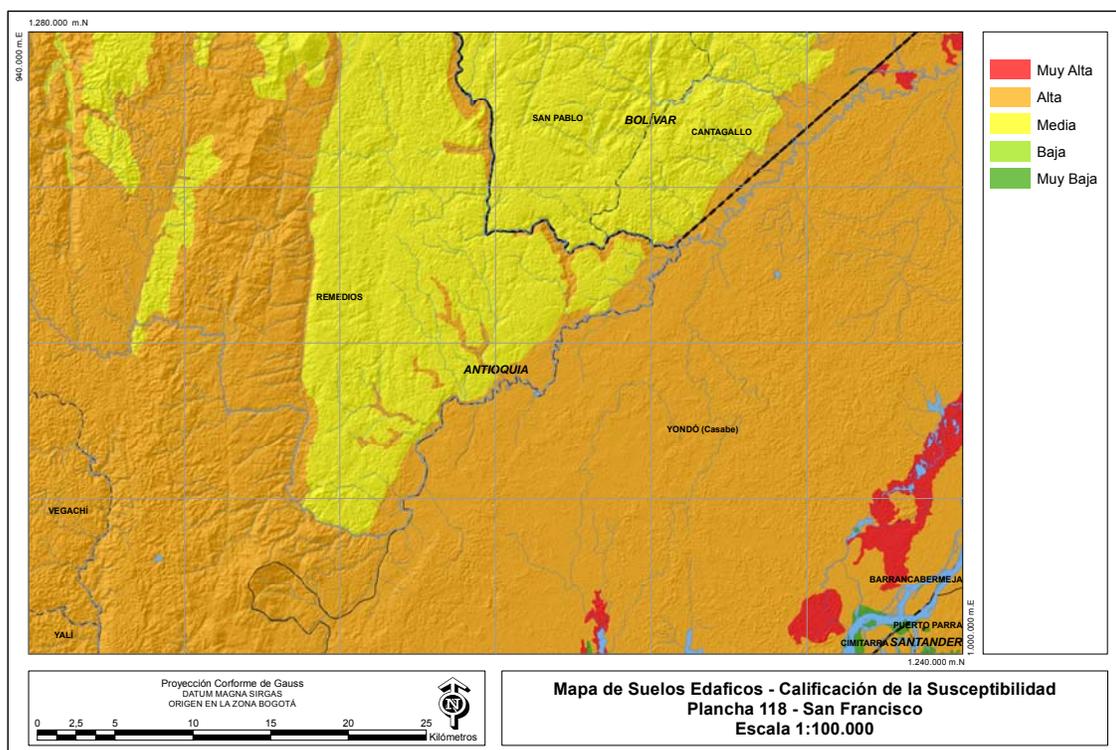


Figura 15. Mapa de la susceptibilidad de la variable suelos edáficos

6.1.3 Cobertura

La vegetación es un elemento del paisaje que favorece y coadyuda en la protección del suelo y el desarrollo sostenible de las regiones, que incluye un equilibrio entre los componentes sociales, económicos, ambientales y ecológicos. Un aporte importante de la cobertura vegetal es en la regulación del ciclo hidrológico, que mitiga y controla en gran medida grandes avenidas o crecientes torrenciales.

Las coberturas vegetales y en especial las áreas boscosas, se ven amenazadas por las actividades humanas ligadas a sistemas de producción extensivo (agrícola, ganadero y minero), sobrepastoreo, que induce los cambios en los patrones de distribución de las comunidades vegetales.

Los efectos de la vegetación sobre el suelo, incluye la regulación del ciclo hidrológico debido a la interceptación de la lluvia que evita la erosión pluvial por goteo y la transpiración de las plantas que elimina gran cantidad de agua del sustrato indicando que las precipitaciones intensas son una de las causas de la ocurrencia de los deslizamientos, (Figura 16). Para el presente estudio se evaluaron cuatro atributos: profundidad radicular, drenaje profundo, evapotranspiración y número de estratos, que aportaron a la construcción del modelo de susceptibilidad a la amenaza por remoción en masa.

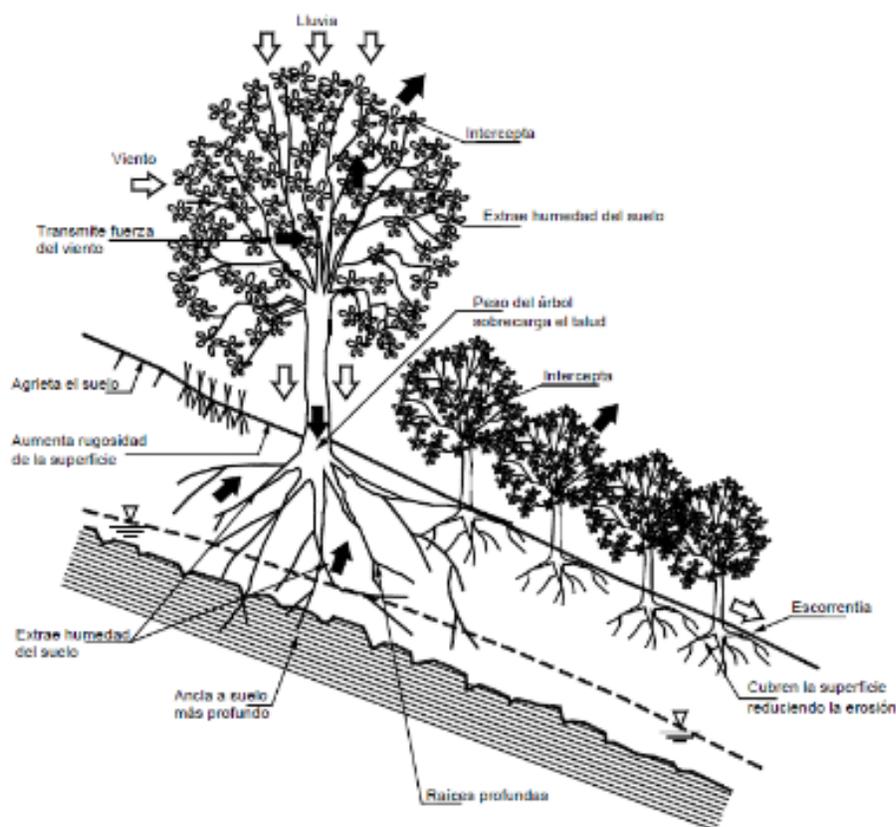


Figura 16. Efectos de la vegetación sobre la protección del suelo Fuente: (Suarez, 2009)

En la Figura 17, se muestra el componente cobertura de la tierra con sus atributos a calificar y los pesos dentro del modelo de susceptibilidad.

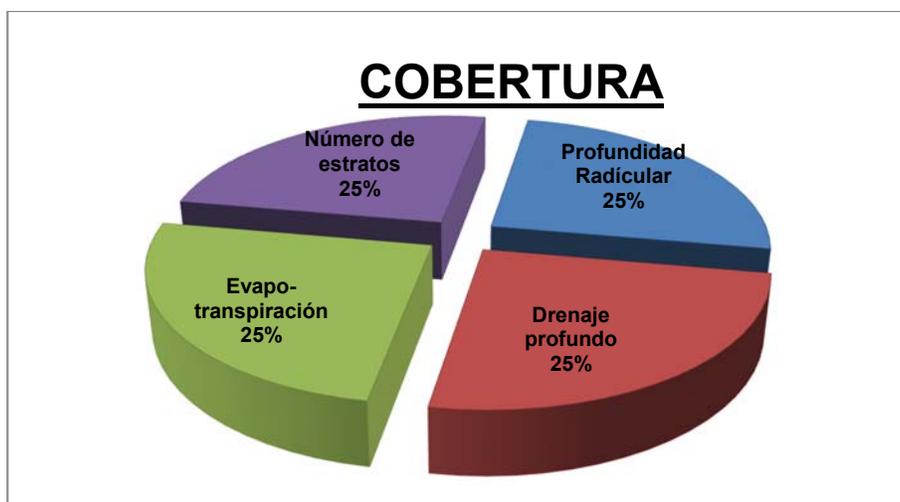


Figura 17. Diagrama de los atributos calificados en la variable Cobertura de la tierra, incluyendo los porcentajes de calificación, Modificado del (SGC, 2013)

Para el cálculo de la Susceptibilidad a los movimientos en masa, contextualizado en la temática de cobertura, se determina con el uso del siguiente modelo matemático, y se contextualiza en la

Figura 18, y el resultado del cálculo, se representa en la Figura 19.

$$CAL = \frac{PR + DN + ETP_KC + NE}{4}$$

Donde:

PR = Profundidad Radicular.

DN = Drenaje Natural.

ETP_KC = Evapotranspiración – Coeficiente de Cultivo.

NE = Número de Estrato.

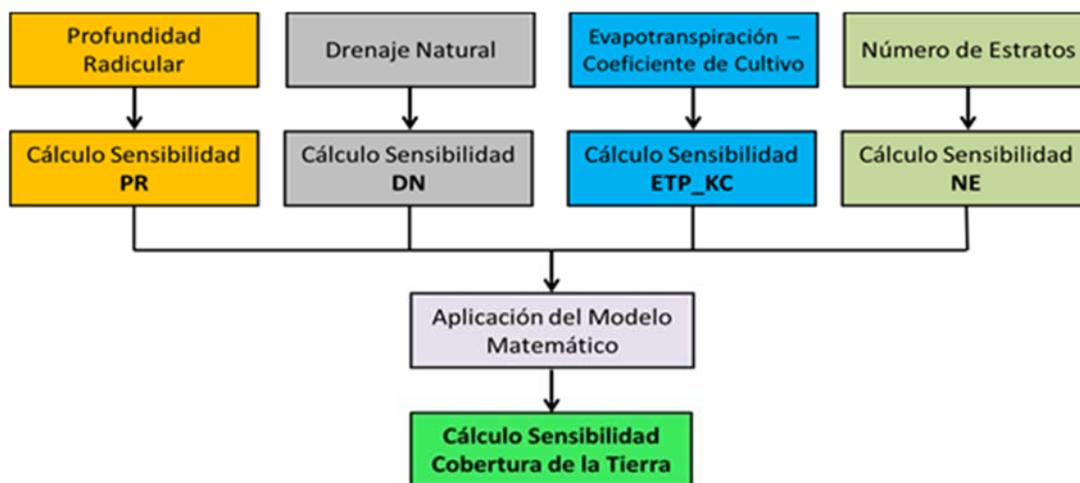


Figura 18. Procedimiento para el cálculo de la susceptibilidad de la Cobertura de la Tierra.

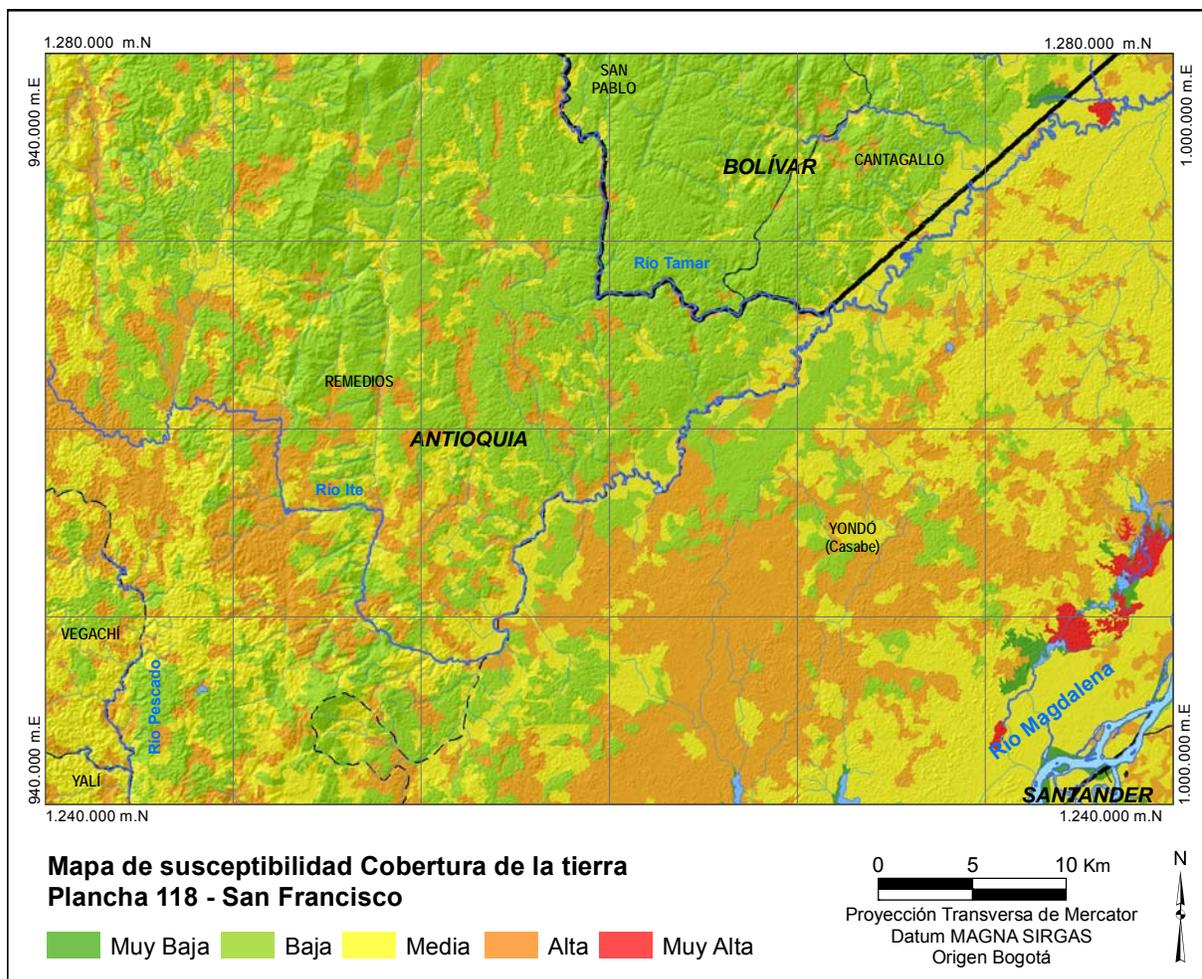


Figura 19. Mapa de susceptibilidad de la variable cobertura de la Tierra

6.1.4 Geomorfología

De acuerdo con lo expuesto en el documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa (Servicios Geológico Colombiano – SGC, 2013), la variable geomorfología incluye los atributos: morfometría, morfogénesis y morfodinámica, (Figura 20).

La cartografía geomorfológica, tiene por objeto proporcionar información sobre las distintas formas del terreno; su origen, evolución y los fenómenos naturales que han ocurrido en el pasado y los distintos procesos activos que actualmente ocurren en la región.

GEOMORFOLOGÍA

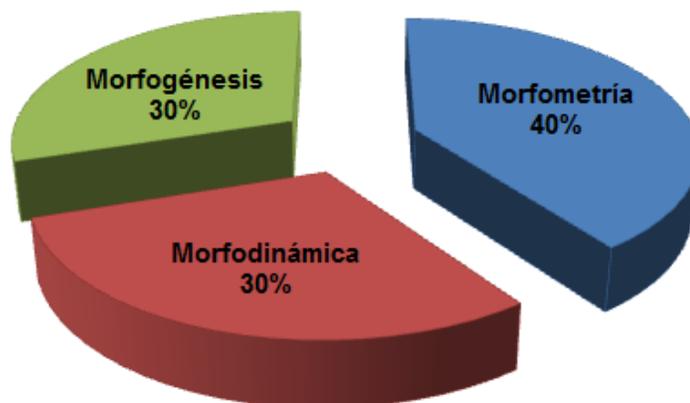


Figura 20. Diagrama de los atributos calificados de la variable geomorfología (Modificado del Servicio Geológico Colombiano – SGC, 2013)

6.1.4.1 Morfometría

La variable morfometría utiliza la información almacenada en el modelo digital de elevación y tiene asignada para su definición en la variable de Geomorfología el 40% del peso sobre el total del peso de las variables que la definen y está compuesta por tres atributos básicos: Pendientes, Rugosidad y Acuencia (Figura 21).

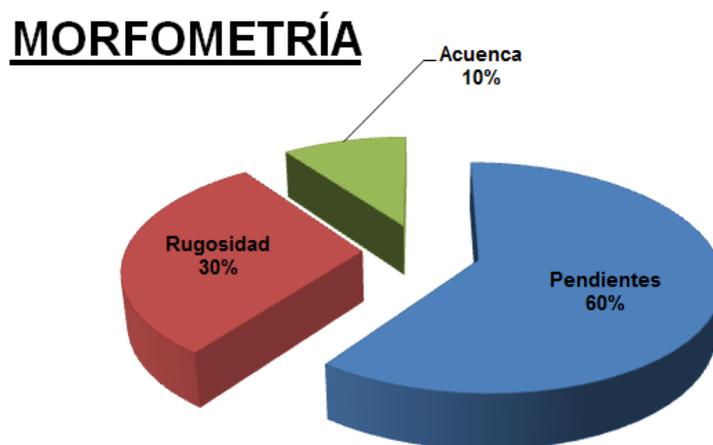


Figura 21. Diagrama de los atributos calificados en la variable Morfometría, incluyendo los porcentajes de calificación (Modificado del Servicio Geológico Colombiano – SGC, 2013)

El atributo **Pendientes** es el de mayor peso (60%) dentro de la definición de la Morfometría y corresponde al ángulo formado entre la superficie del terreno y la horizontal, presentando valores entre de 0° a 90° y se relaciona con los movimientos en masa de manera proporcional, es decir: si la pendiente aumenta, también aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa (SGC, 2013). En la evaluación de este atributo, se diferencian 5 intervalos de pendiente con diferentes grados de susceptibilidad (Tabla 13).

Tabla 13. Categorización y calificación de la susceptibilidad de la pendiente

Clasificación	Rango (°)	Susceptibilidad
Plana a suavemente inclinada	0 – 7	1
Inclinada	7 – 11	2
Muy inclinada	11 – 19	3
Abrupta	19 – 40	4
Escarpada	> 40	5

Según Hobson (1972), el atributo de **Rugosidad** es una medida de la dispersión tridimensional de los vectores normales a las facetas planares sobre un paisaje, que combina la variación en los mapas de pendiente y de aspecto, en una única medida, permitiendo obtener una mejor representación de la heterogeneidad del terreno que aquellas medidas que se basan exclusivamente en la pendiente o en la elevación.

En el procedimiento de construcción del atributo de Rugosidad, inicialmente se descomponen los vectores unitarios normales a cada celda en sus componentes **x**, **y** y **z** utilizando funciones trigonométricas de la pendiente y la orientación (aspecto) de cada celda presente en el modelo digital de elevación. Posteriormente, se calcula un vector resultante en un vecindario de aproximadamente 8300 m² (3 x 3 celdas) con centro en cada celda del modelo digital del terreno, recorriendo mediante un procedimiento de ventana móvil la extensión de la matriz de elevación. Dicho vector se estandariza, al dividir su magnitud por el número de celdas en el vecindario y es una medida de la rugosidad del paisaje para la escala espacial seleccionada (Sappington *et al.*, 2007).

Finalmente, para la representación en el mapa se sustrae la magnitud en forma estandarizada de 1, resultando en un número de rugosidad adimensional que oscila desde 0 (plano y menos susceptible a los deslizamientos en masa) a 1 (lo más rugoso y más susceptible a los deslizamientos en masa).

En la evaluación de este atributo, se diferencian 5 intervalos de rugosidad con diferentes grados de susceptibilidad (Tabla 14).

Tabla 14. Categorización y calificación de la susceptibilidad de la rugosidad

Clasificación	Rango (adim.)	Susceptibilidad
Rugosidad Muy baja o Nula	< 0.9118	1
Rugosidad Baja	0.9118 – 0.99	2
Rugosidad Media	0.99 – 0.9118	3
Rugosidad Alta	0.9118 – 0.99118	4
Rugosidad Muy Alta	0.99118 – 1.0	5

El atributo de **Acuenca** corresponde a la superficie de la cuenca aguas arriba de la celda y se obtiene como la sumatoria de la superficie que drena en una celda determinada (cuenca acumulada), la variable se deriva del DEM y se expresa en m² (SGC, 2013).

La determinación del área acumulada hasta cada celda del modelo digital de elevaciones, requiere de la ejecución del modelo de determinación de flujo de ocho direcciones (D8) propuesto por Jenson y Domingue (1988), para determinar en cada celda del modelo digital de elevación la dirección de la mayor pendiente y con ello el mapa de dirección de flujo.

Posteriormente, se utiliza el mapa de dirección de flujo para determinar en cada celda del modelo digital de elevación, el número de celdas que se acumulan desde aguas arriba, el cual, tras multiplicarse por el área de la celda (1182.6 m²) permite obtener el atributo de Acuenca. En la evaluación de este atributo, se diferencian 5 intervalos de acumulación del flujo con diferentes grados de susceptibilidad (Tabla 15).

Aquellas zonas con menor acumulación de flujo, se consideran de muy baja susceptibilidad a los movimientos en masa, mientras que las zonas de mayor acumulación de flujo (sin incluir las zonas de drenaje permanente y en canal), se consideran de mayor susceptibilidad a los movimientos en masa.

Tabla 15. Categorización y calificación de la susceptibilidad de acuenca

Clasificación	Rango (m ²)	Susceptibilidad
Divisoria de aguas o lomos	0	1
Escorrentía lenta	0 – 3500	2
Flujo Acumulado	3500 – 40000	5
Drenaje No Permanente	40000 – 1000000	3
Quebradas, Ríos	> 1000000	1

Una vez obtenidos los mapas de los diferentes atributos de interés, la determinación del mapa de susceptibilidad por la variable de Morfometría, se aplica una suma ponderada de los parámetros de la siguiente manera:

	0,6 (Pendiente)
+	0,3 (Rugosidad)
+	0,1 (Acuenca)
	Morfometría

6.1.4.2 Morfogénesis

La morfogénesis corresponde al conjunto de procesos que dieron origen a los paisajes, tipos de relieve y distintas formas del terreno, es decir, las principales causas y procesos que dieron origen a las formas del paisaje actual. El origen del paisaje depende de los procesos endógenos (tectónica, volcanismo y sismicidad), y las modificaciones causadas por los agentes exógenos (agua, viento, hielo), que actúan sobre la superficie terrestre en diferentes proporciones y con distintas intensidades, durante sendos intervalos del tiempo geológico y modelados del terreno. La información morfogenética, está representada en forma de unidades geomorfológicas; los parámetros de evaluación morfométrica permiten caracterizar una geoforma en su orden espacial individual y su relación con su entorno, la morfogénesis junto con la morfocronología, recopila, explica y sintetiza la evolución geológica del relieve actual.

La calificación de la morfogénesis se da sobre cada una de las geoformas, garantizando una calificación particular de los atributos morfogenéticos: Procesos genéticos, modelado del relieve y ambiente de formación, los cuales, a pesar de tener un ambiente en común, pueden variar entre sí y modificar las condiciones de susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa.

El primer atributo morfogenético a calificar corresponde a la génesis de la geoforma, la cual hace referencia a la dinámica superficial del relieve que puede contribuir en la mayor o menor susceptibilidad física por movimientos en masa.

Geoformas pertenecientes a los ambientes fluvial y costero, son consideradas como determinantes en la zonificación por inundación, aunque su dinámica ante los movimientos en masa, solo se restringe a ciertas geoformas con características morfométricas y morfográficas particulares; estos ambientes son calificados con cero (0).

Los ambientes estructurales determinados por la presencia de estructuras geológicas representativas a escala 1:100.000 (pliegues, fallas, discontinuidades y fracturas) son valoradas con la calificación más alta (3), dada la fuerte influencia que puede tener sobre los movimientos en masa.

El atributo del proceso genético, referido a la presencia o ausencia de fuerzas internas corticales que contribuyen por sí mismas a la formación del relieve, es calificado con valores de 0 y 1. De esta manera, se considera que el proceso dinámico endógeno y exógeno que propició el ambiente de formación de las geoformas actuales, está referido a la ausencia o presencia de fuerzas internas corticales.

Los procesos endógenos del tipo volcánico y estructural, son calificados con el menor valor (0) por cuanto no requieren de un agente externo para su ocurrencia. Los procesos exógenos: Denudacional, Cárstico, Fluvial, Eólico, Glacial, Marino y Antrópico, son valorados con la máxima calificación (1), en cuanto a que si requieren un agente externo para su evolución.

Se establece además el criterio morfogenético del modelado, en el cual se considera el aspecto de construcción (agradación) y destrucción (degradación) de las geoformas. Como gran parte de la ocurrencia de movimientos en masa, se encuentran relacionados con el transporte y acumulación del material, los procesos agradacionales, se califican con la mayor calificación (1) y los procesos degradacionales con la calificación menor (0). En la Tabla 16, se resumen los atributos de calificación para la variable Morfogénesis.

Tabla 16. Atributos para la Calificación de las Unidades Geomorfológicas

Ambiente	Origen	Proceso Genético	Modelado		Rango de calificación	
			Agradación	Degradación	Agradación	Degradación
Costero	0	1	1	0	2	1
Fluvial	0	1	1	0	2	1
Eólico	1	1	1	0	3	2
Kárstico	1	1	1	0	3	2
Volcánico	2	0	1	0	3	2
Antrópico	2	1	1	0	4	3
Denudacional	2	1	1	0	4	3
Glacial	2	1	1	0	4	3
Estructural	3	0	0	0	4	3

6.1.4.3 Morfodinámica

La generación del atributo morfodinámica, se hizo a través de un proceso de asociación, que se construye a partir de la representación cartográfica de los suelos transportados vistos como una geoforma, del inventario de procesos a partir del sistema de información SIMMA, obtenidos mediante fotointerpretación, del inventario de campo y las variables geométricas derivadas del DEM, obteniéndose de esta manera la distribución espacial de los movimientos en masa y el comportamiento del relieve asociado a las características del material Figura 22.

