



Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente
Hacia una proyección social



CONTRATO INTERADMINISTRATIVO CVC – UNIVALLE 188 DE 2008

PROYECTO MIDAS

**ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS Y ESCENARIOS DE RIESGO POR
MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y CRECIENTES
TORRENCIALES DEL ÁREA URBANA Y DE EXPANSIÓN DE LOS
MUNICIPIOS DE BUGA, RIOFRÍO, DAGUA, EL CAIRO Y LA
UNIÓN**

**INFORME FINAL DE MAPA DE
AMENAZAS POR REMOCIÓN EN MASA
PARA EL MUNICIPIO DE BUGA**

Santiago de Cali, Abril de 2010

TABLA DE CONTENIDO

1. EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA	5
1.1. TÉCNICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD	5
1.1.1. Método bivariado	5
1.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES	8
1.2.1. Pendiente (PEND)	9
1.2.2. Curvatura (CURVAR)	12
1.2.3. Orientación de la ladera (ORIENTACIÓN)	14
1.2.4. Usos del Suelo (USO)	16
1.2.5. Geología (GEOL)	17
1.3. ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD	19
2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA	23
2.1. ASPECTOS METODOLOGICOS GENERALES	23
2.2. MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO	24
2.3. DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES EN PROFUNDIDAD	25
2.4. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN	28
2.5. MECANISMOS DE FALLA MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE	28
2.5.1. Falla Planar en Talud Infinito	28
2.5.2. Falla Rotacional	29
3. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR ESCENARIOS	38
3.1. FUERZA SÍSMICA	38
3.1.1. Escenario 1. Talud parcialmente Saturado sin Sismo	39
3.1.2. Escenario 2. Talud seco con Sismo	42
3.1.3. Escenario 3. Talud parcialmente saturado con Sismo	44
4. BIBLIOGRAFÍA	48
5. ANEXOS	49
Anexo 1: Análisis por secciones falla rotacional	50

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos</i>	28
<i>Tabla 3.1 Escenarios de análisis para la estimación de factores de seguridad.</i>	38
<i>Tabla 3.2 Rangos del Factor de Seguridad para definir el nivel de amenaza.</i>	39

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Diagrama de flujo general del método estadístico bivariado (Van Western.1996).</i>	7
<i>Figura 1.2 Mapa de pendientes, municipio de Buga.</i>	11
<i>Figura 1.3 Mapa de curvatura, municipio de Buga.</i>	13
<i>Figura 1.4 Mapa de orientación, municipio de Buga.</i>	15
<i>Figura 1.5 Mapa de usos del suelo, municipio de Buga.</i>	16
<i>Figura 1.6 Mapa de geología, municipio de Buga.</i>	18
<i>Figura 1.7 Distribución porcentual de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa.</i>	20
<i>Figura 1.8 Mapa de índice de susceptibilidad para el municipio de Buga.</i>	21
<i>Figura 2.1 Esquema metodológico general - Evaluación de la amenaza por movientos en masa.</i>	24
<i>Figura 2.2 Localización en planta de secciones en estudio.</i>	25
<i>Figura 2.3 Localización de ensayos de campo realizados en el municipio de Buga.</i>	26
<i>Figura 2.4 Perfil geológico geotécnico, tomado del perfil D – D’.</i>	27
<i>Figura 2.5 Análisis de equilibrio límite, sección B – B’ para talud parcialmente saturado sin sismo.</i>	31
<i>Figura 2.6 Análisis de equilibrio límite, sección B – B’ para talud seco y sismo de 0.2 g.</i>	31
<i>Figura 2.7 Análisis de equilibrio límite, sección B – B’ para talud parcialmente saturado y sismo 0.2 g.</i>	32
<i>Figura 2.8 Análisis de equilibrio</i>	33
<i>Figura 2.9 Análisis de equilibrio límite, sección F-F’ para talud seco y sismo de 0.2g.</i>	34
<i>Figura 2.10 Análisis de equilibrio límite, sección F-F’ para talud parcialmente saturado y con sismo de 0.2g.</i>	35
<i>Figura 2.11 Análisis de sensibilidad con la variación del nivel freático.</i>	36
<i>Figura 3.1 Distribución porcentual de amenaza, escenario 1.</i>	40
<i>Figura 3.3 Distribución porcentual de amenaza, escenario 2.</i>	42
<i>Figura 3.5 Distribución porcentual de amenaza, escenario 3.</i>	44

1. EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

1. EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

1.1. TÉCNICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

La susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa es definida por Fell *et al.* (2008) como la evaluación cuantitativa o cualitativa de la clasificación, volumen (o área) y distribución espacial de los movimientos en masa que existen o potencialmente pueden ocurrir en un área; la probabilidad de ocurrencia, que depende también de la recurrencia de los factores desencadenantes tales como lluvia y sismicidad no es considerada.

Existen diversas aproximaciones para evaluar la susceptibilidad del terreno basadas principalmente en la determinación de los factores que contribuyen con la ocurrencia de estos procesos (relieve, la geología, condiciones de los materiales superficiales, modificaciones de las condiciones naturales de vegetación e intervención antrópica). Generalmente, se combinan estos factores en forma cartográfica y así se definen los grados de susceptibilidad. Existen dos