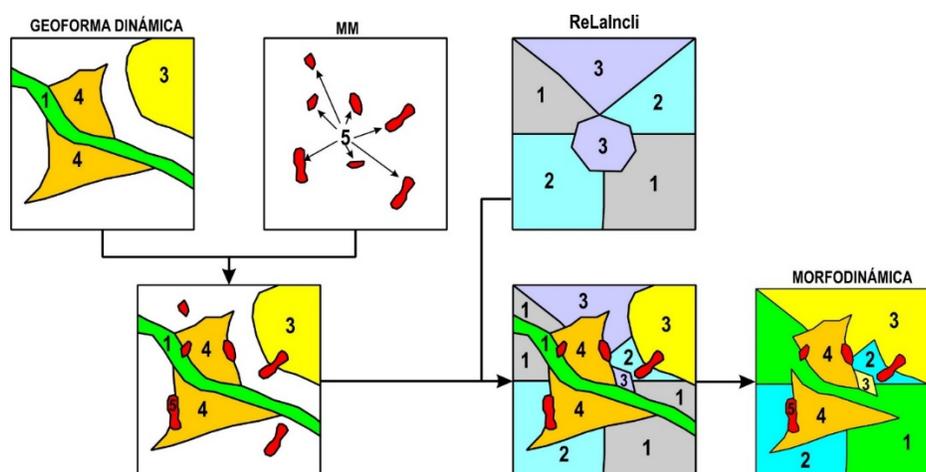


Figura 22. Proceso de generación del atributo Morfodinámica

Los componentes que se agruparon fueron: (1) Un componente de relieve (RelaIncli), a partir de la combinación del relieve relativo (RR) y la inclinación de la ladera (IL), (2) las unidades de suelos derivadas del mapa de suelos y con el apoyo del mapa geomorfológico, y (3) el inventario y catálogo de los procesos derivados del sistema de información SIMMA.

El **relieve relativo (RR)** representa la diferencia de altitud de la geoforma localmente, independiente de su altura absoluta con respecto al nivel del mar. Se mide por la diferencia de altura que hay entre la parte más baja y la más alta; llámese ésta colina, montaña, meseta, terraza u otros. Para este caso, se contempló el uso de algoritmos que definen (RR) como la diferencia entre la mayor elevación y la menor elevación por unidad de área (Chacón, T.,

1993), en la Figura 23, se representa la diferencia entre un relieve relativo muy alto y un relieve relativo bajo.

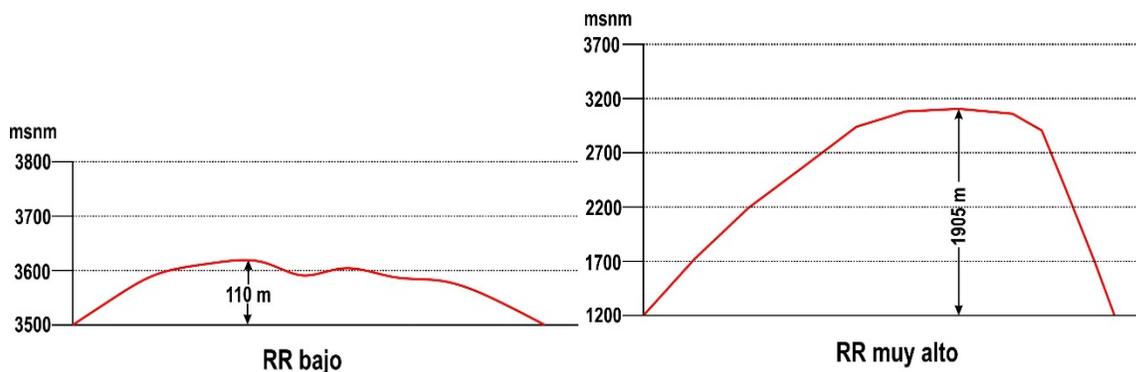


Figura 23. Esquema de representación de relieve relativo.

La **inclinación de la ladera (IL)**. Se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0° a 90° o en porcentaje (%); en la Figura 24, se representa la diferencia de la inclinación de ladera dependiendo del Angulo.

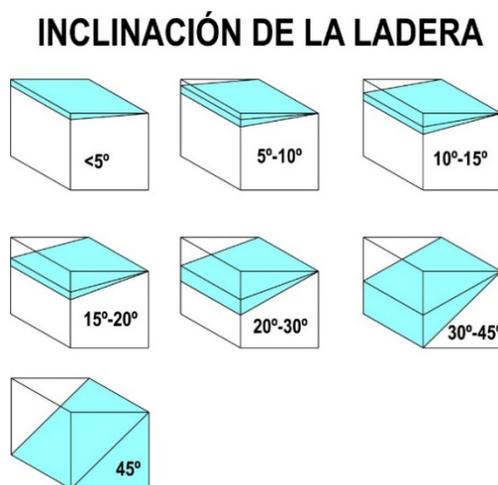
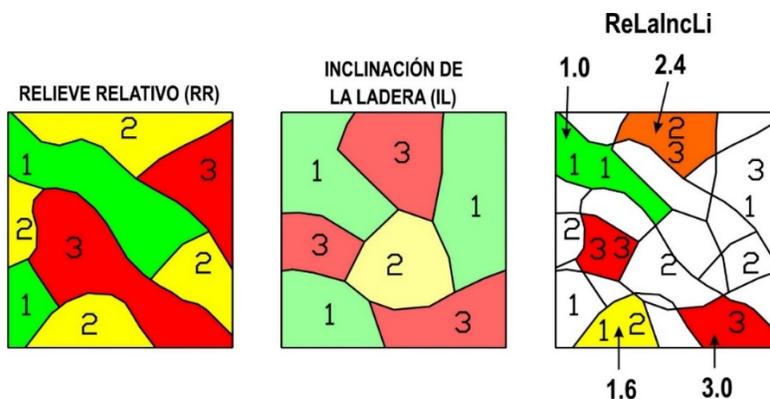


Figura 24. Representación de la inclinación de ladera.

Combinación del relieve relativo y la inclinación de la ladera (RelaIncli): mediante la herramienta algebra de mapas, se elabora el atributo RelaIncli, empleando la ecuación que se encuentra en la parte inferior de la Figura 25, esta consiste en realizar una suma ponderada del atributo relieve relativo (RR) y la inclinación de ladera (IL).



$$\text{ReLaincli} = 0.6 \cdot \text{RR} + 0.4 \cdot \text{IL}$$

Figura 25. Proceso de generación del atributo Relaincli

6.1.4.4 Susceptibilidad por geomorfología

Una vez obtenidos los tres atributos del componente de geomorfología (Morfometría, Morfodinámica y Morfogénesis), se genera el mapa de susceptibilidad por geomorfología a partir de un proceso de superposición temática, asignándoles una ponderación a cada uno de estos atributos, con porcentajes ya establecidos dentro de la guía metodológica suministrada por el Servicio Geológico Colombiano. De acuerdo con el documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano – SGC, 2013), la variable geomorfología incluye los atributos: morfometría, morfogénesis y morfodinámica (Figura 27).

GEOMORFOLOGÍA

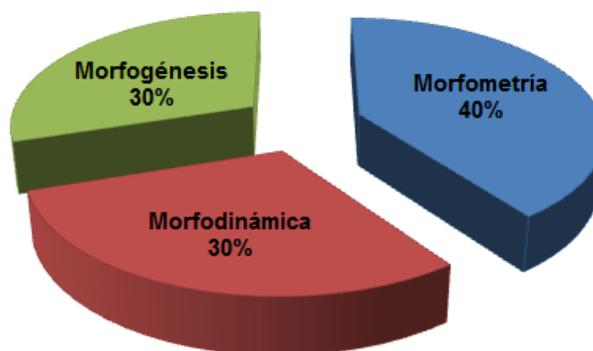


Figura 26. Diagrama de los atributos calificados de la variable geomorfología (Modificado del Servicio Geológico Colombiano – SGC, 2013)

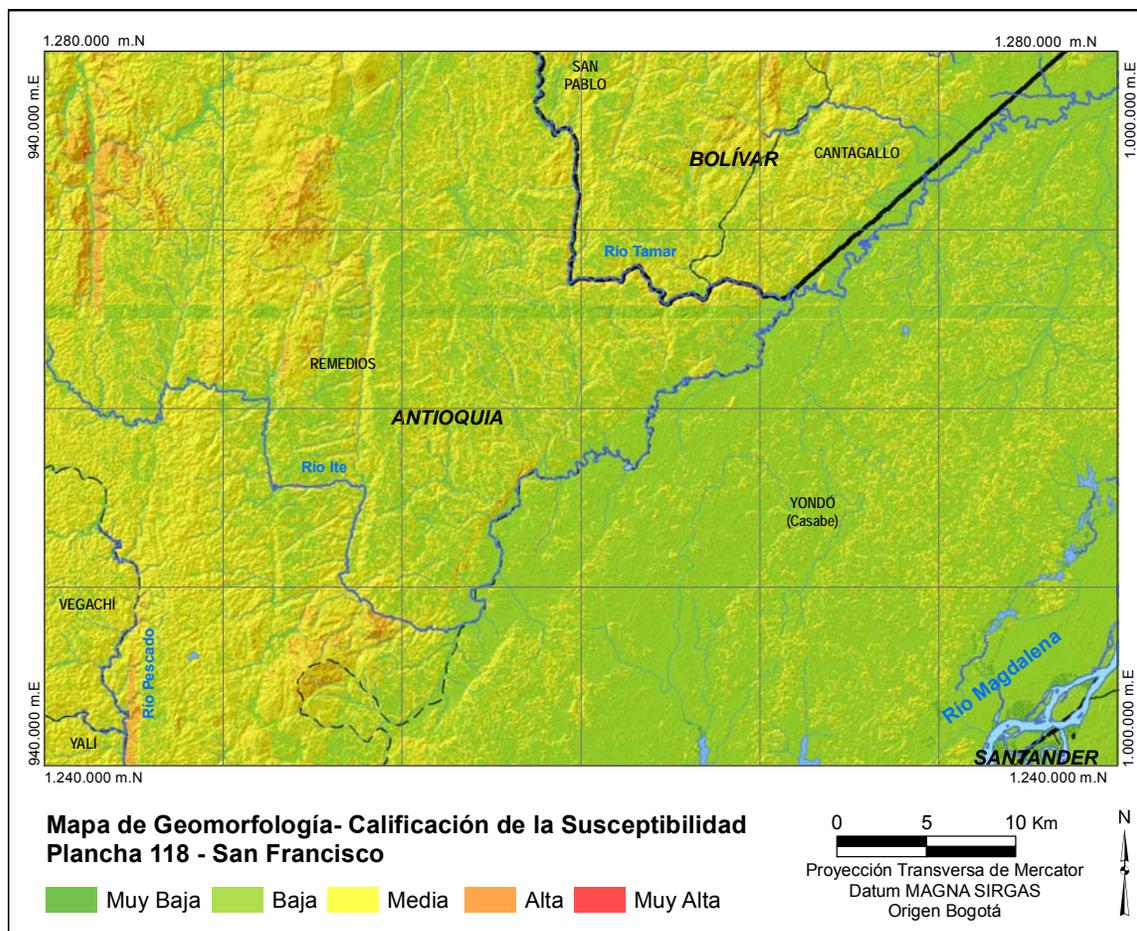


Figura 27. Mapa de susceptibilidad de la variable geomorfología plancha 118, San Francisco.

6.1.5 Susceptibilidad

Las variables Geología, Geomorfología, Suelos edáficos y Cobertura de la tierra se emplearon en la modelación de la susceptibilidad a movimientos en masa, las ponderaciones se establecieron a partir del proceso analítico jerárquico “AHP” (ver Tabla 17 y Figura 28), allí se precisan los diferentes elementos, porcentajes y criterios temáticos en orden de importancia a partir de los cuales se obtiene el Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa para la plancha 118.

Para la obtención de los porcentajes ilustrados en la Figura 28 se construyó la matriz de comparación por pares (Ver Tabla 17) de los variables Geología, Geomorfología, Suelos edáficos, y Cobertura de la tierra. Cada elemento refleja los juicios de los expertos y la valoración relativa de cada variable frente a otras variables. Posteriormente se normaliza la

matriz (ver Tabla 18) en donde se obtienen las prioridades relativas de las variables, o dicho de otra manera los porcentajes empleados en la modelación de la susceptibilidad.

Tabla 17 Matriz de Preferencias de la susceptibilidad

Criterio	Geomorfología	Geología	Suelos	Cobertura
Geomorfología	1	3,5	2,7	3
Geología	0,285714286	1	0,7	1
Suelos	0,37037037	1,428571429	1	1,4
Cobertura	0,333333333	1	0,714285714	1
Suma	1,989417989	6,928571429	5,114285714	6,4

Tabla 18 Matriz normalizada

Criterio	Geomorfología	Geología	Suelos	Cobertura	Prioridades
Geomorfología	0,50266	0,50515	0,52793	0,46875	0,5011
Geología	0,14362	0,14433	0,13687	0,15625	0,1453
Suelos	0,18617	0,20619	0,19553	0,21875	0,2017
Cobertura	0,16755	0,14433	0,13966	0,15625	0,1519
Suma	1	1	1	1	1

El proceso para estimar la razón de consistencia de los criterios comienza con la obtención del vector suma ponderada ver Tabla 19. Posteriormente se calcula el promedio de los valores encontrados (λ_{\max}), el índice de consistencia (**IC**) y finalmente determinar la razón de consistencia (**RC**) ver Tabla 20

Tabla 19 Vector de suma ponderada

Criterio	Geomorfología	Geología	Suelos	Cobertura	Sumatoria
Geomorfología	0,5011243	0,5084349	0,5444796	0,4558484	2,0099
Geología	0,1431784	0,1452671	0,1411614	0,1519495	0,5816
Suelos	0,1856016	0,2075244	0,2016591	0,2127293	0,8075
Cobertura	0,1670414	0,1452671	0,1440422	0,1519495	0,6083

Con un $RC = 0.045$ se concluye que el grado de consistencia en la comparación de pares es aceptable.

Tabla 20 Razón de consistencia

n	λ	λ_{\max}	Índice de Consistencia (IC)	Razón de consistencia (RC)
1	4,0107559	4,0054435	$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ $IC = 0,00181451$	$RC = \frac{IC}{IA}$ $RC = 0,002057268$
2	4,0033587			
3	4,0043534			
4	4,0033060			

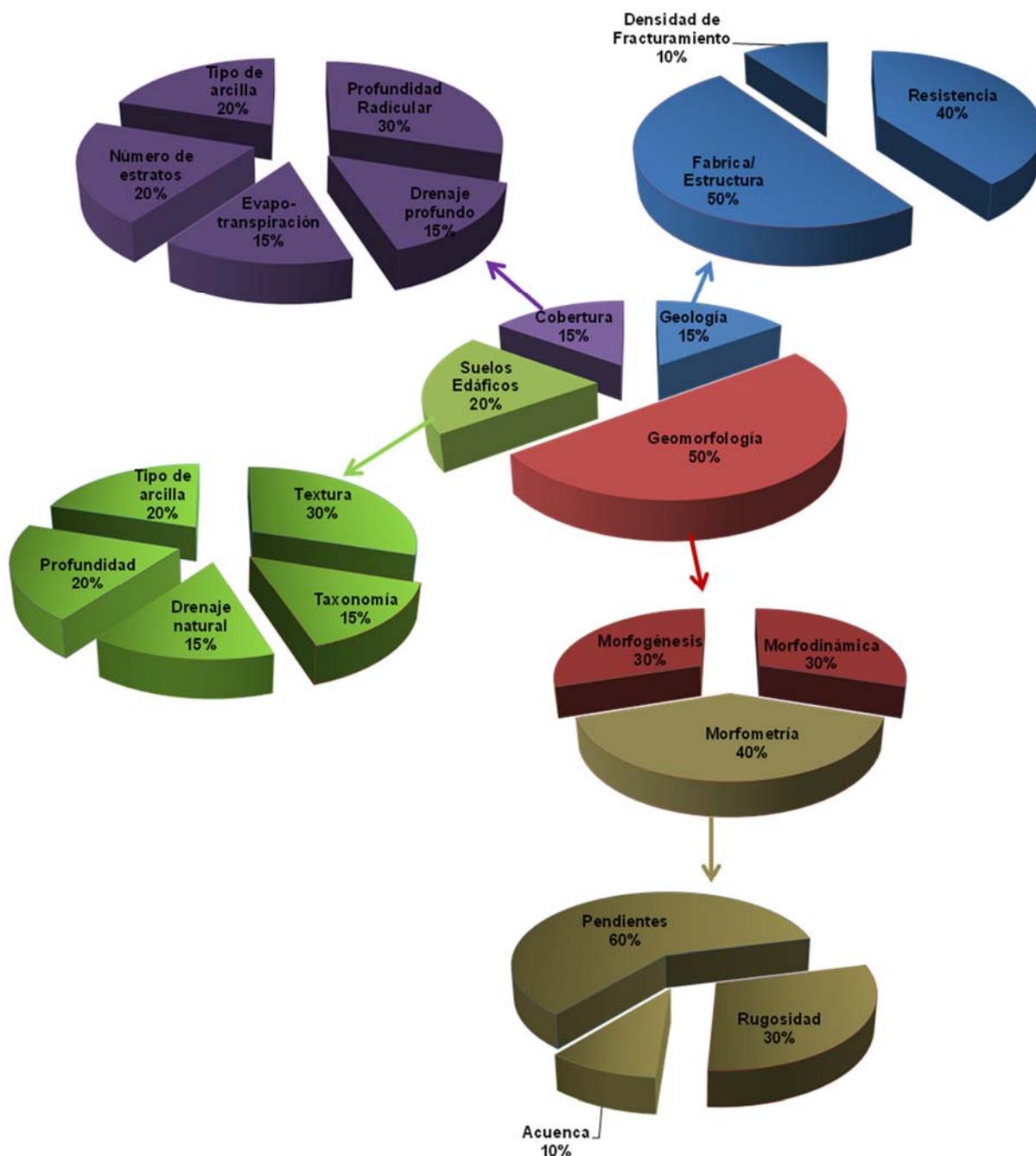


Figura 28. Diagrama de la jerarquía para elaborar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, con sus respectivos porcentajes. Fuente: Autor

En la Figura 29, se muestra el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa empleando la metodología del SGC 2013. Se observa que presenta una susceptibilidad media muy homogénea en casi toda la plancha, incluyendo la zona de montaña y la planicie aluvial.

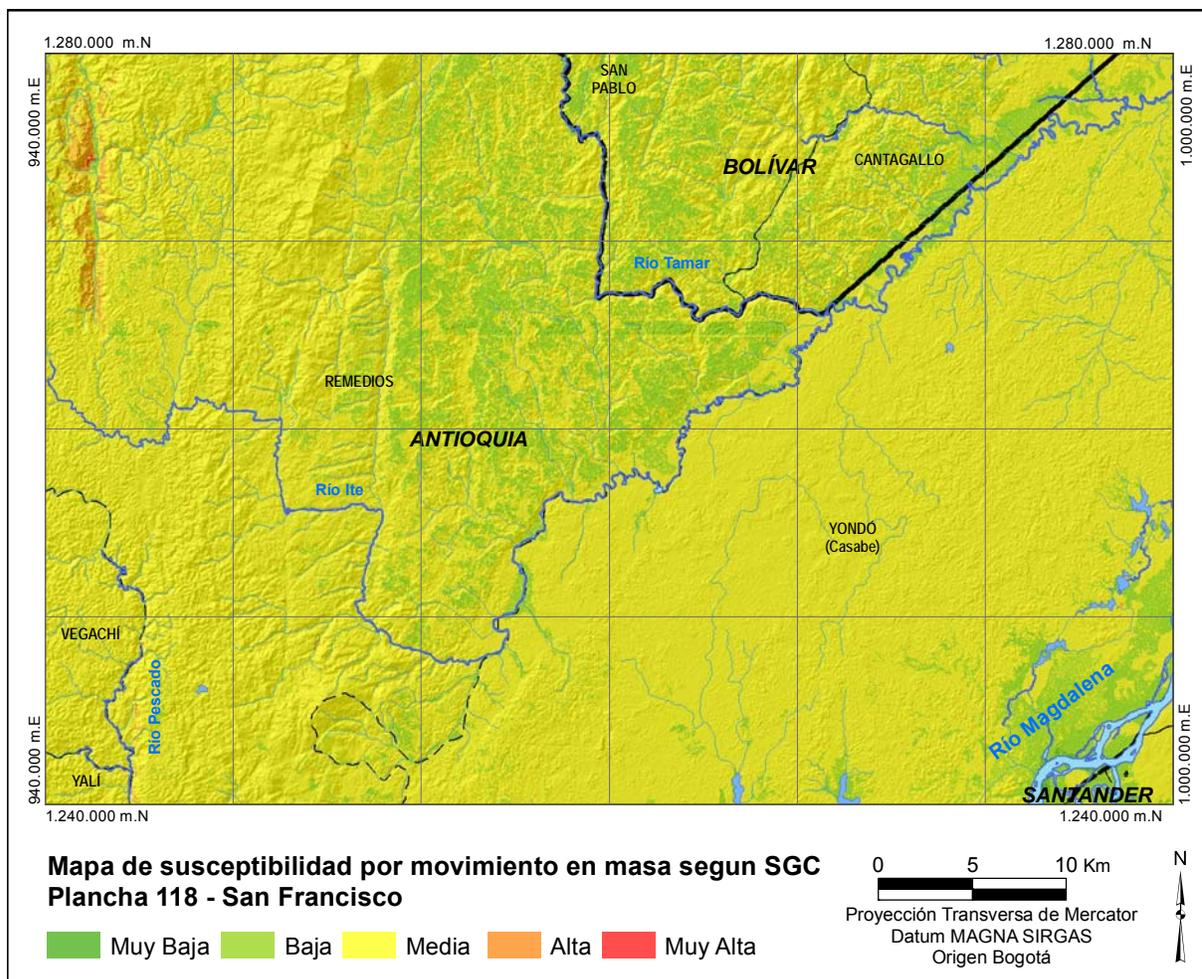


Figura 29. Mapa de susceptibilidad por movimiento en masa

6.1.6 Amenaza Relativa

6.1.6.1 Factor detonante clima

Los movimientos en masa, generalmente están asociados a las épocas de lluvias, es por eso que la precipitación media anual y la temperatura media anual, influyen en el contenido de humedad del suelo. Es decir, en las zonas en donde la precipitación media anual sea alta y la temperatura media anual sea baja, la humedad del suelo será mayor, lo cual contribuirá en mayor medida a la generación de los movimientos en masa, (SGC, 2013).

Para el detonante por factores climáticos, se utilizaron los mapas de zonificación climática del Atlas Climatológico de Colombia (IDEAM, 2005).

En la Figura 30, se muestra El Factor Detonante Climático, el cual a su vez corresponde con la distribución de la lluvia máxima diaria presente en la plancha 118, San

Francisco. En la zona de estudio, plancha 118, el factor detonante climático, está representado solamente, por el parámetro de calificación media, siendo evidente la falta de datos del detonante climático.

Existen ciertas limitaciones para el cálculo de la amenaza, al tener en cuenta la variable lluvias, debido a que la base de datos en el intervalo comprendido entre 1987 a 2011 de los registros de precipitación, presenta discontinuidad en dichos registros, y sumado al hecho de que en la zona, se cuenta con un bajo número de estaciones meteorológicas. En toda el área se presenta una incidencia media a la ocurrencia de movimientos en masa por causa de la afectación de las lluvias. Esta categoría presenta lluvias máximas diarias cuyos rangos oscilan entre 100 mm y 150 mm.

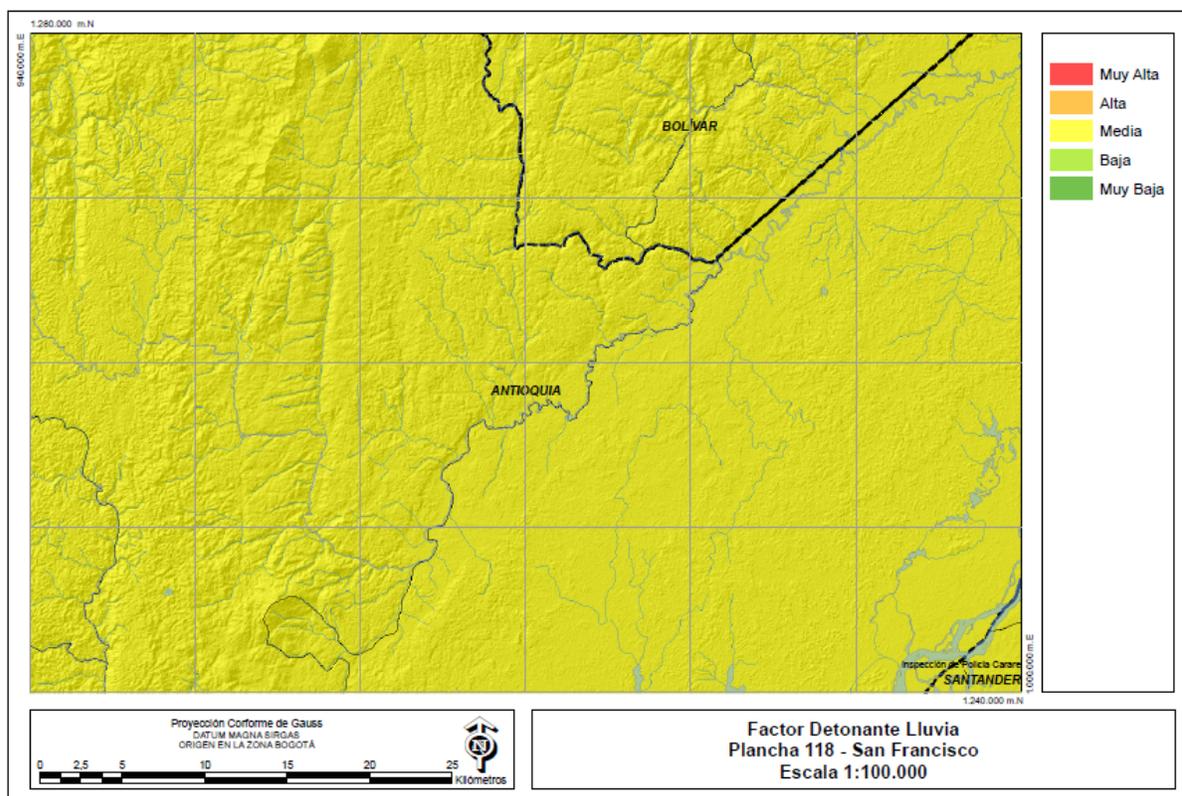


Figura 30. Mapa del factor detonante por clima en la plancha 118, San Francisco. Fuente: (UP & SGC, 2015)

6.1.6.2 Factor detonante sismo

Los valores del detonante sismo, se tomaron del estudio “Actualización del Mapa Nacional de Amenaza Sísmica” (INGEOMINAS-Universidad Nacional, 2008-2010). Dicho estudio proporciona los valores de aceleración máxima horizontal a nivel de terreno firme

(PGA), correspondiente a un periodo de 475 años. (Ver Figura 31). Los cuales permiten calificar de forma cualitativa el grado de contribución del sismo a la ocurrencia de movimientos en masa

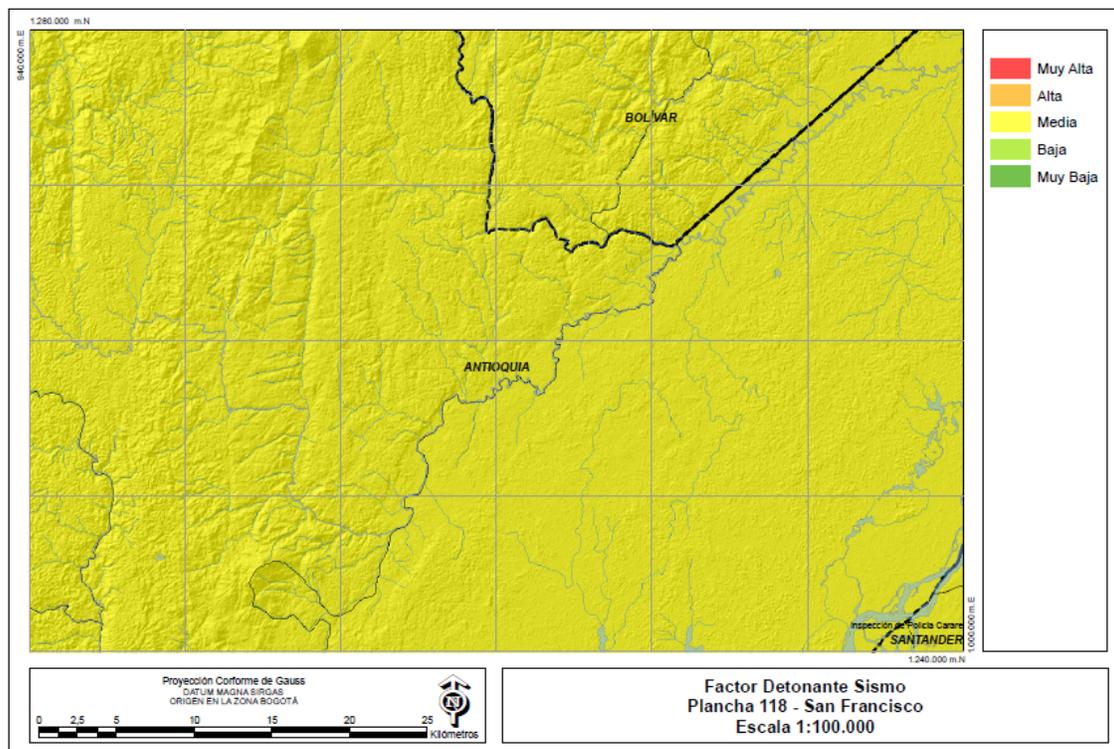


Figura 31. Mapa del factor detonante sismo, plancha 118, San Francisco. Fuente: (UP & SGC, 2015)

Para éste parámetro, solo se tiene un nivel de calificación media y abarca toda la zona de estudio. Este presenta valores de PGA (entre 150 a 200 cm/seg^2). Esto hace muy evidente, la falta de datos sismológicos adecuados para el estudio a escala 1:100.000. No obstante, localmente la zona es considerada activa tectónicamente, y presenta un patrón de fallamiento paralelo en sentido norte-sur y corresponde al sistema de fallas activas de Palestina.

6.1.6.3 Cálculo de la amenaza relativa

A partir de la zonificación de susceptibilidad realizada, se propone una metodología heurística para la zonificación de amenazas, para lo cual fueron definidos los factores inherentes al clima (temperatura media anual, precipitación media anual y lluvia máxima diaria y el sismo como detonantes de los movimientos en masa). Mientras que las coberturas temáticas tenidas en cuenta en la zonificación de susceptibilidad como geomorfología, geología, uso y cobertura del suelo, permiten trabajar a una escala adecuada acorde con la

escala de trabajo, los factores detonantes de los movimientos en masa, tales como los factores climáticos y el sismo considerados en el análisis de amenazas, no cuentan con la cobertura de datos necesarios y suficientes que satisfagan en un todo la escala de trabajo, a menos que se hagan refinamientos en su evaluación, para lo cual habría que disponer de datos y de información más detallada.

Para el cálculo de la amenaza relativa se emplean las ecuaciones que se ilustra continuación.

$$A_c = S + F_c$$

Donde:

A_c = Amenaza por factores climáticos

S = Susceptibilidad del terreno a los movimientos en masa

F_c = Factor clima

$$A_s = S + F_s$$

Donde:

A_s = Amenaza por detonante sismo

S = Susceptibilidad del terreno a los movimientos en masa

F_s = Factor sismo

El cálculo de la amenaza total se obtiene mediante la suma de la amenaza por lluvia y la amenaza por sismo, así:

$$A_T = A_c + A_s$$

Donde:

A_T = Amenaza Total

A_c = Amenaza por detonante clima

A_s = Amenaza por detonante sismo

Los valores obtenidos de la amenaza por detonante clima o sismo, oscilan entre 2 y 10 debido a que tanto la calificación de los detonantes, como la de la susceptibilidad, varían entre 1 y 5. La clasificación del mapa de amenaza total se propone tal como aparece en la Figura 32, estableciendo cuatro categorías de amenaza: Baja, Media, Alta y Muy Alta.

En la Figura 33 se ilustra el mapa de amenaza relativa empleando la metodología del SGC, se evidencia una cierta homogeneidad del nivel de amenaza media, esto obedece a que se presentan factores detonantes deficientes (ver Figura 30 y Figura 31).

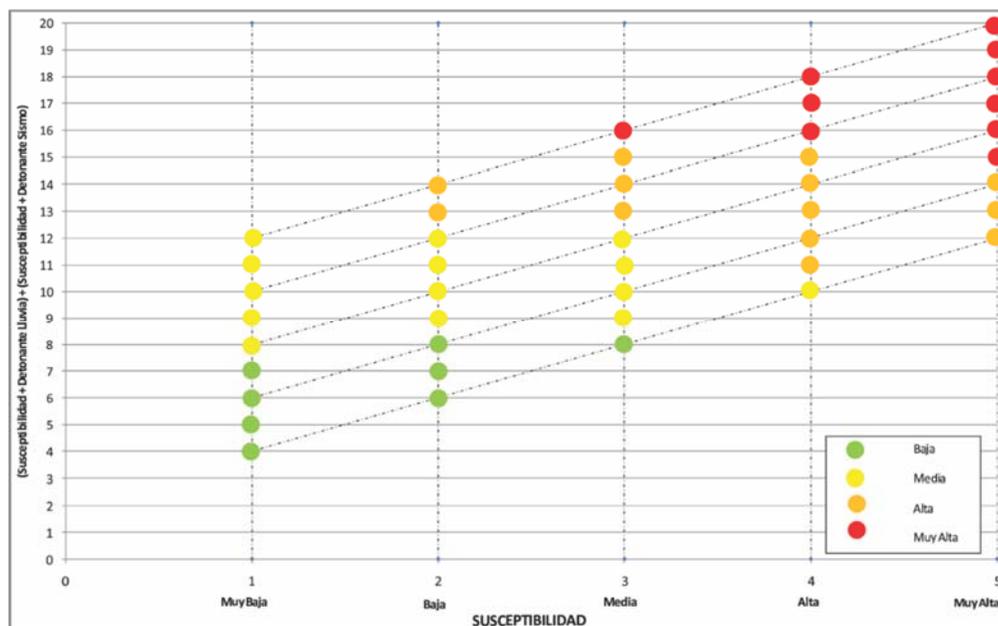


Figura 32. Clasificación del mapa de zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa
Fuente: (SGC, 2013)

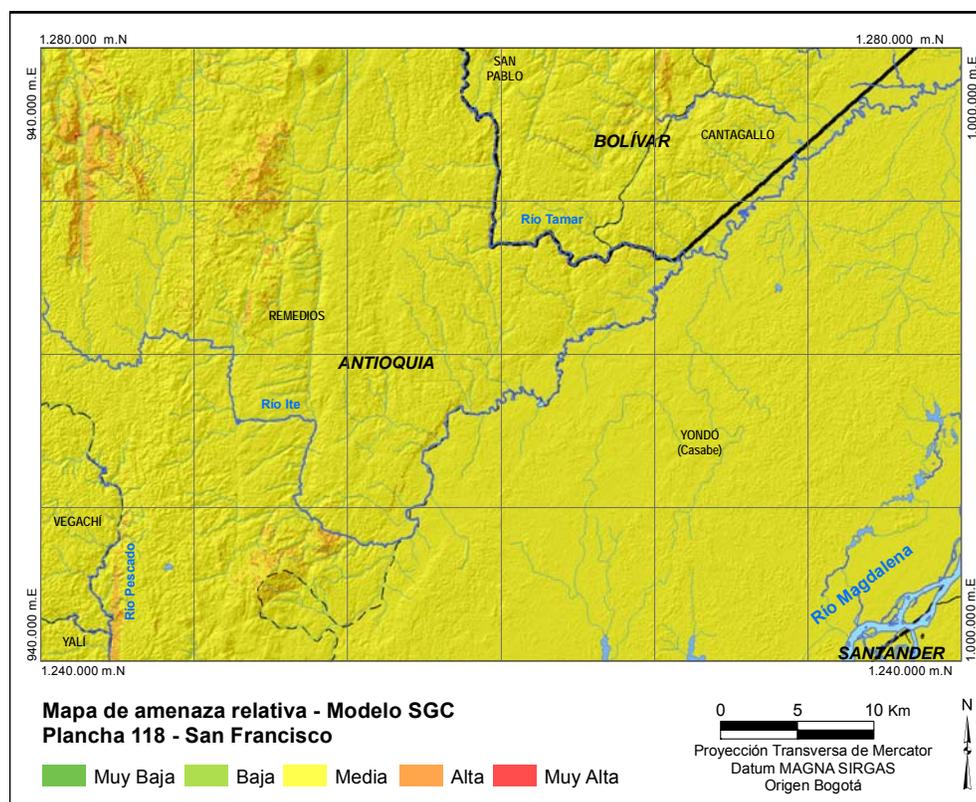


Figura 33. Mapa de amenaza relativa empleando la metodología del SGC (2013).

6.2 Cálculo de la susceptibilidad con los criterios y variables propuestas

6.2.1 Susceptibilidad por geología

Una de las principales dificultades en la valoración de la influencia de la geología, en la susceptibilidad a los movimientos en masa, es el limitado conocimiento que se tiene sobre las complejas y diversas relaciones que la rigen y su comportamiento bajo diferentes condiciones ambientales. Además de la homogenización de las escalas de los diferentes mapas geológicos, a través de la extrapolación de contactos litológicos y estructurales de otras planchas conexas, y la superposición de mapas geológicos departamentales que se encuentran a escalas inferiores.

6.2.1.1 Estructuras geológicas lineales

Esta variable se genera con base en las fallas calificadas del proyecto “Zonificación de Amenazas por Movimientos en Masa escala 1:500.000” y teniendo en cuenta las estructuras del Mapa Geológico de Colombia a escala 1:500.000 (INGEOMINAS, 2007). Durante el estudio, se analizaron fallas, pliegues, y lineamientos.

También se hace uso de los documentos de Paris, Machette, Dart, and Haller (2000, p. 61) y el Grupo de Amenazas Sísmicas de INGEOMINAS, para identificar las tasas de desplazamiento de las estructuras con deformaciones en el Cuaternario, considerando que a mayor desplazamiento de las fallas aumenta el grado de fracturamiento. El criterio usado para su valoración fue el siguiente: a mayor grado de actividad reportada, se espera que el grado de fracturamiento sobre las unidades litológicas sea mayor o, por lo menos, que comprometa los materiales más superficiales y las unidades geológicas más recientes, aumentando su grado de inestabilidad. Por otra parte, el grado de fracturamiento decrece al aumentar la distancia al eje de la estructura considerada. Los pesos asignados de acuerdo a las tasas de desplazamiento están descritos en la Tabla 21.

Como área de influencia en la inestabilidad potencial para cada falla, se asignó un área de influencia (buffer) de 1 km de ancho y en donde dos o más estructuras estaban superpuestas, se dio prioridad a los pesos más altos (ver Figura 34).

Tabla 21. Clasificación de las estructuras lineales.

Tasa de actividad	frecuencia de desplazamiento	Susceptibilidad	Descripción
Sin registro	Sin registro	Muy Baja	Falla cubierta, fotogeológica, aproximada e inferida.
		Baja	Falla sin indicios de actividad neotectónica.
Baja	0.01-0.1 mm/año	Media	Falla con actividad neotectónica débil y/o baja
Moderada	0.1- 1.0 mm/año		
Alta	1.0-10 mm/año	Alta	Falla con actividad neotectónica moderada
Muy Alta	10-100 mm/año	Muy Alta	Falla con actividad neotectónica fuerte
Extrema	> 100 mm/año		

Fuente: modificado de OSSO (2003)

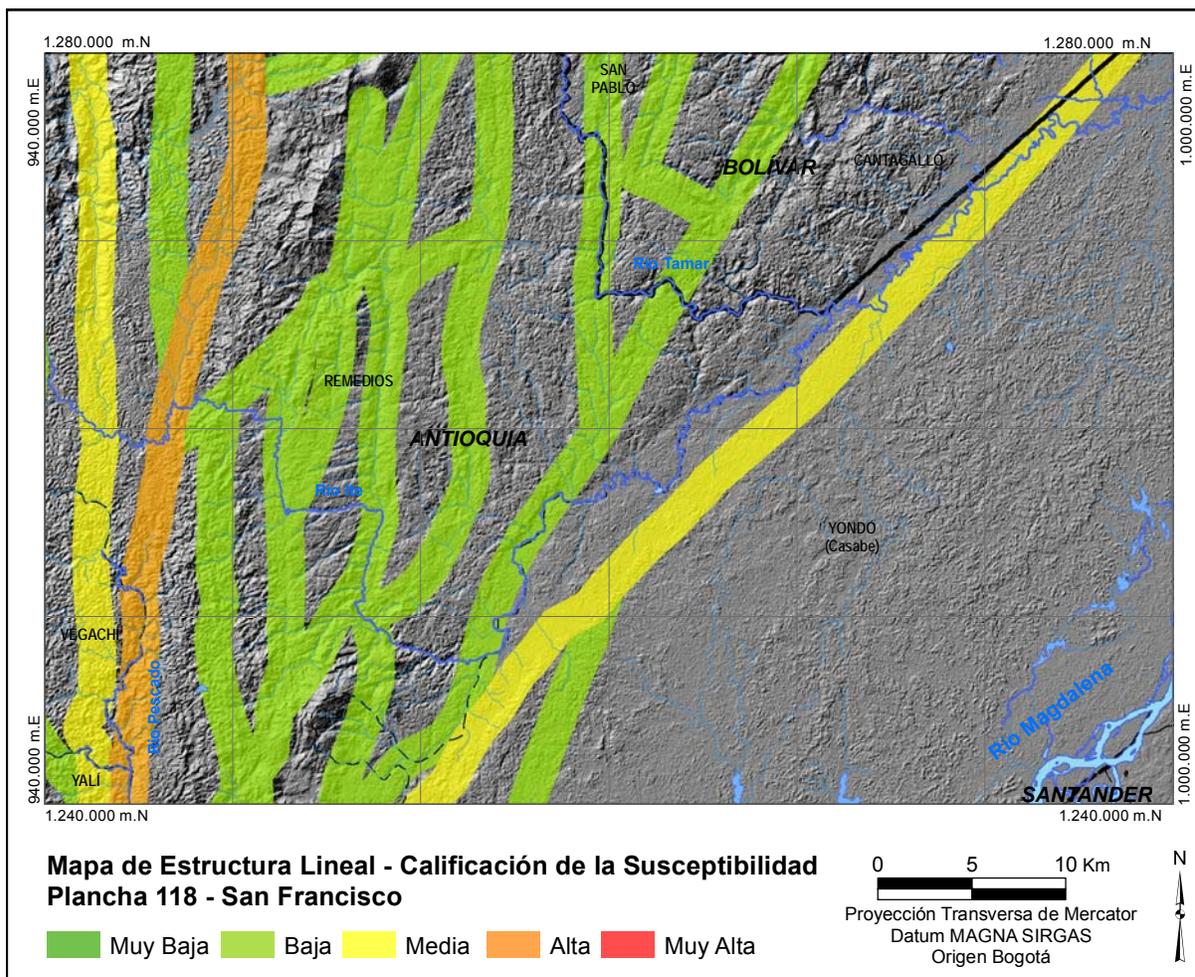


Figura 34. Mapa de susceptibilidad por estructuras lineales

6.2.1.2 Propuesta - Susceptibilidad por geología

En la zonificación de la cuenca del río Teusacá, localizada en la parte central de la cordillera Oriental de los Andes colombianos, calificaron la geología teniendo en cuenta unidades de suelos, depósitos no consolidados y unidades de roca, Vargas (1999). Las unidades de suelos fueron caracterizadas de acuerdo con su génesis, composición litológica, textura, estructura, consistencia, compactación, meteorización y espesor. Para las unidades de roca, se tuvo en cuenta: su composición mineralógica, coherencia (dureza, fragilidad, etc.), textura, estructura y grado de meteorización. Además se encontró, que las unidades más susceptibles a los movimientos en masa son: los depósitos coluviales y las areniscas blandas, seguidas por las lutitas y los depósitos fluvioglaciares.

En esta clasificación, las rocas ígneas intrusivas y los gneises meteorizados, se llevaron a la susceptibilidad alta, en razón a que sus saprolitos, tienen textura arenosa (granos de cuarzo) embebidos en matriz arcillo-limosa, derivada de la descomposición de los feldspatos y los minerales ferromagnesianos. Estos saprolitos se saturan fácilmente y, por evidencia empírica, son muy susceptibles a los movimientos de masa.

En la Tabla 22, fueron calificadas y clasificadas las unidades litoestrigráficas presentes en la plancha, a cada clase se le asignó un peso (importancia) en una escala de uno a cinco que representa su grado de susceptibilidad, de acuerdo con los criterios ya enunciados.

Por supuesto, la clasificación propuesta podrá ser mejorada en futuras investigaciones con base en criterios adicionales, un mejor conocimiento de cada unidad y un mejor trabajo de campo, para caracterizar mejor por ejemplo: las texturas y una mejor descripción del grado de meteorización y medido en campo, junto con atributos geotécnicos y con ensayos de laboratorio. Por estas y otras razones, la clasificación y pesos asignados deben ser bastante cuidadosos.

Para el cálculo de la susceptibilidad por la variable geología, se asignaron pesos para las estructuras lineales con un 20%, para la calificación de la roca con un 80% y para los suelos y depósitos, la asignación es directa, es decir no tiene ponderación, los datos empleados se ilustran y describen en la Tabla 22, como resultado del cálculo de la modelación, se obtiene el mapa de susceptibilidad por la variable geología, (ver modelo propuesto, Figura 35).

Tabla 22. Clasificación de geología

UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CALIF
Formación Mesa (N2m)	Arenisca gris amarillenta, de grano grueso a fino, conglomerática en algunas capas. Con guijos de cuarzo y arenisca algunas rocas metamórficas. Arcillolita gris rojiza, arenosa.	2
Grupo Real (N1r)	Capas gruesas de areniscas conglomeráticas, con fragmentos de guijos finos a medios, con estratificación cruzada, intercaladas con capas medias a gruesas de areniscas cuarzosas tabulares con matriz arcillosa y lodolitas silíceas friables de color gris claro y púrpura grisáceo. Presenta abundante hornblenda y magnetita en varios de los niveles de areniscas relacionada con la actividad volcánica de la cordillera Central que se iniciaría con el Mioceno.	2
Sedimentitas de Segovia (KSe)	Lutitas negras, limolitas, localmente bancos de conglomerado polimíctico y de arenisca gris. Bancos fosilíferos del Hauteriviano al Aptiano.	4
Rocas volcánicas cretácicas (Kv)	Rocas volcánicas de composición básica a intermedia: diabasas, diabasas espilitizadas y basaltos localmente con sedimentitas relacionadas.	4
Batolito de Segovia (J2Se)	Principalmente dioritas con algunas variaciones a dioritas cuarzosas y en ocasiones a gabros hornbléndicos.	4
Formación Noreán (Jnpe)	Alternancia de tobas cristalino-líticas, arenas y lodolitas tobáceas, lodolitas arenitas líticas rojo grisáceas con suelos residuales areno	3
Formación Malena (J1Ma)	Rocas volcánicas félsicas, riolíticos a riolácíticos, brechas volcánicas y tobas. Diques basálticos, lamprófidos, pórfidos andesíticos y traquíuticos	4
Neis de San Lucas (MPsl)	Neis feldespático de alto grado de metamorfismo. Localmente se encuentran lentes de anfibolita.	3
Aluvión (Qal)	Gravas de matriz arcillosa. Se diferencian tres tipos de depósito aluvial; uno antiguo de material heterométrico, redondeado de cuarzo y rocas metamórficas e ígneas en una matriz areno arcillosa; también un depósito aluvial antiguo con cantos de cuarzo y matriz areno arcillosa; y finalmente, depósitos aluviales de gravas heterométricas no consolidados, en las que predominan cuarzoarenitas, cuarzo lechoso, chert, rocas volcano-sedimentarias, metamórficas e ígneas y arenas de grano medio a fino, gravas, arenas y limos. Los cantos son redondeados subredondeados de selección moderada.	1
Terraza Aluvial (Qt)	Conglomerados con granos heterométricos que varían de guijos a cantos, con mala selección, bien redondeados y probablemente cementados. Son roca ígnea y sedimentaria como chert, cuarzoarenitas, granitos y material piroclástico entre otros. Su color varía según el tipo de roca. Tiene una matriz arenosa de grano grueso a medio, moderadamente seleccionado, compuesta por cuarzo, feldespatos, moscovita, líticos, óxidos de hierro y material arcilloso.	2
Coluvio-Aluvial (Qcal)	Depósitos de origen hidrogravitacionales, compuestos principalmente por gravas en una matriz arenosa	2
Fluvio-lacustres (Qfl)	Sedimentos finos, principalmente arenas y material lodoso con altos contenidos de materia orgánica y restos vegetales.	1
Coluviales (Qco)	Estos materiales se originan por acción de la gravedad principalmente asociados a la parte media y baja de las laderas de la Serranía de San Lucas, Su composición varía de acuerdo al tipo de roca origen y están conformados por bloques y cantos angulares, matriz soportados y dispuestos caóticamente.	5

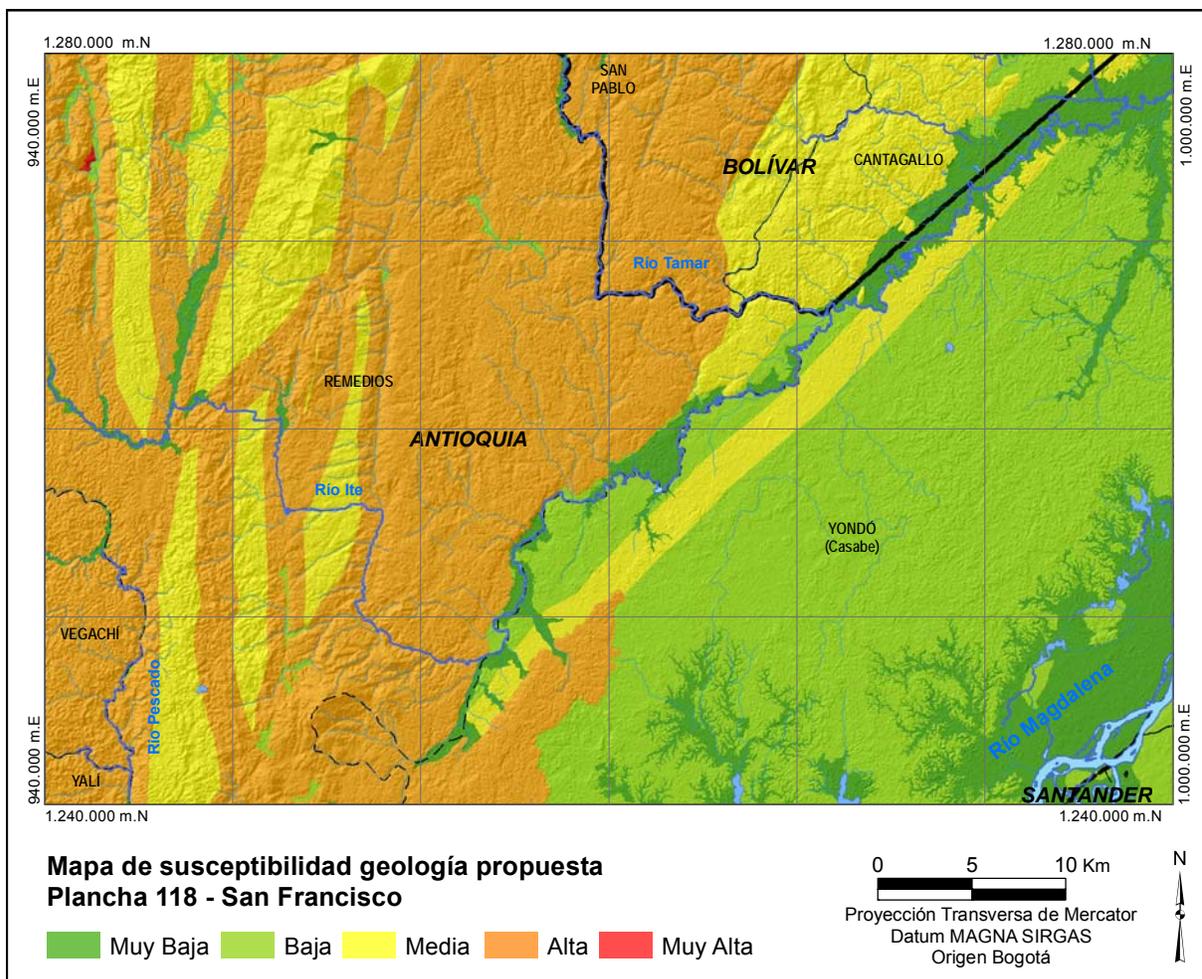


Figura 35. Mapa de susceptibilidad de la variable geología con el modelo propuesto

6.2.2 Susceptibilidad por geomorfología

La susceptibilidad a los movimientos en masa por el parámetro de Geomorfología, representa uno de los componentes de mayor importancia, puesto que define aspectos relacionados con la génesis, litología y procesos de evolución. Estas características permiten conocer el sistema de relaciones espaciales que caracterizan a las formas del terreno. La Geomorfología, según la metodología del SGC (2013), se subdivide en 3 atributos los cuales se explican en el capítulo 6.1.4.

6.2.2.1 Morfogénesis

Durante el proceso de revisión de la metodología y la discusión con los temáticos expertos, se evidenció que en este documento, se clasifican las unidades según el ambiente, el proceso genético (1 – Exógeno y 0 - Endógeno) y el modelado, se considera el aspecto de

construcción (agradación) y destrucción (degradación) de las geoformas. Como gran parte de la ocurrencia de movimientos en masa se encuentran relacionados con transporte y acumulación de material, los procesos agradacionales se califican con la mayor calificación (1) y los degradacionales con la menor (0) (SGC, 2013). Este criterio fue cuestionado debido a que no todas las geoformas con modelado agradacional, presentan una alta susceptibilidad a los movimiento en masa, especialmente aquellas de origen fluvial, se presenta un ejemplo relacionado con los abanicos y las terrazas aluviales, en donde sus escarpes presentan un modelado degradacional, lo cual presenta una susceptibilidad menor en relación con la superficie cuyo modelado es agradacional, los movimientos en masa se presentan en los escarpes; mas no en la superficie, esta situación se presenta también los escarpes de origen denudacional y en las laderas erosivas cuyo modelado es degradacional, las cuales son geoformas con susceptibilidad alta a muy alta, según la metodología del SGC, estarían en la categoría de susceptibilidad media.

Como se está empleando una metodología Heurística, se propone realizar una calificación de acuerdo con el criterio del experto, para esto, se deben tener en cuenta los factores geomorfológicos que inciden en la susceptibilidad de un movimiento en masa. Vargas (1999, p. 133) Sugiere para las metodologías heurística, que se realicen las calificaciones de acuerdo con el conocimiento de la región y/o las observaciones vistas en campo, que no pueden ser cuantificadas, y se recomienda no estandarizar, ni aplicar metodologías de este tipo soportadas en valores preestablecidos de otros estudios.

En la Tabla 23, fueron calificadas y clasificadas las unidades geomorfológicas presentes en la plancha 118, donde se le asignó una escala de 1 a 4, que representa su grado de susceptibilidad y fueron establecidas de acuerdo con los criterios del ambiente, proceso genético y modelado, este último fue modificado de acuerdo con el criterio de los expertos, y según el grado de susceptibilidad asociado a la geoforma. No se emplearon tablas preestablecidas.

Para el cálculo de la susceptibilidad por la variable morfogénesis se realizó la suma de los atributos ambiente, PGenetico, Modelado, los datos empleados se ilustran y describen en la Tabla 23, como resultado del cálculo de la modelación, se obtuvo el mapa de susceptibilidad por la variable morfogénesis, cuyo modelo propuesto fue ajustado, (ver Figura 36).

Tabla 23. Calificación morfogenética de las unidades geomorfológicas

Ambiente	Cod_gmf	Unidad	Pgenetico	Modelado	Calambiente	Calmfgen	
Antropico	Aemc	Explotación minera	1	0	2	3	
Denudacional	DAldi	Lomeríos disectados de altiplano	1	0	2	3	
	Dco	Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión	1	1	2	4	
	Der	Colina residual	1	0	2	3	
	Derd	Colina residual disectada	1	0	2	3	
	Dcrem	Cerro remanente o relicto	1	0	2	3	
	Ders	Cerro residual	1	0	2	3	
	Deem	Escarpe de erosión mayor	1	1	2	4	
	Deeme	Escarpe de erosión menor	1	1	2	4	
	Dld	Loma denudada	1	1	2	4	
	Dlde	Lomo denudado	1	1	2	4	
	Dldebc	Lomo denudado bajo de longitud corta	1	0	2	3	
	Dldebl	Lomo denudado bajo de longitud larga	1	0	2	3	
	Dldeml	Lomo denudado moderado de longitud larga	1	1	2	4	
	Dle	Ladera erosiva	1	1	2	4	
	Dlo	Ladera ondulada	1	0	2	3	
	Dlor	Loma residual	1	0	2	3	
	Dlres	Lomo residual	1	1	2	4	
	Dmo	Montículo y ondulaciones denudacionales	0	0	2	2	
	Dp	Planicie	1	0	2	3	
	Dpcd	Planicie colinada denudada	1	1	2	4	
	Dpcr	Planicie colinada residual	1	1	2	4	
	Dsa	Superficie de erosión o aplanamiento	1	0	2	3	
	Fluvial	Fbc	Barra compuesta	1	1	0	2
		Fbl	Barra longitudinal	1	1	0	2
Fbp		Barra puntual	1	1	0	2	
Fca		Cauce aluvial	1	0	0	1	
Fdc		Divagación de cauce activo	1	1	0	2	
Flg		Laguna	1	0	0	1	
Fma		Meandro abandonado	1	1	0	2	
Fpa		Plano anegadizo	1	1	0	2	
Fpac		Planicie aluvial confinada	1	0	0	1	
Fpi		Plano o llanura de inundación	1	0	0	1	
Fpl		Plano y artesa lagunar	1	0	0	1	
Fta		Terraza de acumulación	1	1	0	2	
Estructural	Sl	Lomos	0	1	3	4	
	Slfe	Escarpe de línea de falla	0	1	3	4	
	Ss	Sierra	0	1	3	4	
	Svc	Plano aluvial confinado	0	1	3	4	

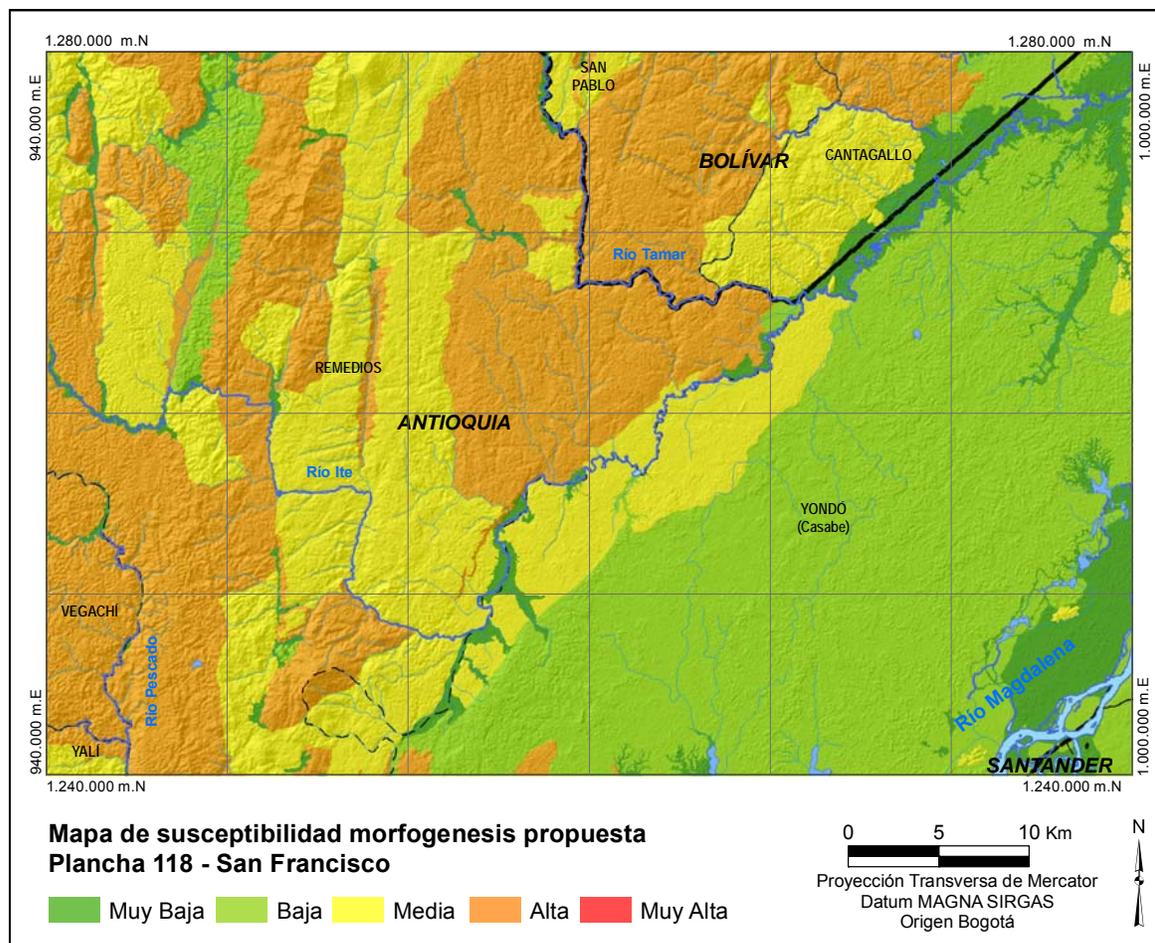


Figura 36. Mapa de susceptibilidad por la variable morfogénesis propuesta

6.2.2.2 Morfodinámica

La generación del atributo morfodinámica, se realizó a partir de la densidad de movimientos en masa, se empleó un radio de 1 kilómetro, (ver la Tabla 24), calificación para el atributo densidad de movimiento en masa; además, se incorporaron las representaciones cartográfica de geformas dinámicas y la representación cartográfica de los movimientos en masa, reportados en la plataforma SIMMA y CORANTIOQUIA, de la fotointerpretación e identificación en sensores remotos y el inventario de campo, en este caso no se empleó el atributo relieve relativo e inclinación de ladera; ya que corresponden a atributos netamente morfométricos, y se realizó la superposición de los movimientos en masa, sobre las geformas dinámicas y estos a su vez, sobre el atributo densidad de movimientos en masa ver Figura 37. Se puede mejorar este modelo incluyendo los procesos de degradación del terreno y erosión, como pueden ser las terracetas (patas de vacas), los tipos de erosión, el grado entre otras variables.

Tabla 24. Calificación del atributo densidad de movimiento en masa

Calificación	Densidad por Km ²
Muy Baja	0 - 0,125
Baja	0,125 - 0,5
Media	0,5 - 1,125
Alta	1,125 - 2,25
Muy Alta	> 2,25

Fuente: Autor

Se observó que los procesos de degradación del terreno tienen una relación directa para la generación futura de movimientos en masa, las actividades del sobrepastoreo y el uso inadecuado del suelo pueden contribuir a generar movimientos.

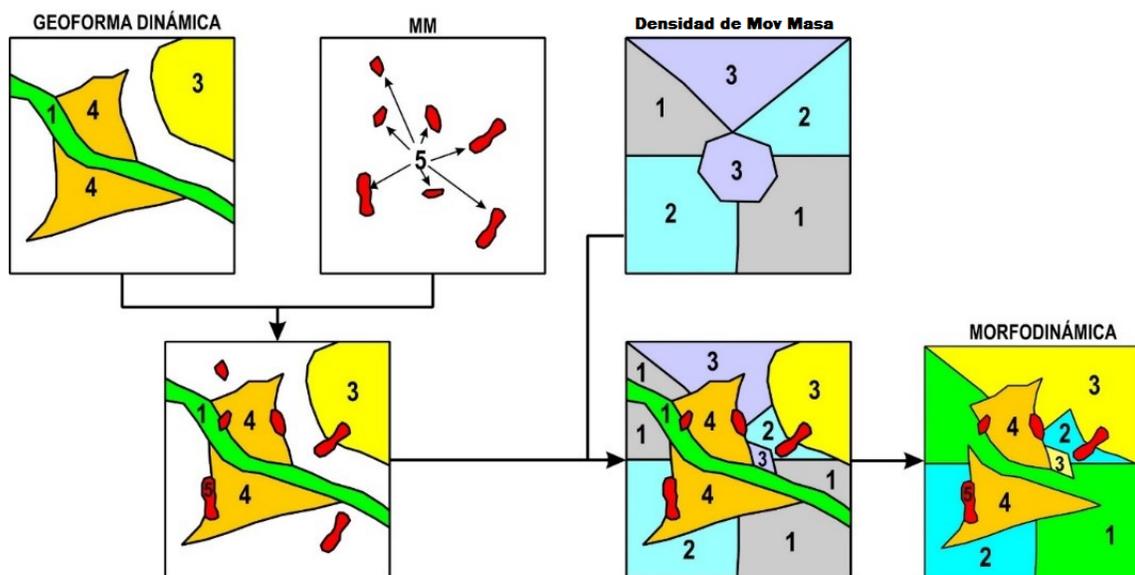


Figura 37. Proceso de generación del atributo morfodinámica

En este estudio fueron utilizados 170 movimientos en masa, correspondientes al estudio desarrollado por la Universidad de Pamplona y el Servicio Geológico Colombiano (SGC) suscritos en el convenio especial 025 de 2013, específicamente los movimientos de la plancha 118 San Francisco, también se incorporaron 292 movimientos en masa, reportados por la Corporación Autónoma Regional de Antioquia (CORANTIOQUIA), y a partir de la interpretación de imágenes de sensores remotos, se identificaron 590 movimientos en masa, localizados en un mayor porcentaje, hacia el occidente de la falla Palestina y la falla El Bagre. En la Figura 38, se ilustran algunos deslizamientos capturados a partir de imágenes de sensores remotos y fotografías aéreas a color. Los movimientos de mayor predominancia son los deslizamientos rotacionales y los flujos.



Figura 38. Enjambre de deslizamientos sobre laderas deforestadas

En la Figura 39, se representa el mapa de susceptibilidad por morfodinámica, los círculos en color rojo representan los movimientos en masa, se evidencian tres (3) zonas con alta distribución de movimientos en masa; la primera localizada al occidente de la plancha, la segunda situada entre los ríos Ite y Pescado y la tercera hacia norte del río Ite, en la zona central de la plancha. Los municipios con mayor número de movimientos en masa se encuentran Remedios, Vegachí y Yalí.

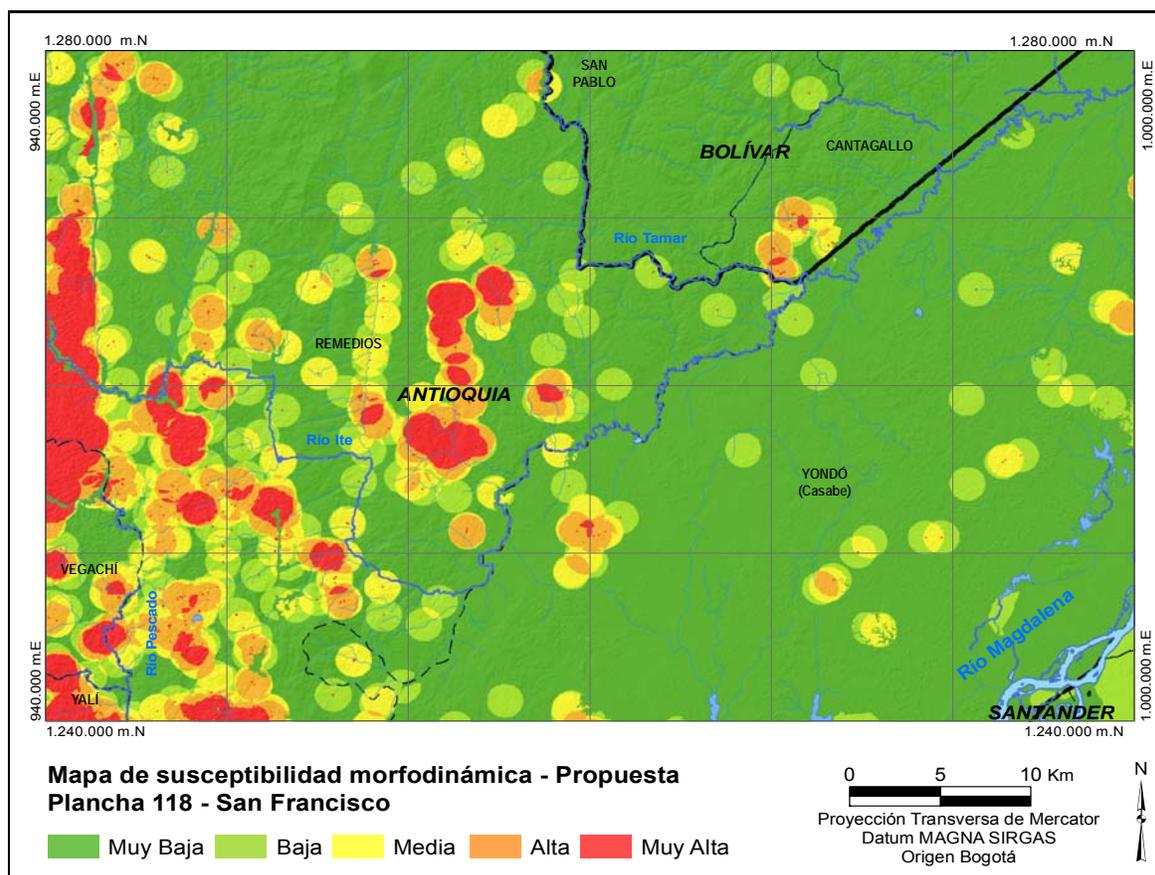


Figura 39. Mapa de susceptibilidad por la variable morfodinámica

6.2.2.3 Morfometría

Se definieron las relaciones espaciales relativas de la unidad geomorfológica e incluye aspectos morfográficos; dentro del proceso de valoración y cuantificación. La morfometría evalúa parámetros representados en términos de pendiente, rugosidad y acuenca, usando como insumo principal el modelo digital de elevación (DEM) y que posteriormente son procesados aritméticamente. No se realizaron cambios en esta variable, se empleó lo modelo propuesto por le SGC.

$$\mathbf{Mm = Pe (60\%) + Ru (30\%) + Ac (10\%)}$$

Dónde:

Mm = Morfometría

Pe = Pendientes

Ru = Rugosidad

Ac = Acuenca

6.2.2.4 Susceptibilidad de la variable geomorfología

Para el cálculo de la susceptibilidad por la variable geomorfología, se emplearon los atributos morfogénesis, morfometría y morfodinámica; las ponderaciones de cada atributo se mantuvieron igual a los expuestos por la metodología del Servicio Geológico Colombiano, (ver Figura 40 y Figura 41), la representación cartográfica de la susceptibilidad a los movimientos en masa por la variable geomorfología, según el modelo propuesto se ilustra en la Figura 42.

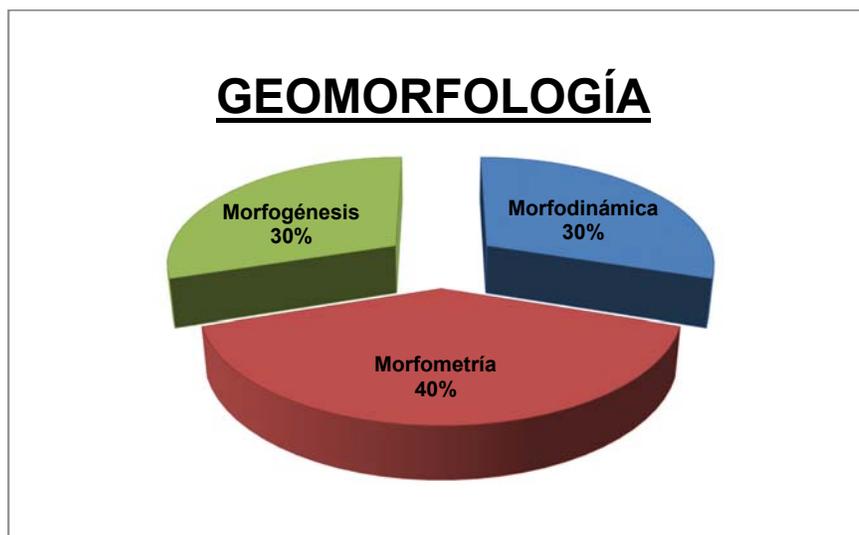


Figura 40. Porcentajes empleados para la susceptibilidad por la variable Geomorfología

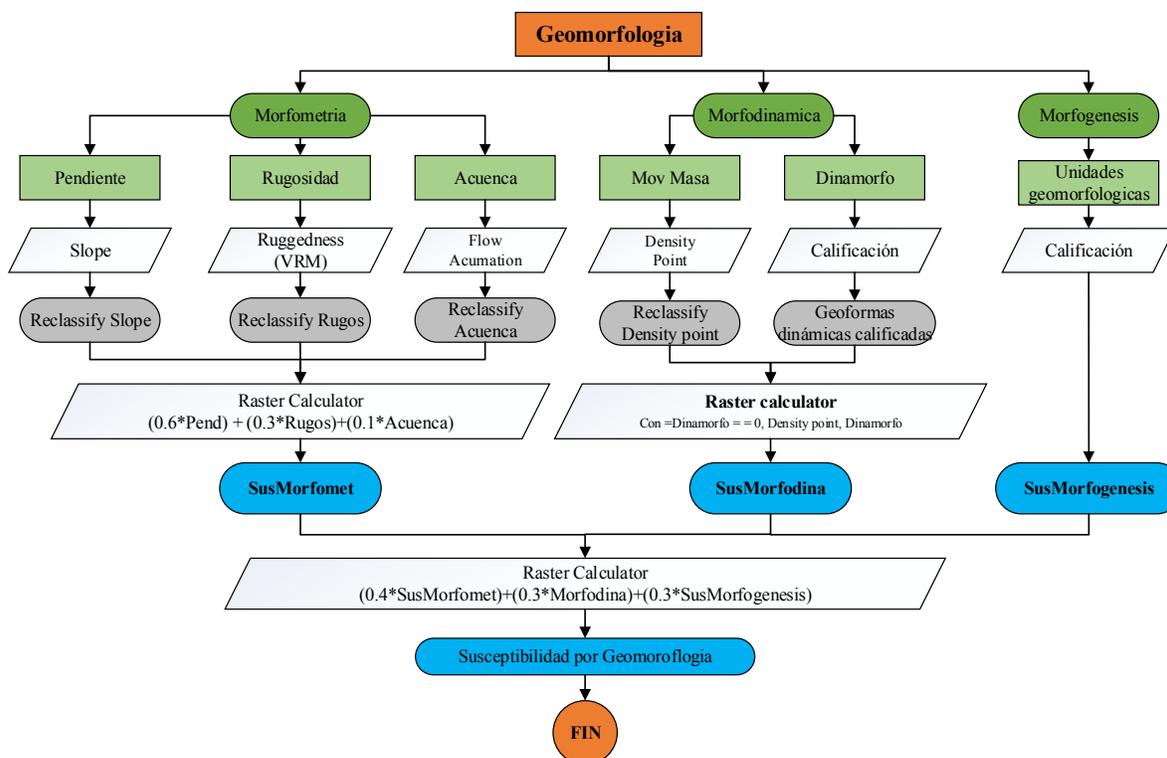


Figura 41 Proceso de generación de la variable geomorfología en el software ArcGis 10.2

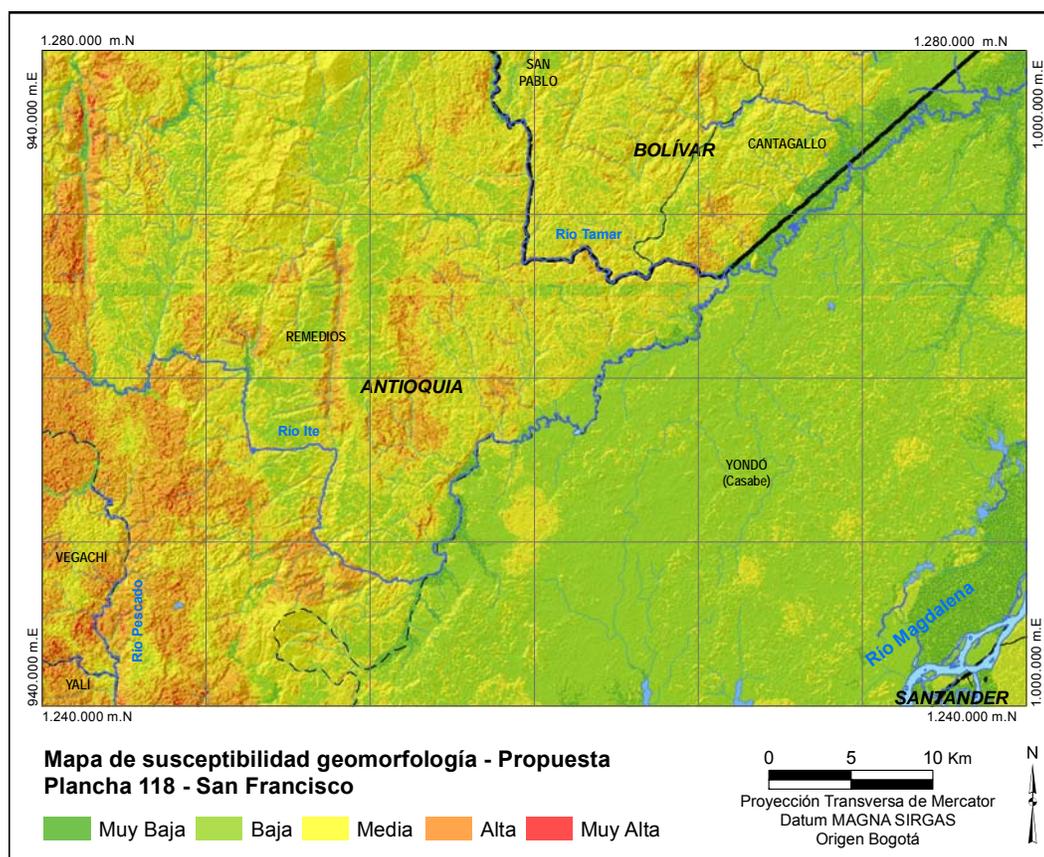


Figura 42. Mapa de susceptibilidad por la variable geomorfología propuesta

6.2.3 Susceptibilidad por suelos edáficos

Para la susceptibilidad por la variable suelos edáficos, se empleó el modelo desarrollado por Rosas (2014). En este modelo se incorporan: el atributo pendiente, cobertura vegetal, y las propiedades físicas química de las arcillas y se mantiene para la textura y la profundidad los parámetros empleados en la metodología expuesta por el SGC, (Figura 43).

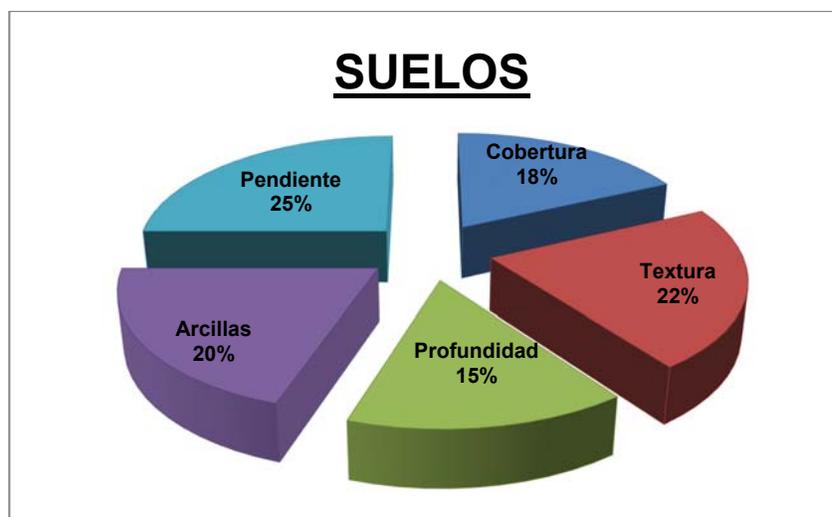


Figura 43. Diagrama de atributos empleados en los suelos edáficos. Modificado de Rosas (2014)

6.2.3.1 Pendiente

Varnes (1978), considera las pendientes de gran importancia en el estudio de los movimientos de ladera, estableciendo el ángulo de la pendiente, como la variable de mayor influencia en el desarrollo de movimientos de ladera de terrenos montañosos. Plantea, que al aumentar el ángulo de la pendiente de la ladera, disminuye el peso y por consiguiente el volumen del material afectado por unidad de área. Se suele expresar en porcentaje, y en grados sexagesimales. (Tabla 25).

Tabla 25. Clases de pendiente

Porcentaje	Calificación
0 7%	1
7 12%	2
12 25%	3
25 50%	4
50 >75%	5

Fuente: Rosas (2014)

6.2.3.2 Arcillas

Se toman como referencias las tablas propuestas por SGC, con la adición para una posible mejor identificación de las mismas con base a la *capacidad de intercambio catiónico* (CIC) para cada perfil de los suelos. En la Tabla 26, se sugiere las calificaciones para el CIC encontrada en los perfiles obtenida de las propiedades químicas de los estudios.

Tabla 26. Calificación de CIC

Material	CIC meq /100g suelo	Calificación
Halloysita 2H ₂ O	Menor a 15	1
Caolinitas		
Sepiolita Atapulgita		
Illita y Clorita	15 a 40	2
Halloysita 4H ₂ O	40 50	3
Alofanas (suelos volcánicos)	50 a 150	4
Esmecticas (Montmorillonita)		
Vermiculita	Mayores a 160	5
Materia orgánica		

Fuente: Rosas (2014)

6.2.3.3 Cobertura vegetal

Esta se derivó de la capa de cobertura Corine Land Cover del año 2007, suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), fue la variable que se tuvo en cuenta como factor condicionante para identificar la susceptibilidad a movimientos en masa. Para su calificación se tomaron las tablas de referencia que incluyen valores de acuerdo al tipo de cobertura, (ver Tabla 27).

Tabla 27. Calificación de cobertura vegetal

Sistema de Clasificación de Coberturas de la Tierra.	Calificación
Aguas cont. naturales	1
Hidrofilia continental	
Arbustales	2
Bosques naturales	
Pastos	
Áreas agrícolas heterogéneas	3
Cultivos Anuales o Transitorios	
Vegetación secundaria	4
Zonas desnudas	5

Fuente: IGAC and CORANTIOQUIA (2014)

En la Figura 44 se ilustran los procedimientos para el cálculo de la susceptibilidad por la variable suelos edáficos, y el resultado obtenido empleando la metodología propuesta por Rosas (2014) se ilustra en la Figura 45.

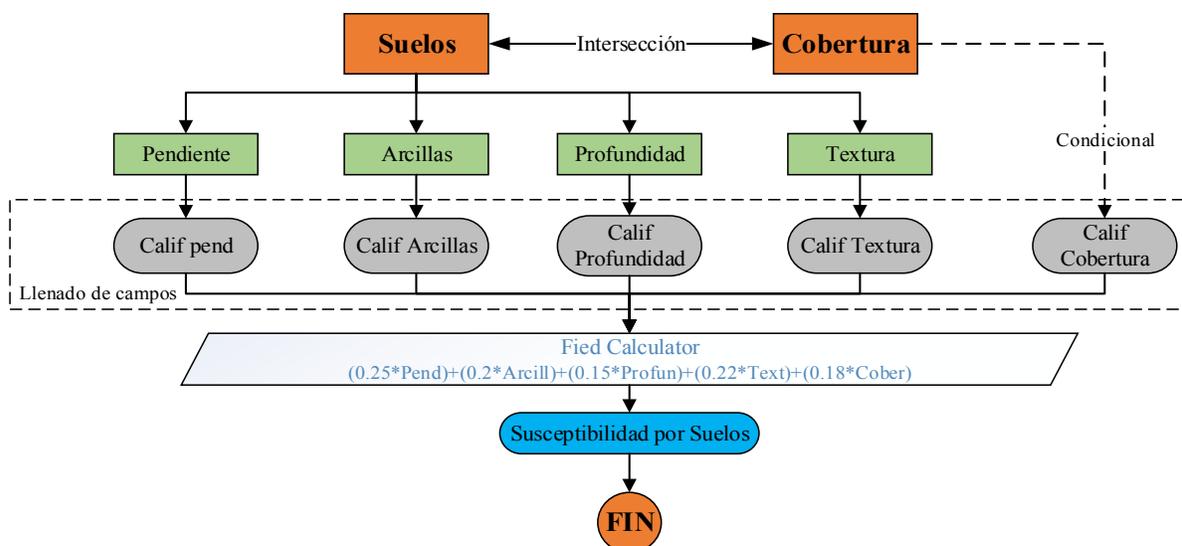


Figura 44. Procedimiento para el cálculo de la susceptibilidad de la variable Suelos Edáficos en el software ArcGis 10.2.

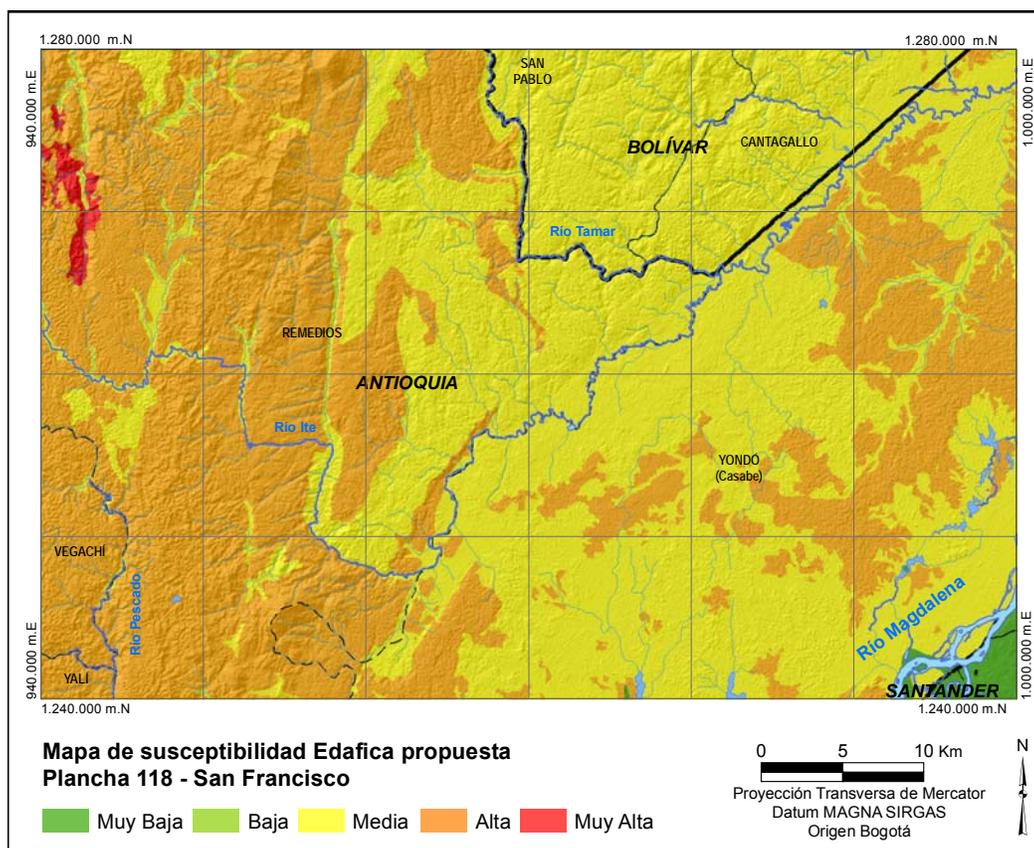


Figura 45. Mapa de susceptibilidad de la variable suelos, empleando el modelo de Rosas (2014)

6.2.4 Susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa

Para la generación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, se emplean las diferentes variables de tipo cualitativo y cuantitativo. Dentro de las variables cualitativas se encuentran: la geología, geomorfología, suelos y cobertura de la tierra y dentro las variables cuantitativas se encuentran: la pendiente, rugosidad y acuenca, las cuales se derivan del modelo digital de elevación (DEM). Se aplicó un análisis multicriterio, a partir del método (AHP) que involucra la utilización de datos geográficos, debiendo establecer las preferencias y combinaciones (o agregaciones) de los datos, de acuerdo a reglas de decisiones específicas que han sido implementados en ambiente SIG.

El proceso para la generación de la susceptibilidad a movimientos en masa se ilustra en la Figura 46. Se aplicaron los porcentajes a las variables expuestas en la metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombiano (SGC 2013). (Ver Figura 47),

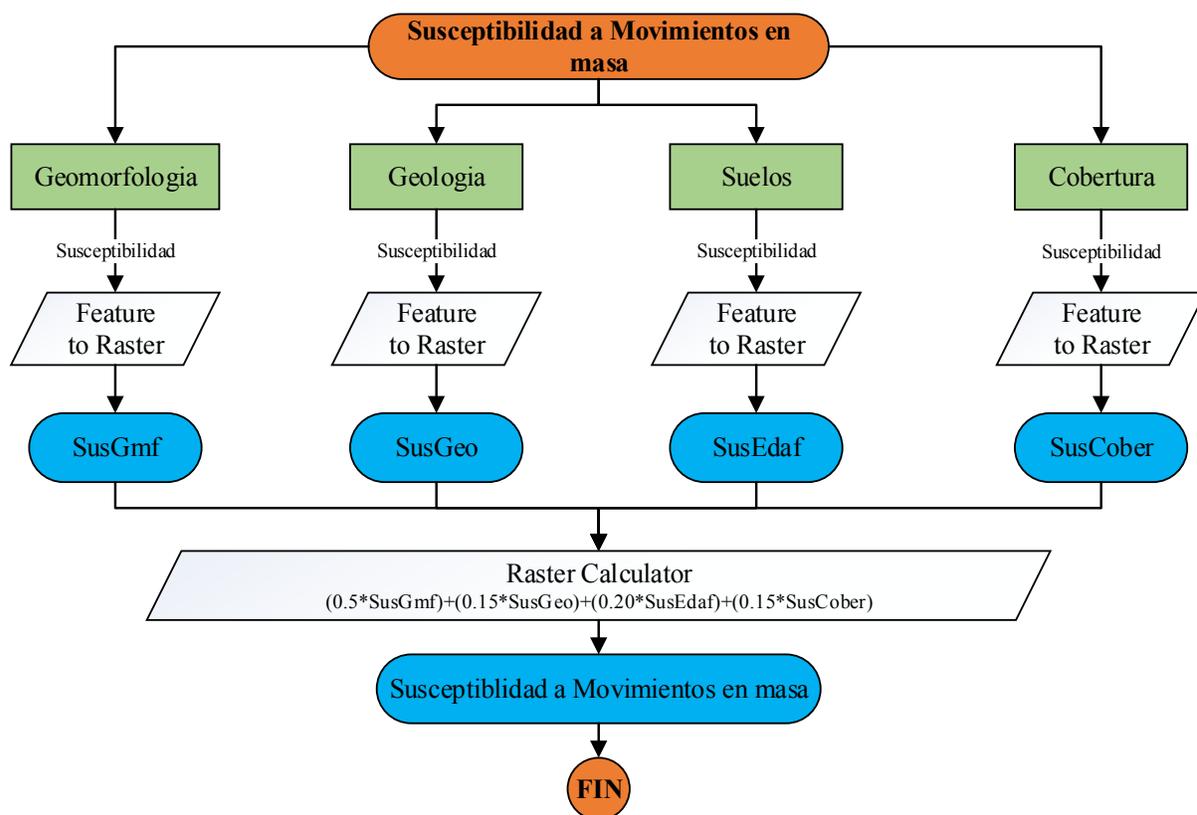


Figura 46. Procedimientos para el cálculo de susceptibilidad a Movimientos en masa

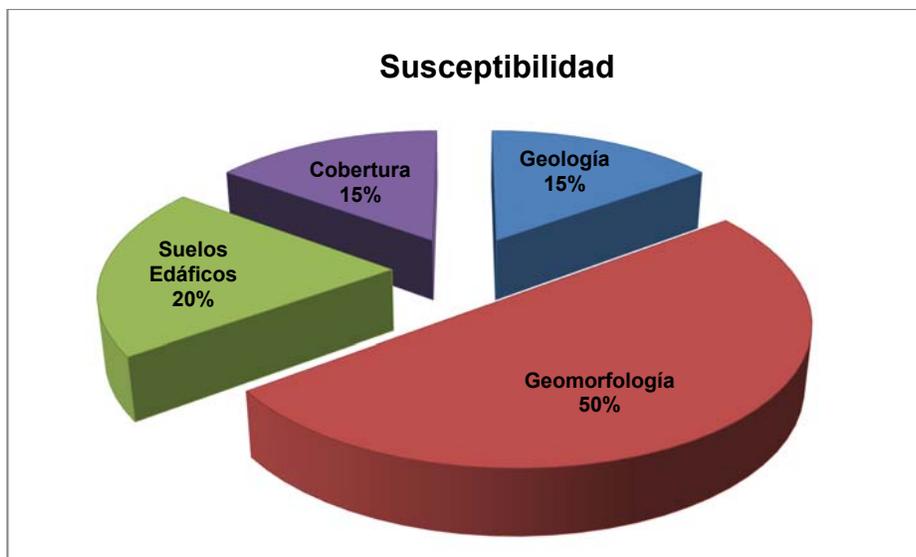


Figura 47. Variables y ponderaciones para susceptibilidad.

En la Figura 48, se ilustra el mapa de susceptibilidad propuesto, obtenido con los nuevos atributos y cambios en algunas ponderaciones, los cambios se realizaron en los atributos de la variable geología, geomorfología y se empleó el modelo desarrollado por Rosas (2013) para suelos, en la variable cobertura no se realizaron cambios en este trabajo.

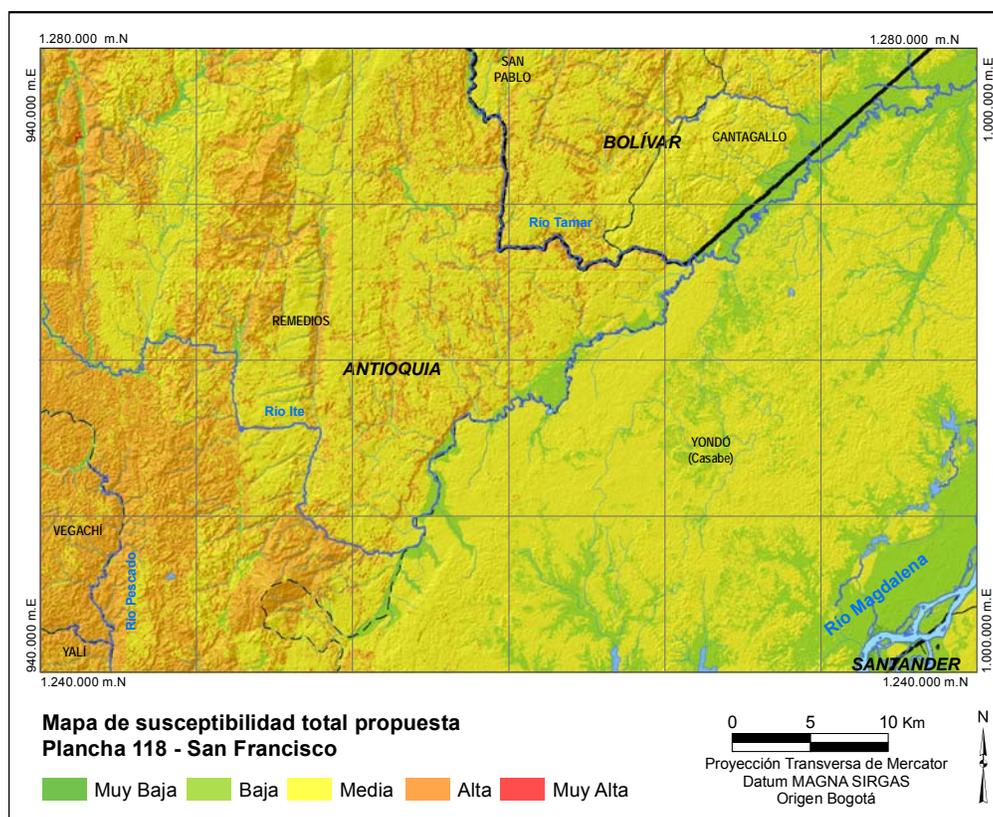


Figura 48. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa propuesto.

La Amenaza Relativa a movimientos en masa se realizó empleando el mapa de susceptibilidad propuesto con los factores condicionantes y la metodología propuesta por el SGC, (ver capítulo 6.1.6.3), el procedimiento empleado para la obtención de la amenaza relativa se ilustra en la Figura 49 resultado de la amenaza relativa empleando el modelo de susceptibilidad propuesto se representa en la Figura 50.

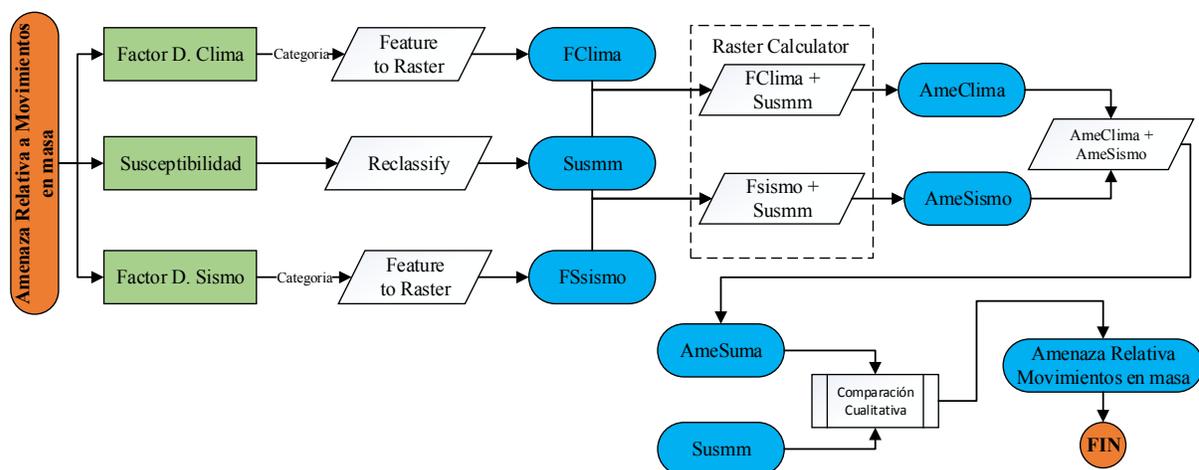


Figura 49. Procedimientos para el cálculo de la Amenaza Relativa a Movimientos en masa

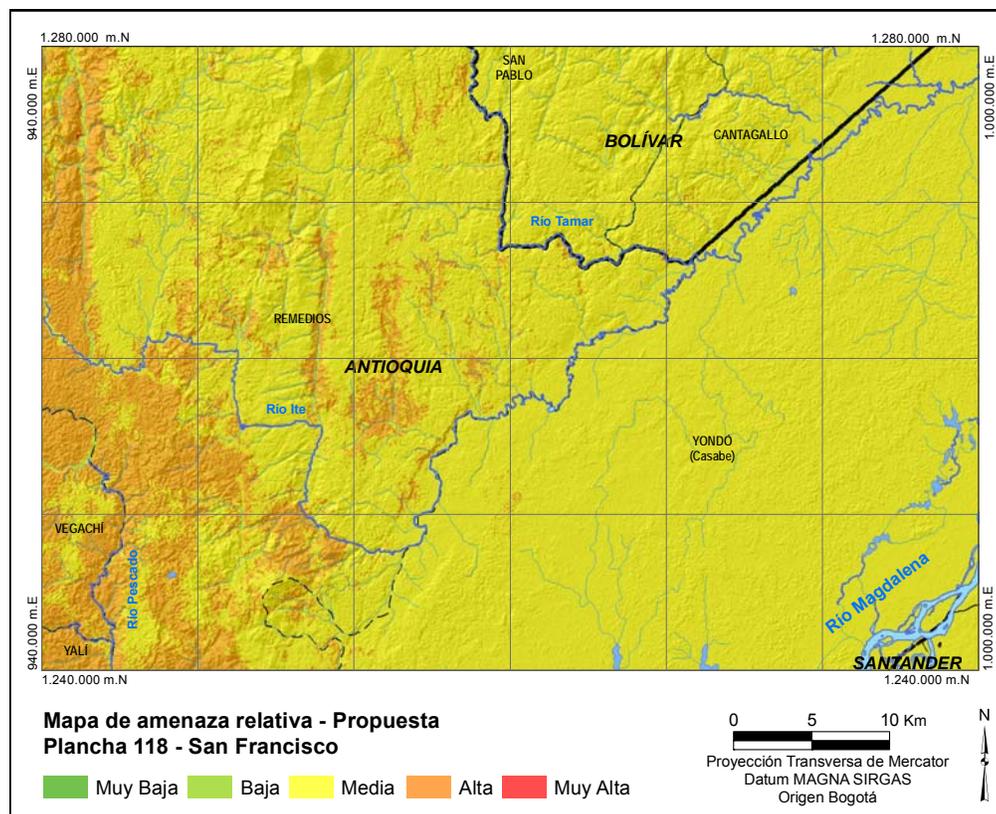


Figura 50. Mapa de amenaza relativa empleando el modelo propuesto

7 Resultados y Discusión

Desarrollada la metodología anterior, se obtuvo el mapa de susceptibilidad a partir de las variables geología, geomorfología y suelos edáficos; susceptibilidad total y la amenaza relativa a los movimientos en masa, los cuales fueron comparados con los resultados obtenidos aplicando la metodología del (SGC, 2013), donde se relacionan los movimientos en masa identificados y cartografiados, junto con los movimientos en masa reportados en el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) y los facilitados por la Corporación Autónoma Regional de Antioquia (CORANTIOQUIA).

7.1 Variable geología

En este modelo se utilizó el atributo de la meteorización para determinar la calificación de la susceptibilidad por la variable geología, y cuando no se tenían los datos del nivel de meteorización, se consideraron como roca fresca. Este atributo no fue tenido en cuenta en la aplicación del modelo del SGC, 2013. De acuerdo con el criterio de los expertos consultados para este trabajo, se manifiesta una subvaloración de la calificación para las formaciones con rocas cristalinas.

A diferencia del modelo del SGC, donde predomina el nivel de susceptibilidad muy baja y baja (Figura 51); para las unidades cristalinas de la formación Gneis de San Lucas, Batolito de Segovia, formación Malena, en la propuesta que se analizó, los suelos residuales de estas formaciones presentan una textura arenosa (granos de cuarzo) embebidos en matriz arcillo- limosa derivada de la descomposición de los feldespatos y minerales ferromagnesianos, que se saturan fácilmente y, por evidencia empírica, son muy susceptibles a los movimientos de masa, por lo cual en este modelo propuesto se obtuvo una calificación de susceptibilidad alta (ver Figura 52).

Unas de las bondades de este modelo propuesto, se aprecia en los resultados mostrados en la Tabla 28, en donde la mayor densidad de movimientos en masa identificados, se presenta en el nivel de susceptibilidad alta, en comparación con los resultados obtenidos en el (2015), como producto del desarrollo del convenio celebrado entre la Universidad de Pamplona (UP and SGC (2015), en donde la mayor cantidad de movimientos en masa, se presentan en los niveles de susceptibilidad muy baja y media. En él área, por ser muy plana, no se reportaron movimientos en los niveles de susceptibilidad alta y muy alta.

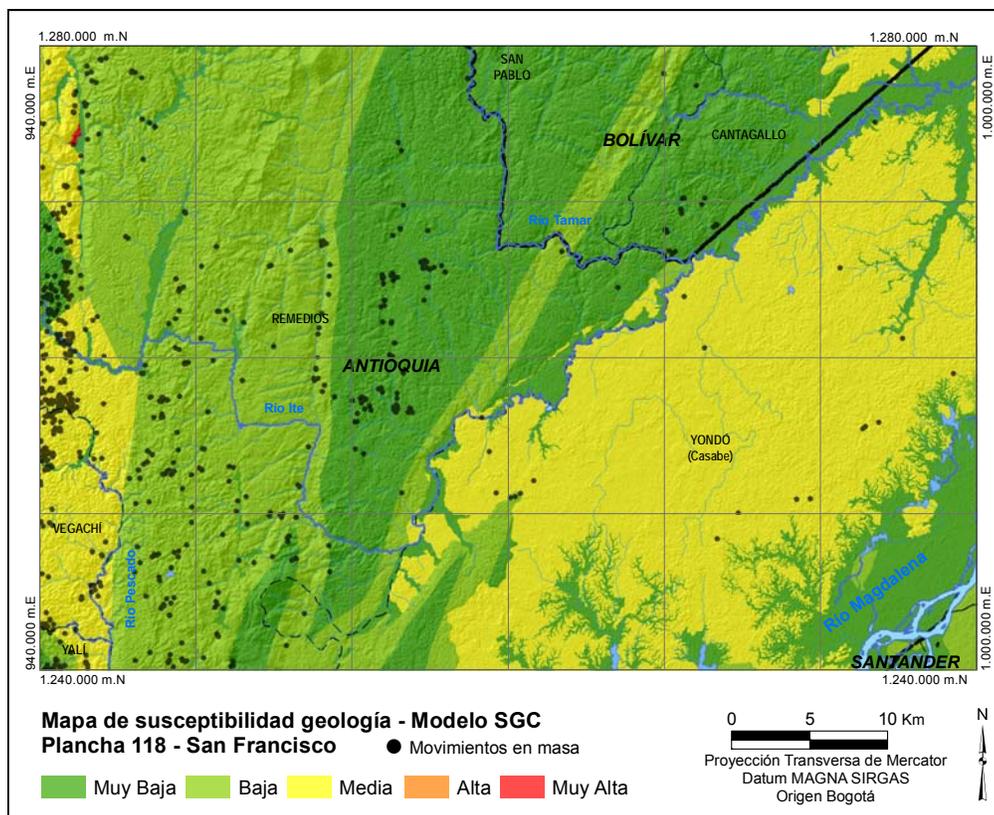


Figura 51. Mapa de susceptibilidad por la variable geología modelo SGC

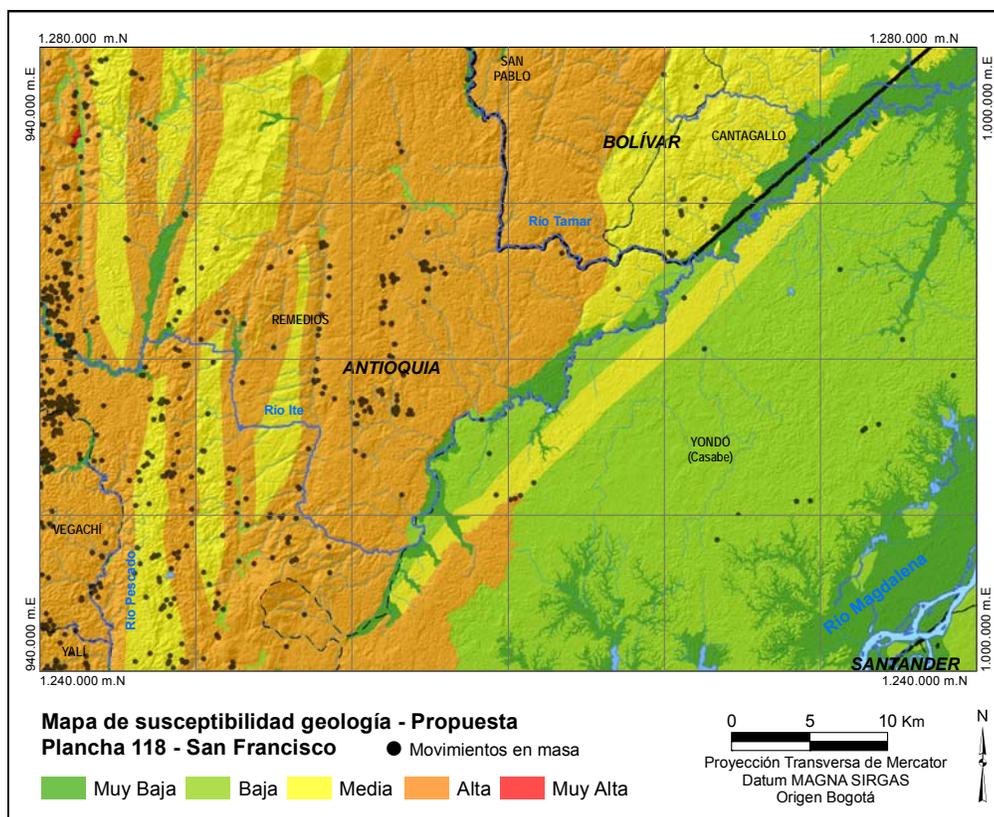


Figura 52. Mapa de susceptibilidad por la variable geología propuesta

Tabla 28. Comparación estadística del modelo propuesto vs modelo del SGC para la variable geología

Modelo Propuesto			Modelo SGC		
Calificación	Porcentaje de Movimiento	Porcentaje de área	Calificación	Porcentaje de Movimiento	Porcentaje de área
Muy Baja	4%	12%	Muy Baja	29%	36%
Baja	5%	28%	Baja	35%	29%
Media	26%	18%	Media	37%	35%
Alta	66%	42%	Alta	0%	0%
Muy Alta	0%	0%	Muy Alta	0%	0%

Fuente: Autor

Adicionalmente para el ajuste de la variable geología, se incorporaron los criterios, textura, fabrica y estructuras geológicas lineales. Este último es otro aporte del estudio a la temática, el cual se realizó aplicando un área de influencia o buffer de un kilómetro alrededor de la falla, y en la calificación se tuvo en cuenta la tasa de desplazamiento anual de las mismas.

El modelo planteado logra una mejor zonificación al presentar una menor dispersión de movimientos vs el área zonificada con susceptibilidad alta y muy alta, es decir que la probabilidad de encontrar un movimiento en masa dentro de las áreas zonificadas como altas aumenta. En la Tabla 28, se aprecia que en el modelo desarrollado por el SGC, no genera una alta correlación en el número de movimientos presentes por las categorías de susceptibilidad alta y muy alta.

De igual forma en el modelo propuesto, se identifica una zonificación de susceptibilidad alta, la cual cubre un 42% del área de la plancha y en donde ocurre el 66% de los movimientos en masa. Este porcentaje (42%), podría variar en la medida que se mejore el detalle y la calidad de la cartografía geológica, como se mencionó anteriormente en el numeral 6.2.1.

En el modelo propuesto, se obtiene una mejor correlación de los movimientos en masa con las áreas cartografiadas con el nivel de susceptibilidad alta; mientras que en el modelo del SGC, se observa la ausencia del nivel de susceptibilidad alta, pero en cambio, se identificó un alto porcentajes de movimientos (64%), en los niveles de susceptibilidad muy baja y baja.

Por supuesto, la calificación propuesta, podrá ser mejorada en futuras investigaciones con la elaboración de una cartografía más detallada y orientada hacia el fin propuesto y con mayor trabajo de campo, en el que se pueda caracterizar mejor los materiales para determinar texturas, grado de meteorización y parámetros geomecánicos.

7.2 Variable suelos edáficos

Rosas (2014) y Lopez (2015), mencionan que la variable suelos edáficos propuesta por el SGC, presenta una sobrevaloración en las zonas planas, correspondiente a los paisajes de planicie y valle, donde no es común encontrar movimientos en masa; mientras que en los paisajes de montaña y lomerío podrían estar subvalorada la susceptibilidad total, dado que en estos paisajes, son comunes los deslizamientos, ocasionados por diferentes agentes, tanto naturales como antrópicos, (ver Figura 53). Por lo cual, se trata de explicar con base en las variables tomadas en la calificación: En primer lugar, el concepto de taxonomía, es muy genérico para el grado de evolución de los suelos, a nivel de orden.

De igual forma ocurre con la calificación del tipo de arcilla, al incorporar los análisis mineralógicos específicos y cuantitativos de la abundancia de un tipo de arcilla para los perfiles de suelo. El SGC recurre a la aproximación muy subjetiva y gruesa de la presencia de arcillas caolinita, montmorillonitas, vermiculitas, alófana entre otras, de acuerdo al orden o Subgrupo de la jerarquía taxonómica de los suelos.

Las dos variables anteriores, tienen un peso en el modelo de un 35%, con un alto grado de incertidumbre en el momento de calificar y por esto, se pueden generar subvaloraciones o sobrevaloraciones. El drenaje natural es muy genérico en la escala del estudio de suelos utilizados como referencia, y que en ellos, se considera que en las zonas montañosas y en los lomeríos, siempre están bien drenados, lo cual no contribuye para los movimientos en masa.

Por último, la textura y la profundidad total, la primera guarda relación directa con el comportamiento físico mecánico de la fracción mineral del suelo y la segunda con el volumen susceptible a ser desplazado, con la salvedad que en ambos, solo es posible su análisis hasta 1,50 m de profundidad. Esto genera una mayor incertidumbre sobre el comportamiento del regolito que podría subyacer el suelo a una mayor profundidad a la analizada.

La calificación del tipo de arcilla fue modificada e inferida con base en la capacidad de intercambio catiónico (CIC), que esta reportada en la totalidad del perfil del suelo en las UCS con sus respectivos análisis de laboratorio, permitiendo eliminar la subjetividad en la calificación por la importancia que esta tiene en la susceptibilidad a los movimientos en masa.

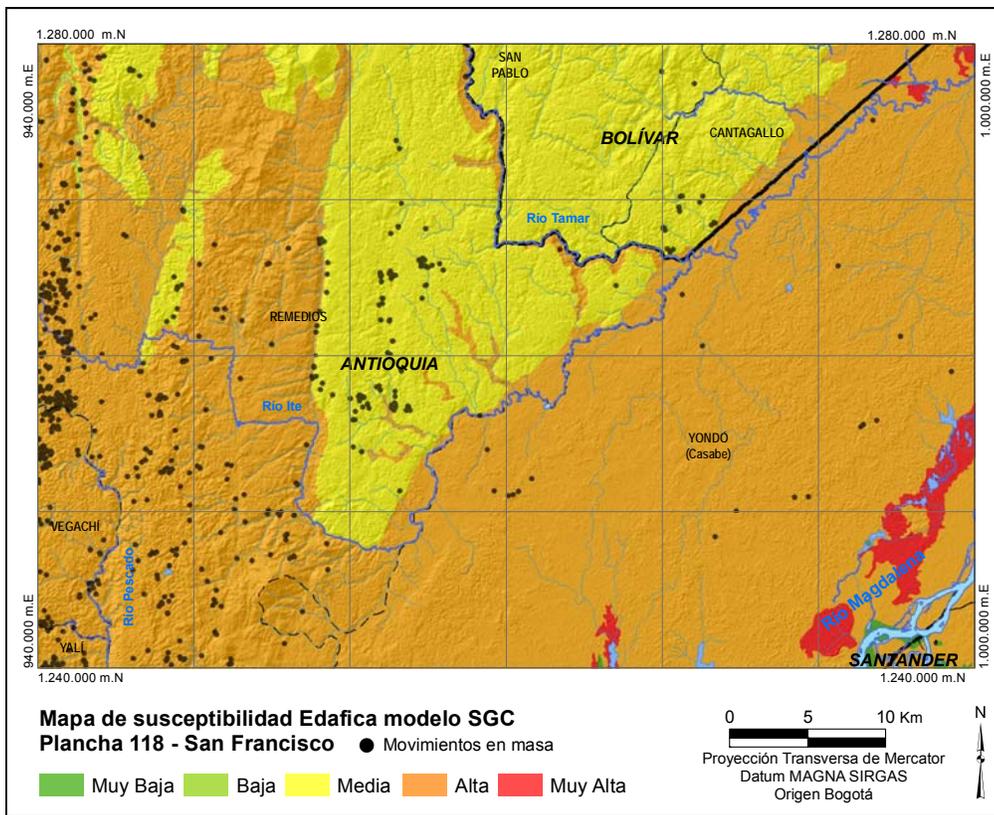


Figura 53. Mapa de susceptibilidad por la variable suelos edáficos modelo SGC

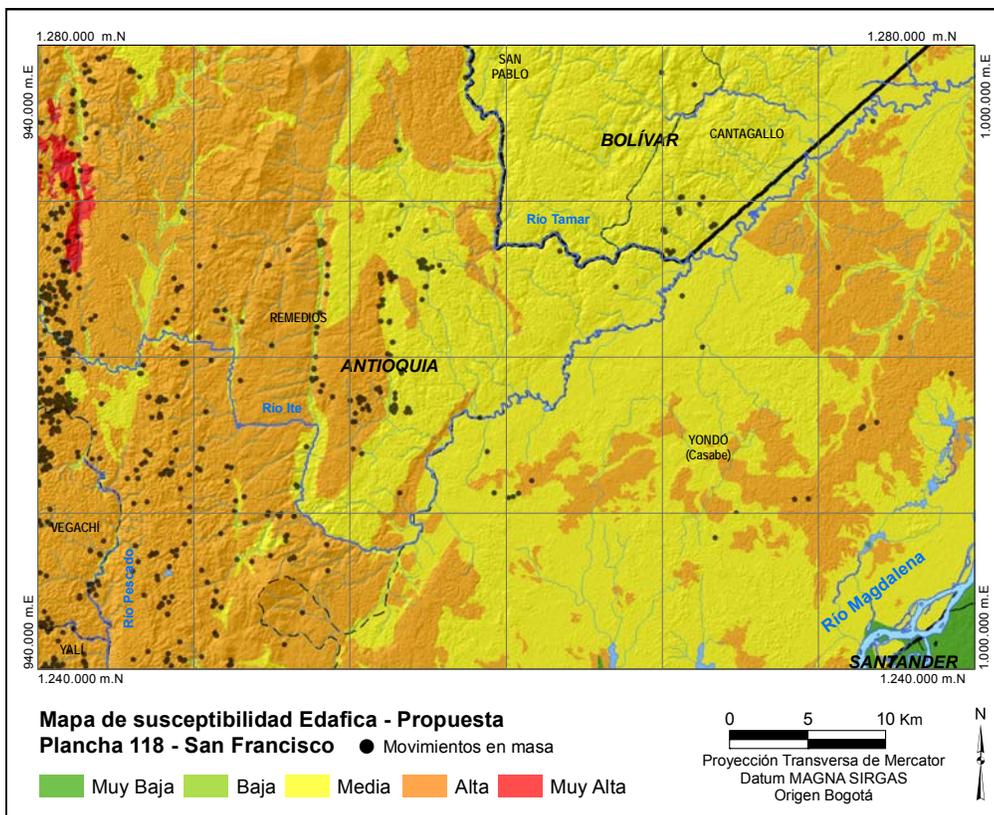


Figura 54. Mapa de susceptibilidad por la variable suelos edáficos propuesta

Adicionalmente, se incluyeron como variables asociadas al suelo, la cobertura y la pendiente, logrando el mapa de susceptibilidad propuesto por la variable suelos edáficos, (ver Figura 54).

De acuerdo con el teorema de probabilidad condicional (Johnson, 1997), en el modelo propuesto por (Rosas (2014)), se logra una menor dispersión de área entre los movimientos y las áreas demarcadas, las zonas demarcadas con susceptibilidad alta cubre el 45% total del área de la plancha. donde se encuentran el 66% de los movimientos en masa, en el modelo del SGC, se cartografió la susceptibilidad alta en un 70% de la plancha, en donde se tienen el 79% de los movimientos (ver Figura 55 y Tabla 29).

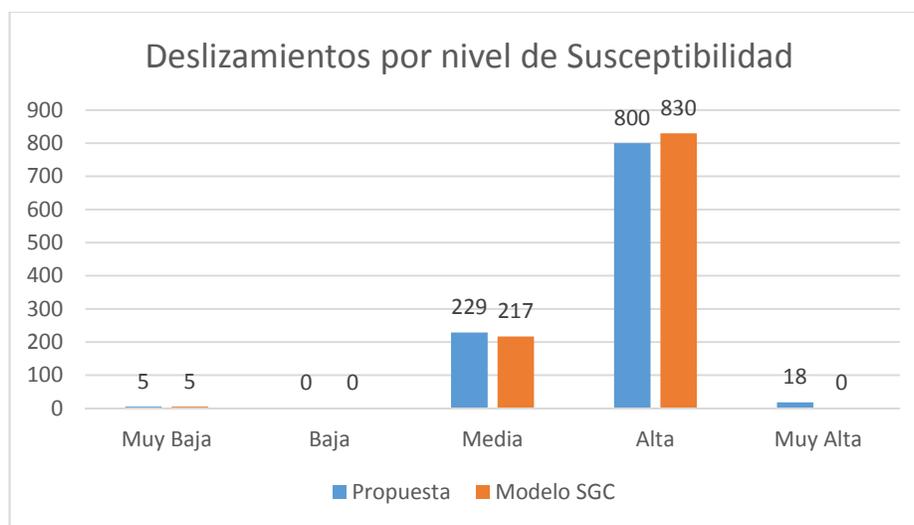


Figura 55. Número de deslizamiento por categoría de susceptibilidad de la variable suelos edáficos

Tabla 29. Comparación estadística de modelo propuesto vs modelo SGC, para la variable suelos edáficos

Modelo Propuesto			Modelo SGC		
Calificación	Porcentaje de Movimiento	Porcentaje de área	Calificación	Porcentaje de Movimiento	Porcentaje de área
Muy Baja	0%	2%	Muy Baja	0%	1%
Baja	0%	0%	Baja	0%	0%
Media	22%	52%	Media	21%	27%
Alta	76%	45%	Alta	79%	70%
Muy Alta	2%	1%	Muy Alta	0%	2%

Fuente: Autor

7.3 Variable geomorfología

Esta variable se compone de los atributos morfogénesis, morfodinámica y morfometría, el primero sufrió cambios en la calificación del atributo modelado, en donde se establecieron calificaciones de acuerdo con el criterio del experto, con relación a las geoformas propensas a generar movimientos en masa, el segundo presentó cambios del componente *Relaincli*, y el cual fue remplazado por el atributo densidad de *movimientos en masa*.

Se observa que hay una mejor discriminación de las áreas con susceptibilidad alta y muy alta, en las Figura 56 y Tabla 30, el modelo del SGC, no presenta una correlación alta entre los niveles de susceptibilidad alta con la presencia de los movimientos en masa, y además presenta una dispersión muy alta, el 86% de los movimientos en masa se encuentran en susceptibilidad baja y media, y estas categorías cubren el 98% del área total de la plancha, (ver Figura 57). En cambio, el modelo propuesto presenta un 82% de los movimientos en masa y se encuentran en las categorías de alta y muy alta, y estas categorías cubre solo el 14% del área total de la plancha, (ver Figura 58).

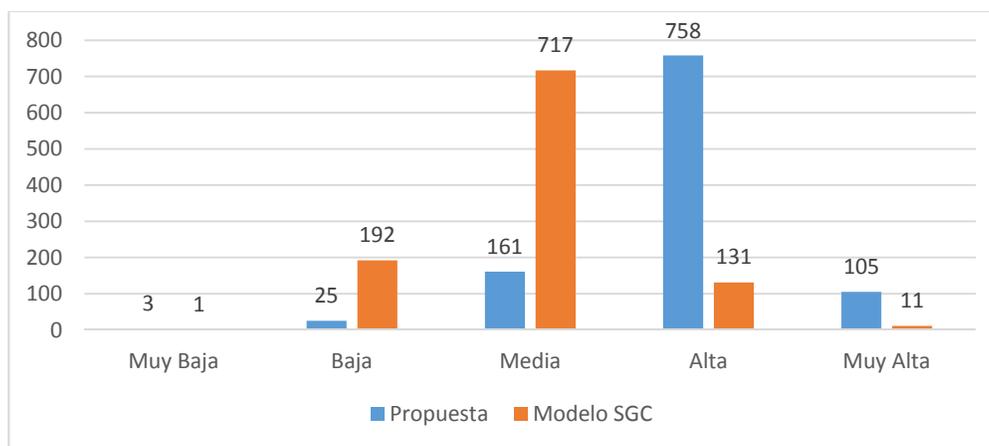


Figura 56. Movimientos en masa por nivel de susceptibilidad de la variable geomorfología

Tabla 30. Comparación del modelo propuesto vs modelo SGC, para la variable geomorfología

Modelo Propuesto			Modelo SGC		
Calificación	Porcentaje de Movimiento	Porcentaje de área	Calificación	Porcentaje de Movimiento	Porcentaje de área
Muy Baja	0%	0%	Muy Baja	0%	0%
Baja	2%	48%	Baja	18%	55%
Media	15%	38%	Media	68%	43%
Alta	72%	13%	Alta	12%	2%
Muy Alta	10%	1%	Muy Alta	1%	0%

Fuente: Autor

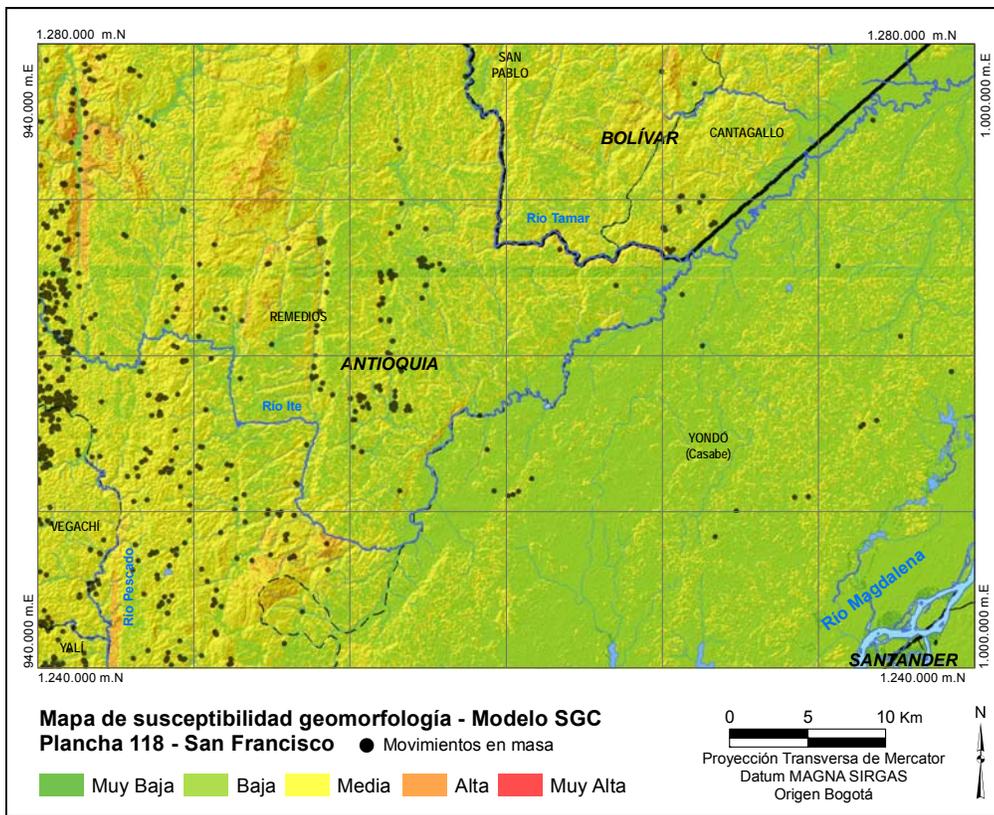


Figura 57. Mapa de susceptibilidad por la variable geomorfología modelo SGC

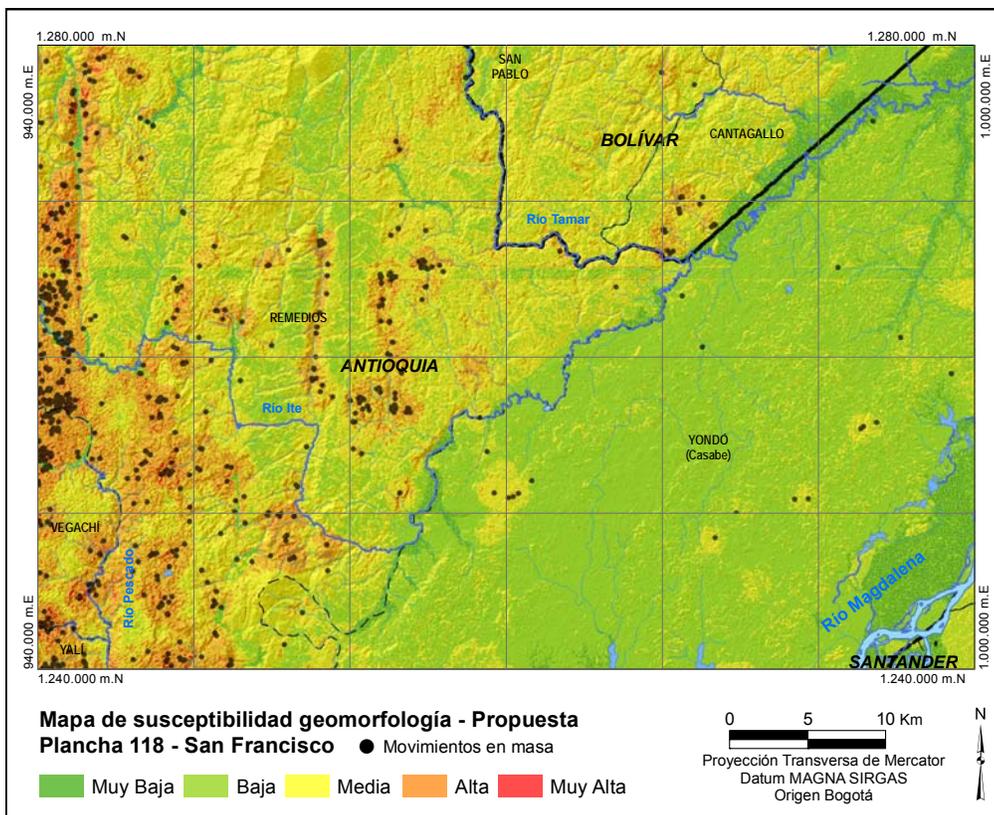


Figura 58. Mapa de susceptibilidad por la variable geomorfología propuesta

7.4 Susceptibilidad a movimiento en masa

La susceptibilidad a movimientos en masa empleando el modelo propuesto, se compone de las variables geología, suelos, cobertura y geomorfología cuyas las ponderaciones o pesos relativos, se mantuvieron igual a las propuestas por el SGC; las variables geología, suelos y geomorfología, fueron ajustadas en este proceso, en cambio la variable cobertura, se mantuvo igual, pero se evidencio en esta variable que se encuentra desactualizada.

En el modelo planteado, se logra una mejor zonificación, al presentar una menor dispersión de movimientos vs el área zonificada con susceptibilidad alta y muy alta, es decir que la probabilidad de encontrar un movimiento en masa dentro de las áreas zonificadas como altas aumenta. A la derecha de la Tabla 31, se aprecia que en el modelo desarrollado por el SGC, no genera una alta correlación en el número de movimientos presentes por las categorías de susceptibilidad alta y muy alta.

De igual manera en el modelo propuesto, se identificó una zonificación de susceptibilidad alta, la cual cubre un 15% del área de la plancha, en donde ocurre el 83% de los movimientos en masa. Por otra parte el modelo propuesto tiene una mejor correlación entre los movimientos en masa con las áreas cartografiadas con el nivel de susceptibilidad alta; es de considerar que en el modelo del SGC, cartografía él 89 % de los movimientos en el nivel de susceptibilidad media, y además presenta una dispersión muy alta, el 89% de los movimientos en masa se encuentran en categoría de susceptibilidad baja y media, y estas categorías cubren el 99% del área total de la plancha (ver Figura 59). En cambio, el modelo propuesto presenta que el 83% de los movimientos en masa, se encuentran en la categoría alta, y esta categoría cubre solo el 15% del área total de la plancha ver Figura 60.

Tabla 31. Comparación estadística de modelo propuesto vs modelo SGC para la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa.

Modelo Propuesto			Modelo SGC		
Calificación	Porcentaje de Movimiento	Porcentaje de área	Calificación	Porcentaje de Movimiento	Porcentaje de área
Muy Baja	0%	0%	Muy Baja	0%	0%
Baja	1%	19%	Baja	3%	13%
Media	16%	66%	Media	89%	86%
Alta	83%	15%	Alta	9%	1%
Muy Alta	0%	0%	Muy Alta	0%	0%

Fuente: Autor

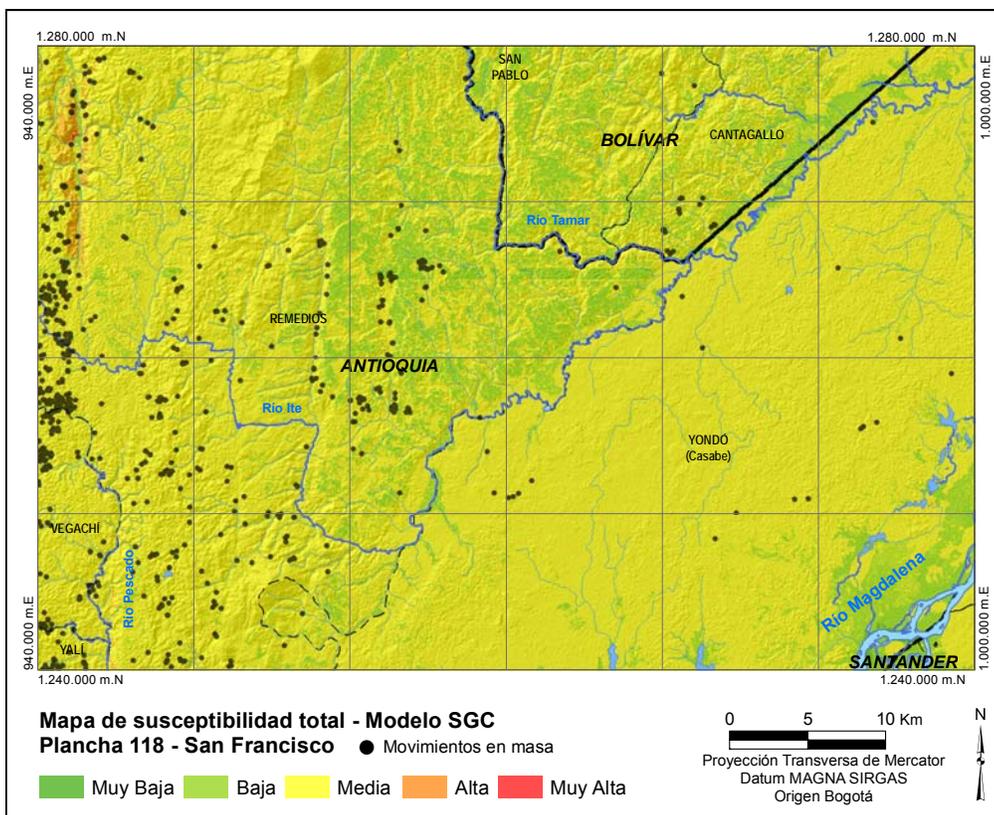


Figura 59. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa- modelo SGC

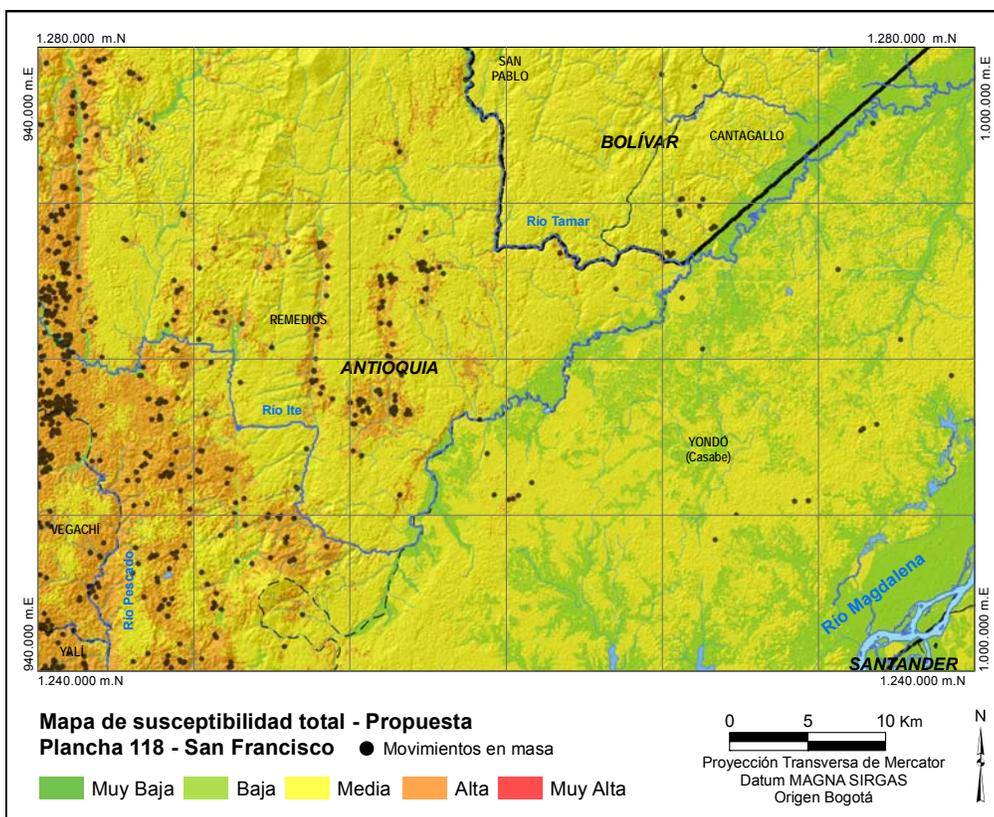


Figura 60. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa - modelo propuesto

7.5 Amenaza relativa

Para la generación del mapa de amenaza relativa a los movimientos en masa, se emplea el mapa de susceptibilidad, el cual fue elaborado a partir de las variables geomorfología, geología, cobertura de la tierra y los suelos edáficos. Estos se encuentran a una escala aproximadamente cerca a la escala de trabajo; los factores detonantes de movimientos en masa, como el factor climático y el sismo, son considerados en el análisis de amenaza, pero no se tiene una base de datos suficiente como para satisfacer las necesidades a la escala de trabajo, lo cual redundo a que se presente una única categoría para toda la plancha. Esto ocurre para ambos factores detonantes (ver capítulo 6.1.6.).

En el modelo propuesto, se identificó como zona de amenaza alta el sector occidental de la plancha, en aquellas áreas donde se presenta un alto fracturamiento generado por el sistema de falla de Palestina, y en donde se tiene la presencia de suelos residuales de textura areno-arcillosas derivadas de la alteración de los feldespatos y minerales ferromagnesianos. La cobertura presente corresponde a pastos limpios y pastos enmalezados, en los sectores intervenidos por el hombre; y bosque denso alto y bajo de tierra firme en aquellos sectores con baja o nula intervención antrópica. Dada a estas condiciones se identificaron 872 movimientos en masa, lo cual corresponde al 83% de los movimientos en masa cartografiados en la plancha, con una distribución espacial del 15% total área de la plancha, (ver Figura 61 y Tabla 32).

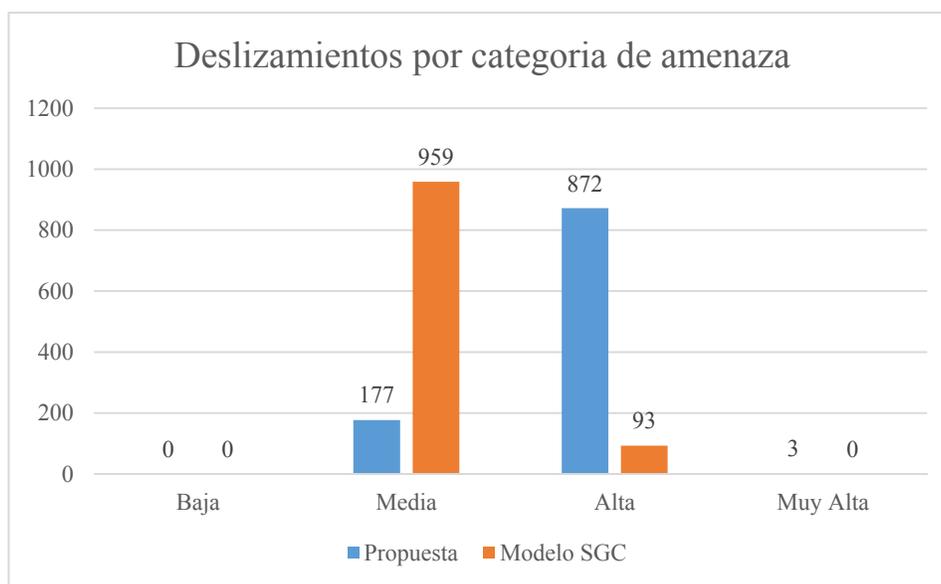


Figura 61. Número de deslizamiento por categoría de amenaza relativa a movimientos en masa.

Tabla 32. Comparación estadística de modelo propuesto vs modelo SGC para la zonificación de la amenaza relativa a movimientos en masa.

Modelo Propuesto			Modelo SGC		
Calificación	Porcentaje de Movimiento	Porcentaje de área	Calificación	Porcentaje de Movimiento	Porcentaje de área
Baja	0%	0%	Baja	0%	0%
Media	17%	85%	Media	91%	99%
Alta	83%	15%	Alta	9%	1%
Muy Alta	0%	0%	Muy Alta	0%	0%

Fuente: Autor

El modelo desarrollado con la metodología del SGC, arroja en sus resultados el nivel de amenaza alta en la zona de escarpes y áreas donde se presenta pendientes abruptas, con la identificación de 93 movimientos en masa que corresponden al 9% de los movimientos, con una distribución espacial que cubre únicamente el 1% del área de la plancha.

El nivel de amenaza media cubre el 99% del área de la plancha, lo cual evidencia la pobre resolución que se obtienen a partir de la información de los factores detonantes que definen las categorías de amenaza en la plancha, y su baja correlación con los movimientos en masa identificados (ver Figura 62).

Por otra parte, aunque por las condiciones morfométricas, morfogenéticas, litológicas y morfodinámica se debería haber obtenido una zona de amenaza baja hacia el sur este de la plancha y los sectores con planicies de inundación. Sin embargo, en ninguno de los dos modelos se logró cartografiar este nivel de amenaza, muy probablemente está asociado la carencia de información mencionada de los factores detonantes, los cuales tienen un peso relativo del 50% en el modelo, (ver Figura 62 y Figura 63).

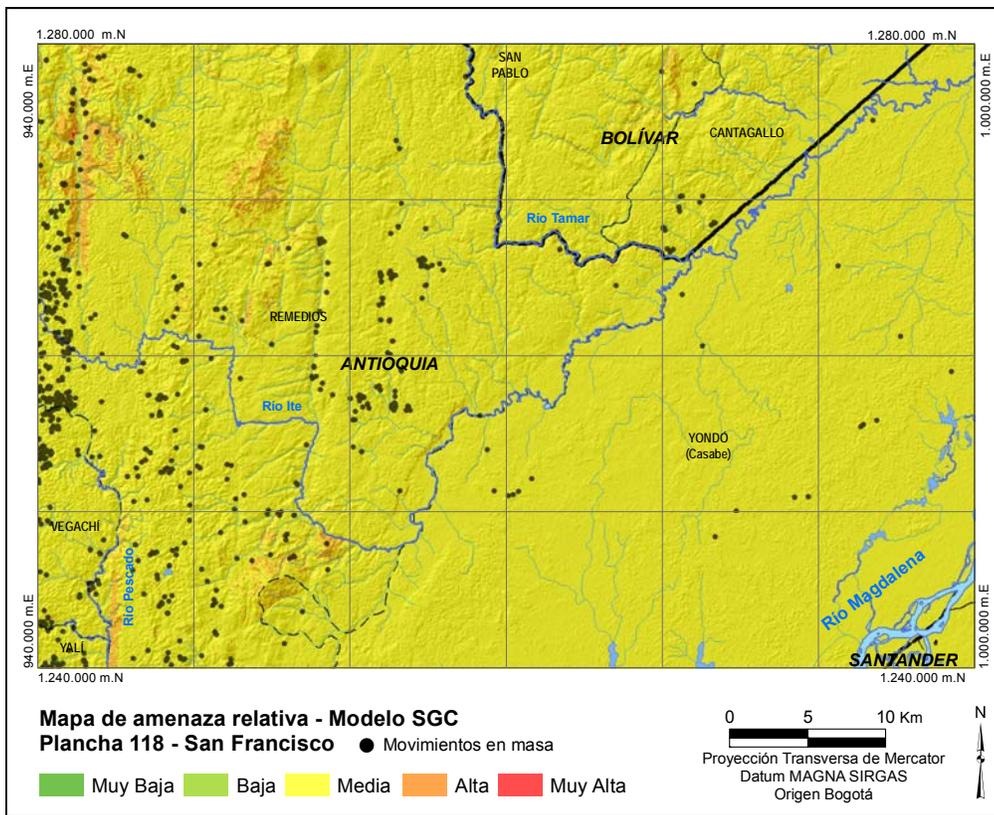


Figura 62. Mapa de amenaza relativa - modelo del SGC con los movimientos en masa en color negro.

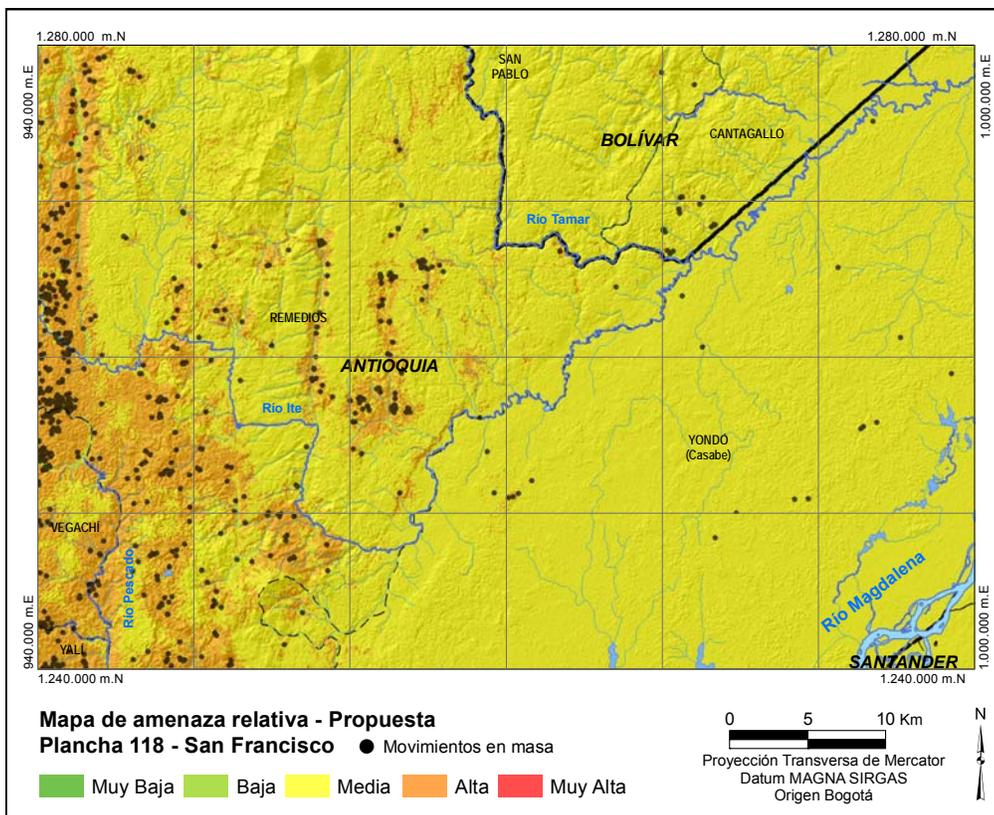


Figura 63. Mapa de amenaza relativa – propuesta con los movimientos en masa en color negro.

8 Conclusiones y Recomendaciones

La incorporación de criterios como: meteorización, textura, fabrica y estructura línea geológica, permitió lograr una menor dispersión y una alta correlación con la distribución de los movimientos en masa con respecto al nivel de susceptibilidad.

La incorporación del atributo Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), en la variable tipo de arcilla, permitió eliminar la subjetividad en la calificación, ya que en el modelo del SGC, ésta dependía de la valoración subjetiva de la taxonomía, mientras que el (CIC), es un atributo de gran importancia por su incidencia en el tipo de arcilla y su repercusión en la susceptibilidad a movimientos en masa.

La incorporación del atributo densidad de movimientos en masa en la temática morfodinámica, permitió delinear las áreas donde se tiene una mayor concentración de movimientos en masa, y a su vez cartografiar mejor los sectores más propensos a generar nuevos movimientos en masa.

En las zonas con alta susceptibilidad y amenaza obtenidas en el modelo propuesto, se identificó el mayor número de eventos por procesos de remoción en masa. Esto es debido a que en el nuevo modelo, se le ha dado una mayor importancia a la intervención antrópica que ha implicado un cambio en el uso del suelo, con una notable disminución de la cobertura vegetal y a un incremento de la actividad minera.

Se recomienda actualizar el mapa de cobertura vegetal, debido a que en grandes sectores se observan polígonos que al parecer se indican como coberturas de bosques, pero en realidad, lo que se ha observado dentro de estos grandes polígonos, es que contienen áreas que han sido intervenidas y deforestadas por el hombre. A demás presenta coberturas de pastos limpios y mosaico de pastos y cultivos y pastizales. Esta actualización se considera muy importante, ya que la intervención antrópica, no solo cambia el uso de los suelos, sino que al eliminar la cobertura vegetal, los materiales quedan expuestos a procesos erosivos de tipo hídrico, aumentando su incidencia en la generación de movimientos en masa.

Los métodos de evaluación multicriterio (AHP), se constituyen en una importante metodología que permite una mejor apropiación del conocimiento, para valorar y ponderar los distintos atributos de las variables: suelos, cobertura de la tierra, geología y geomorfología.

Aunque la calificación por los detonantes sismo y clima es media, esta calificación podría variar significativamente en el momento en que se tenga una mejor instrumentación y la opción de tener un registro continuo, que se puede obtener al ampliar la red sismológica y al mismo tiempo aumentar la cantidad de estaciones meteorológicas.

Es recomendable mejorar y aumentar la red de estaciones meteorológicas, tanto a nivel nacional como local, de tal manera que hacia un futuro cercano, se pueda tener una base más completa de datos continuos para un periodo de retorno de por lo menos 50 años. Esto aportaría una mejor información y mayor resolución en la interpretación que podría utilizarse en un nuevo modelamiento de la susceptibilidad y amenaza por procesos de remoción en masa.

Es conveniente aumentar la cobertura de estaciones de la red sismológica nacional, con la instalación de instrumentos adecuados que permita caracterizar con mejor resolución la influencia sismogénica en los procesos de remoción en masa a nivel local y regional.

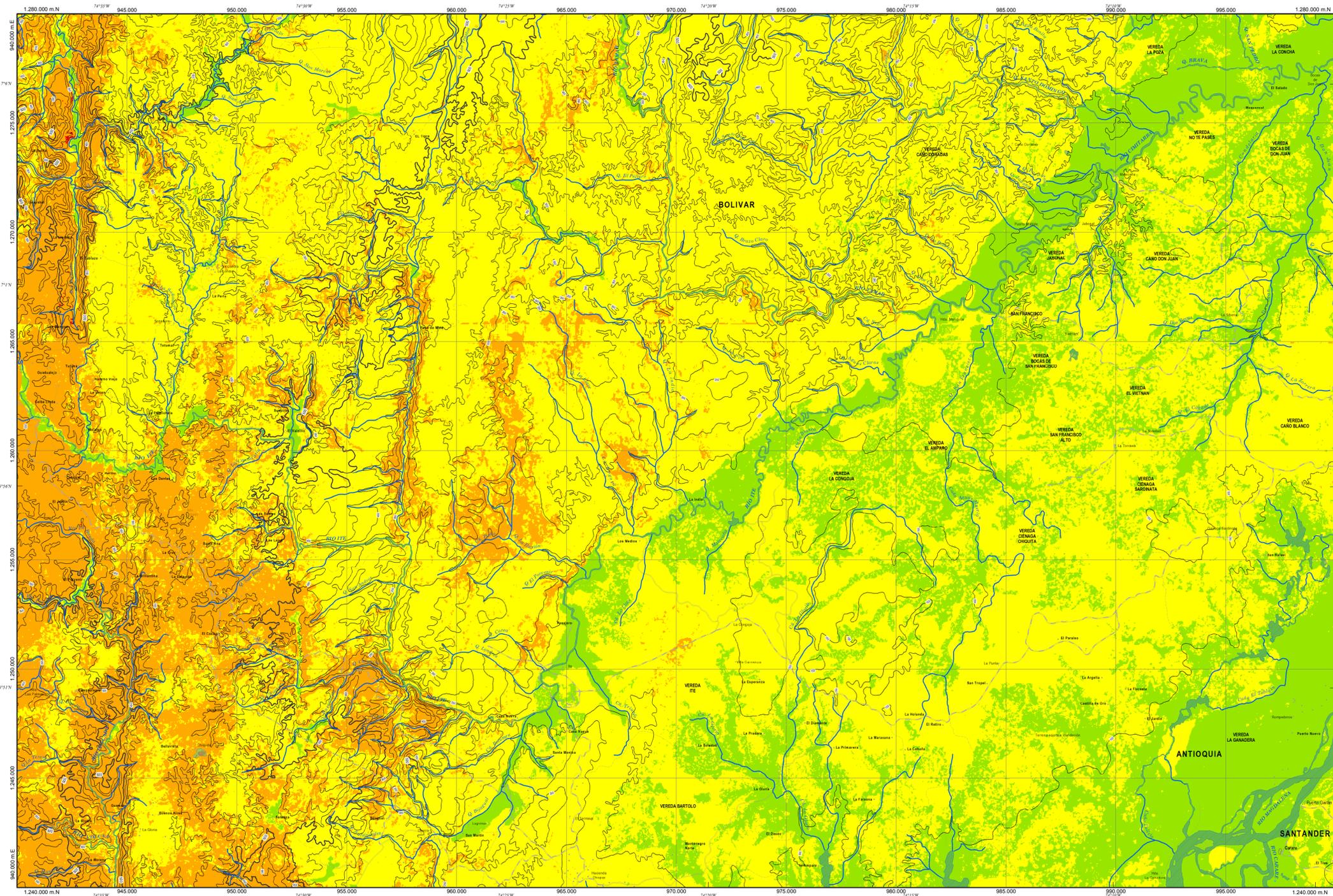
Para la modelación de la amenaza relativa, se sugiere incorporar el análisis de fuentes sismogénicas, junto con la localización de las fallas que en algún momento contribuyen o atenúan las magnitudes de las ondas sísmicas. Dado que la ocurrencia de un sismo puede estar asociada a la actividad de una falla, y esta puede catalogarse como el detonante en la ocurrencia de FRM, pero a la vez, una falla puede actuar como una zona de atenuación de las ondas sísmicas que se originaron en un sector lejano a esta.

9 Referencias Bibliográficas

- Carrara, Alberto, Cardinali, Mauro, Guzzetti, Fausto, & Reichenbach, Paola. (1995). Gis Technology in Mapping Landslide Hazard. In A. Carrara & F. Guzzetti (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards* (pp. 135-175). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Castro, Eduardo, Vargas, German, & Moreno, Manuel. (1998). Zonificación de amenazas por procesos de remoción en masa en las cuencas de los ríos Bolo y Fraile, Valle del Cauca. *Congreso Colombiano de geotenia*, VII, 11.
- CVC, Corporación autónoma regional del Valle del Cauca, & INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2001). *Evaluación del riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa. Guía metodológica*: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Elizalde, Graciano, & Mauveína, E. (2000). Evaluación de amenazas de movimientos en masa en paisajes montañosos: ejemplos en el estado Vargas Venezuela *Revista del Instituto de edafología de la Facultad de agronomía de la Universidad Central de Venezuela*, 8(1-2), 29-42.
- García, María José (2008). *Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos*. (PhD Thesis), University Alcalá, Madrid, España.
- Guzzetti, Fausto, Carrara, Alberto, Cardinali, Mauro, & Reichenbach, Paola. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Ho, William, Dey, Prasanta K., & Higson, Helen E. (2006). Multiple criteria decision-making techniques in higher education. *International Journal of Educational Management*, 20(5), 319-337. doi: doi:10.1108/09513540610676403
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, & SGC, Servicio Geológico Colombiano (Cartographer). (2009). Zonificación de la Susceptibilidad General del Terreno a los Deslizamientos de Tierra a escala 1:500.000.
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. (2005). *Atlas climatológico de Colombia*.
- IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, & CORANTIOQUIA, Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia. (2014). *Estimación y Elaboración Cartográfica de Amenazas por Inundaciones y Fenómenos de Remoción en Masa en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA, con el Uso de Tecnologías Geoespaciales*. (Informe), Bogotá D.C.
- INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería (Cartographer). (2007). Atlas Geológico de Colombia. Escala 1:500.000.
- INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería, Montero, J, & Cortes, R (Cartographer). (2001). Mapa de categorías de amenaza relativa por movimientos en masa de Colombia, escala 1:1.500.000.

- Johnson, Richard A. (1997). *Probabilidad y Estadística para Ingenieros de Miller y Freund 5ta Ed.* Mexico: Pearson Prentice Hall.
- . *Ley 1523 de 2012 - Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.* (2012). Bogota D.C.
- Lopez, Hector (2015). [Entrevista variable Suelo Edafico metodologia SGC].
- Malczewski, Jacek. (2006). Integrating multicriteria analysis and geographic information systems: the ordered weighted averaging (OWA) approach. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 6(1-2), 7-19. doi: doi:10.1504/IJETM.2006.008251
- Mora, Rolando, Chaves, Jeisson, & Vasquez, Mauricio. (2002). Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: resultados obtenidos para la península de Papagayo mediante la modificación del método Mora Vahrson (Mora et al., 1992). . *III Curso internacional sobre microzonificación y su aplicación en la mitigación de desastres*, 38-43.
- OSSO, Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano. (2003). *Modelo de susceptibilidad a movimientos de masa en el Eje Cafetero*. Paper presented at the IX Congreso de Geología, Bogotá.
- Paris, Gabriel, Machette, Michael N., Dart, Richard L., & Haller, Kathleen M. (2000). Map and database of Quaternary faults and folds in Colombia and its offshore regions *Open-File Report* (- ed.).
- Rosas, Elizabeth. (2014). *Evaluación de indicadores de suelos para determinar la susceptibilidad por movimientos en masa escala 1:100.000 planchas 107 y 108 bloque 8.* (Tesis pregrado), Universidad de Pamplona, Pamplona.
- Saaty, T.L. (1980). *Multicriteria Decision Making - The Analytic Hierarchy Process, Volume I, AHP Series* (Vol. Volume I). New York, NY: McGrawHill.
- SGC. (2013). Bogotá.
- SGC, Servicio Geológico Colombiano. (2013). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 V.2.* Bogota D.C: Servicio Geológico Colombiano.
- Soeters, Robert, & Van Westen, Cornelis J. (1996). Chapter 8 - Slope Instability Recognition, Analysis, And Zonation. In A. K. Turner & L. R. Schuster (Eds.), *Landslides: investigation and mitigation* (pp. 129-177). Washington, DC National Academy Press, Transportation Research Board Special Report.
- SSS, Soil Survey Staff. (1998, 1999). *keys to Soil Taxonomy* (pp. 326). Washington D.C.: Soil Survey Staff.
- Suarez, Jaime. (2009). Cap. 13: Zonificación de Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo. In U. I. d. Santander (Ed.), *Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico* (Vol. 1, pp. 588). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

- UP, Universidad de Pamplona, & SGC, Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa. Escala 1:100.000. Plancha 118 – San Francisco.*
- Van Westen, C J. (1993). *Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation* (pp. 245). International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). Netherlands.
- Van Westen, C J. (2004). Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments. *Landslides: Evaluation and Stabilization, Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides, 1*, 39-56. doi: 10.1.1.114.4732
- Van Westen, Cees J. (2000). The Modelling Of Landslide Hazards Using Gis. *Surveys in Geophysics, 21(2)*, 241-255. doi: 10.1023/a:1006794127521
- Van Westen, J. C., Rengers, N., Terlien, J. M. T., & Soeters, R. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomenon through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau, 86(2)*, 404-414. doi: 10.1007/s005310050149
- Vargas, Cuervo German. (1999). *Guía técnica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa.* Villavicencio: Proyecto Río Guatiquía (GTZ-Secretaría del Medio Ambiente).
- Varnes, D, J. (1978). Landslide types and processes. In A. K. Turner & L. R. Schuster (Eds.), *Landslides and engineering practice.* Washigton, D.C.



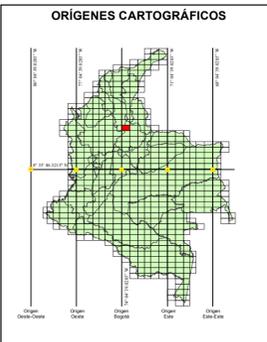
LEYENDA SUSCEPTIBILIDAD

CATEGORIA DE SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN
MUY ALTA	La susceptibilidad Muy alta es la que se encuentra en menor proporción, un 0,01% del total del área de estudio, geográficamente se localiza al NW de la plancha 118, específicamente hacia el municipio de Remedios, al occidente del río El bagre, en una zona de laderas con depósitos coluviales. Litológicamente se identificaron depósitos coluvio-aluviales con sedimentos de granulometría heterométrica con una matriz arenosa arcillosa. Está relacionada con la geoforma de ambiente denudacional Cono o lóbulo de solifluxión. Esta zona se caracteriza por la presencia de una cobertura de típica de ambientes intervenidos antropicamente con pastos limpios y explotaciones mineras. Se identificaron 3 movimientos en masa en esta categoría
ALTA	Geográficamente la categoría de susceptibilidad alta está relacionada a varias zonas, la primera se encuentra sobre el área de influencia de la falla El Bagre que tiene sentido N-S de rumbo, ubicadas en el sector occidental de la plancha, formando un escarpe de erosión mayor, la segunda se localiza al SE de la plancha entre los ríos Ita y Pescado, geomorfológicamente corresponde a planicie colinada residual y cobertura vegetal predominante son pastos limpios, arbusto característico de zonas intervenidas antropicamente y uso más común es la agricultura y ganadería, se aprecia eventos de compactación del suelo exactamente proceso de terracetos o erosión pata de vaca. Se reportaron 872 movimientos en esta categoría, en los que se observaron deslizamientos rotacionales, flujos y menor proporción caídas de roca, principalmente. Estos eventos han causado daños a vías secundarias y a predios rurales de uso agropecuario.
MEDIA	La calificación de susceptibilidad media está representada en gran parte del área de estudio con un 66%, esta zonificada a lo largo y ancho de todo el área de estudio, fisiográficamente ocupa parte de los tres departamentos que son Antioquia, Santander y Bolívar, teniendo relación con la Serranía de San Lucas y el Valle Medio del Magdalena. Se presenta en zonas con laderas muy inclinadas a abrupta cuyos rangos de pendiente son del orden de 11° a 19°, en unidades geomorfológicas de origen denudacional, con geoformas de laderas muy inclinadas a abruptas entre las que están: lomos denudados (neis cuarzo-feldespático, anfibolítico y biotítico de la formación Neis de San Lucas), superficies de aplanamiento (areniscas de la formación Sedimentitas de Segovia) y montículos (corresponde a areniscas de la formación Mesa). Presenta cobertura vegetal variada, en sectores intervenidos intensamente por el hombre se encuentran pastos limpios, pastos enmalezados, mosaico de pastos con espacios naturales, mosaico de cultivos; mientras que en aquellos con una baja intervención antrópica se pueden encontrar bosque denso alto de tierra firme, bosques densos bajos de tierra firme. En cuanto a los suelos presentes también hay diferentes tipos; profundos, bien drenados, con textura fina y profundos y superficiales, limitados con roca, bien drenados, textura fina, taxonomía Oxisol y Ultisol, esto último para la serranía de San Lucas. En esta categoría se presentaron 169 movimientos en masa.
BAJA	La categoría susceptibilidad baja por movimiento en masa ocupa un área del 19%, corresponde a un área de ambiente fluvial que está asociado a la llanura de inundación de los ríos Magdalena, Ita, Tamar, El Bagre y Cimitarra. Litológicamente corresponde a depósitos de cauce y llanura aluvial. Están presentes coberturas de bosque denso alto de tierra firme y suelos profundos con alta, con textura moderadamente gruesa y taxonomía de tipo mollisol, Andisol, Espodosol. Es una zona relativamente estable a presentar movimientos en masa, se reportaron 8 movimientos en esta categoría, presenta una alta susceptibilidad a de eventos de inundación. Fisiográficamente está presente en parte de los tres departamentos Antioquia, Santander y Bolívar, representados por los municipios de Remedios, Yondó, Cimitarra, San Pablo y Cantagallo Respectivamente.

POBLACIONES		CONSTRUCCIONES		TRANSPORTE		HIDROGRAFÍA		RELIEVE		ABREVIATURAS			
COLOMBIA	País	▲	Cementerio, Parque cementerio	—	Tanque, Silo, Pozo	—	Carretera pavimentada de dos o más calzadas	—	—	Ay.	Arroyo	R.	Río
NARIÑO	Departamento	+	Construcción	—	Puerto	—	Carretera sin pavimentar de dos o más calzadas	—	—	Bzo.	Brazo	Q.	Quebrada
PASTO	Capital	7	Establecimiento educativo	—	×	Puente vehicular	—	Carretera pavimentada angosta	—	Cga.	Ciénaga	Cl.	Cuchilla
LINARES	Municipio	*	Faro	—	×	Instalación minera	—	Carretera sin pavimentar angosta	—	Cñ.	Caño	Crr.	Cerro
Pto. Nuevo	Corregimiento	o	Hospital, Clínica y Centro de salud	—	▲	Torre	—	Carretera transitable en tiempo seco	—	Ciada.	Cañada	I.	Isla
La Osa	Inspección de policía	⊞	Hotel	—	▲	Punto geodésico	—	Camino	—	Zu.	Zanjón	Nev.	Nevado
El Cacao	Caserio	1	Iglesia	—	—	Túnel	—	Sendero	—	Emb.	Embalse	V.	Volcán
La Palma	Vereda	+	Molino	—	■	Centro poblado	—	Vía férrea	—	Ens.	Ensenada	Pto.	Puerto
Haba	Sitio	▲	Sitio de interés	—	■		—		—	Lag.	Laguna		

NOTAS

- Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa generado como anexo del trabajo de grado " Revisión de la aplicación de la metodología de amenaza relativa a movimientos en masa del SGC a escala 1:100.000 en la plancha 118 – San Francisco".
- Cartografía básica IGAC escala 1:100.000 del año 2005.
- La plantilla empleada es una versión modificada, a la elaborada por el Servicio Geológico Colombiano en marco del proyecto mapa nacional de amenaza relativa a movimientos en masa.



Universidad de Pamplona
Faculta de Ciencias Básicas
Programa de Geología

Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa Plancha 118 San Francisco

©
2016 - Janer Rafael Cantillo Romero

LEYENDA AMENAZAS

CATEGORIA DE AMENAZA	DESCRIPCIÓN
MUY ALTA	La Amenaza muy alta es la que se encuentra en menor proporción, un 0.01% del total del área de estudio, geográficamente se localiza al NW de la plancha 118, específicamente hacia el municipio de Remedios, al occidente del río El Bagre, en una primera zona de laderas con depósitos coluviales. Litológicamente se identificaron depósitos coluvio-aluviales con sedimentos de granulometría heterométrica con una matriz arenosa arcillosa y en una segunda zona de escarpes de erosión en la formación Sedimentitas de Segovia. Se caracteriza por presentar precipitaciones diarias que oscilan valores entre los 150 mm hasta los 220 mm, mientras que sus valores anuales fluctúan entre los 2.500 mm a 3.000 mm. Las aceleraciones máximas horizontales se ubican entre los 150 a 300 cm/s². Esta zona se caracteriza por la presencia de una cobertura típica de ambientes intervenidos antrópicamente con pastos limpios y explotaciones mineras. En este nivel de amenaza se identificaron 3 movimientos en masa.
ALTA	La calificación de amenaza alta hace presencia en un 15% del total del área de estudio. Se caracteriza por presentar precipitaciones diarias que oscilan valores entre los 150 mm hasta los 220 mm, mientras que sus valores anuales fluctúan entre los 2.500 mm a 3.000 mm. Las aceleraciones máximas horizontales se ubican entre los 150 a 300 cm/s² las cuales pueden contribuir a la generación de movimientos en masa. Geográficamente la categoría de amenaza alta está relacionada a varias zonas, la primera se encuentra sobre el área de influencia de la falla El Bagre que tiene sentido N-S de rumbo, ubicadas en el sector occidental de la plancha, formando un escarpe de erosión mayor, la segunda se localiza al SE de la plancha entre los ríos Ite y Pescado, geomorfológicamente corresponde a planicie colinada residual y cobertura vegetal predominante son pastos limpios, arbusto característico de zonas intervenidas antrópicamente y uso más común es la agricultura y ganadería, se aprecia eventos de compactación del suelo exactamente proceso erosivos de terrazas (pata de vaca). Se reportaron 872 movimientos en esta categoría, en los que se observaron deslizamientos rotacionales, flujos y menor proporción caídas de roca, principalmente. Estos eventos han causado daños a vías secundarias y a predios rurales de uso agropecuario.
MEDIA	La amenaza relativa media está representada en gran área de toda la zona de estudio con un (85%) del área total, dentro de los factores detonantes las lluvias diarias máximas oscilan entre 100 a 150 mm, para un periodo de retorno de 25 años, mientras que sus valores anuales fluctúan entre los 2000 mm- 2500 mm. Por su parte, los sísmos en estas áreas, pueden llegar a alcanzar una aceleración de picos del suelo de 150 -200 cm/s². Geográficamente esta abarca todos los tres departamentos presentes en la zona, entre los que están Antioquia, Santander y Bolívar, allí están localizados 177 movimientos en masa identificados. Las coberturas presentes son representativas de sectores con alta y baja intervención antrópica. En el primer caso corresponde a pastos limpios, mosaico de pastos con espacios naturales, pastos enmalezados; mientras que en el segundo se tienen bosques densos altos y bajos de tierra firme, se presenta en los ambientes fluviales, estructurales y denudacionales, hacia el SE de la plancha se presenta en montículos y ondulaciones denudadas, en donde las pendientes y el relieve relativo es bajo. Esta categoría tiene una alta probabilidad a presentar movimientos en masa representativos por su relieve montañoso y escarpado hacia el NW, específicamente el municipio de Remedios y Cantagallo.

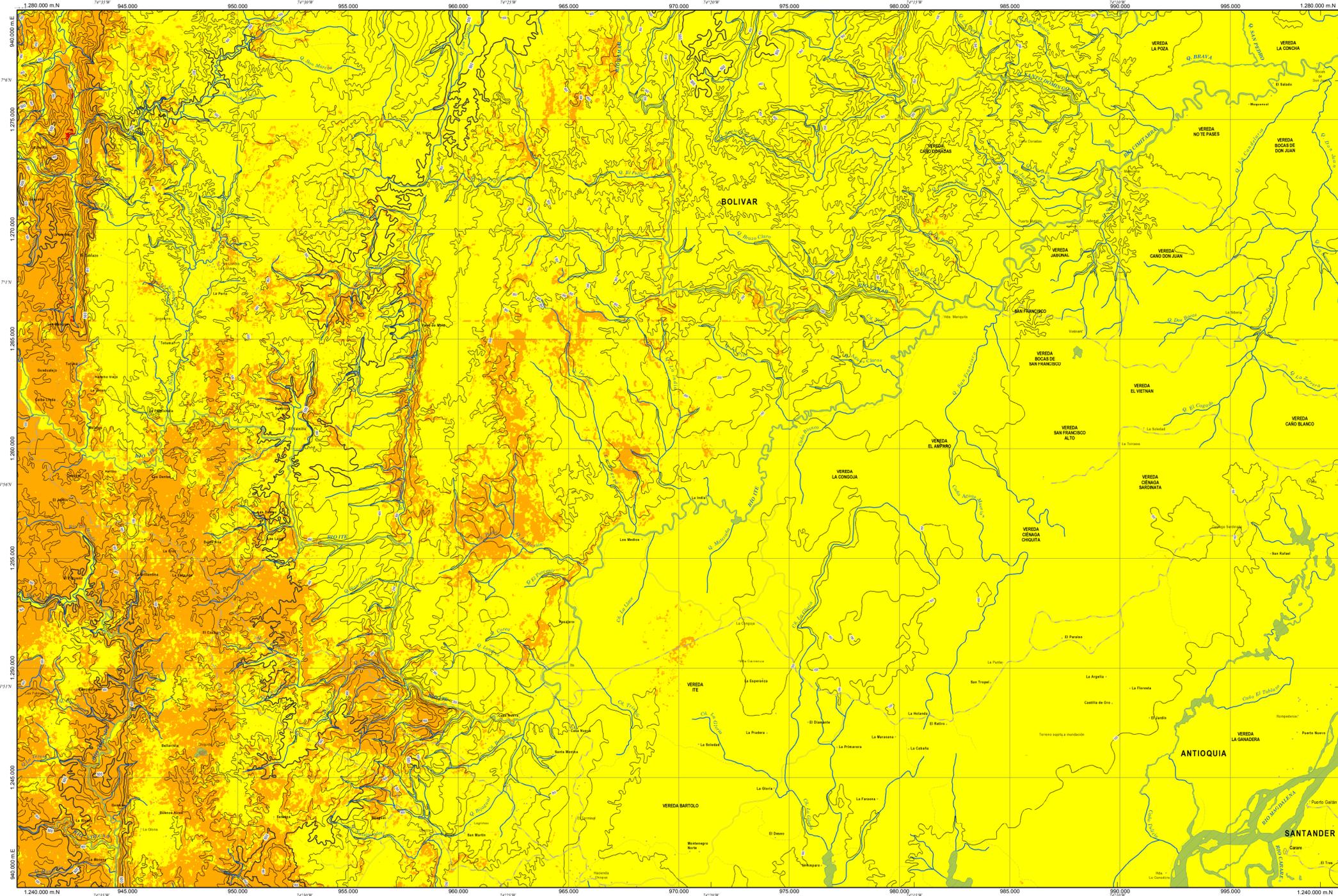
ESCENARIOS DE AMENAZA CONSIDERADOS

Factor Clima	Este detonante fue calculado a partir de la zonificación climática IDEAM (2001) calificada, la cual se deriva de la precipitación media anual y la temperatura media anual en el territorio colombiano y de la lluvia máxima diaria evaluada para un periodo de retorno de 25 años y calificada cualitativamente de acuerdo con su contribución a la generación de movimientos en masa, así:		
	Valores de Lluvia Máxima Diaria (mm)	Calificación	Contribución a los MM
	0-50	1	Muy Baja
	50-100	2	Baja
	100-150	3	Media
	150-220	4	Alta
	> 220	5	Muy Alta

Factor Sísmo	Este detonante fue calculado a partir de los valores de PGA (Aceleración Máxima del Terreno) a nivel de roca, correspondientes a un periodo de retorno de 475 años, de acuerdo con los resultados de la Evaluación de La Amenaza Sísmica de Colombia (INGEOMINAS & U. NACIONAL, 2010), calculada para una grilla equiespaciada cada 0,1", categorizada y calificada de acuerdo con su contribución a la generación de movimientos en masa, así:		
	Valores de PGA (cm/s²)	Calificación	Contribución a los MM
	0-100	1	Muy Baja
	100-150	2	Baja
	150-200	3	Media
	200-300	4	Alta
	> 300	5	Muy Alta

NOTAS

- El modelamiento de la susceptibilidad por movimientos en masa se realizó mediante un método heurístico semicuantitativo que involucra una comparación por pares realizada por los expertos o método por procesos de análisis jerárquico (AHP) de una matriz de atributos o variables que contribuyen a los movimientos en masa (ver Documento Metodológico para la Zonificación de Movimientos en Masa, Servicio Geológico Colombiano-SGC, 2013).
- La zonificación de amenazas por movimientos en masa se generó con base en una función heurística, según la Guía Metodológica de Evaluación de Riesgos por Fenómenos de Remoción de Masa (INGEOMINAS, 2001).
- Los factores detonantes considerados en la evaluación de la amenaza por movimientos en masa fueron las condiciones climáticas (Precipitación media anual, temperatura media anual y lluvia máxima en 24 horas) y la amenaza sísmica (aceleración máxima horizontal a nivel de roca).
- Los aspectos metodológicos detallados de la zonificación de la susceptibilidad y de amenaza por movimientos en masa de esta plancha se pueden consultar en la Memoria Explicativa del Mapa de Amenazas por Movimientos en Masa de la plancha 118 - San Francisco.



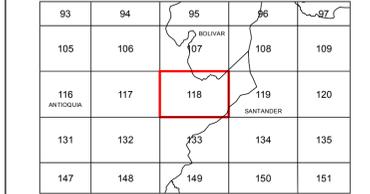
CONVENCIONES

POBLACIONES	CONSTRUCCIONES	TRANSPORTE	HIDROGRAFÍA	RELIEVE	ABREVIATURAS
COLOMBIA País	Cementerio, Parque cementerio	Tanque, Silo, Pozo	Línea costera	Curva de nivel índice	Ay. Arroyo
NARIÑO Departamento	Construcción	Puerto	Canal sencillo	Curva de nivel intermedia	Bzo. Brazo
PASTO Capital	Establecimiento educativo	Puente vehicular	Drenaje sencillo	LÍMITE	Cga. Ciénaga
LINARES Municipio	Faro	Carretera pavimentada angosta	Drenaje doble	--- Límite de nación	Cl. Cuchilla
Pto. Nuevo	Corregimiento	Carretera sin pavimentar angosta	Humedal	- - - Límite de departamento	Ciada. Cañada
La Osa	Inspección de policía	Carretera transitable en tiempo seco	Ciénaga, Embalse, Laguna		Zo. Zanjón
El Cacao	Casero		Manglar		Nev. Nevado
La Palma	Vereda		Pantano		V. Volcán
Hera	Sitio		Banco arena		Pto. Puerto

NOTAS

- Mapa de amenaza relativa a movimientos en masa generado como anexo del trabajo de grado "Revisión de la aplicación de la metodología de amenaza relativa a movimientos en masa del SGC a escala 1:100.000 en la plancha 118 - San Francisco".
- Cartografía básica IGAC escala 1:100.000 del año 2005.
- La plantilla empleada es una versión modificada, a la elaborada por el Servicio Geológico Colombiano en marco del proyecto mapa nacional de amenaza relativa a movimientos en masa.

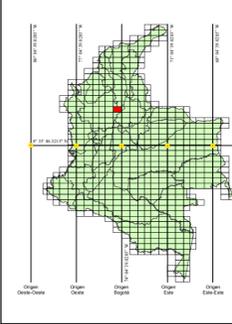
ÍNDICE DE LOCALIZACIÓN



INFORMACIÓN DE REFERENCIA

Escala 1:100.000
 Proyección Conforme de Gauss
 DATUM MAGNA SIRGAS
 ORIGEN EN LA ZONA BOGOTÁ
 Coordenadas Geográficas: 4°37'46.321" N, 74°47'39.0285" W
 Coordenadas Planas: N = 1000.000, E = 1000.000

ORÍGENES CARTOGRÁFICOS



Universidad de Pamplona
Faculta de Ciencias Básicas
Programa de Geología

Mapa de Amenaza Relativa
por Movimientos en Masa
Plancha 118
San Francisco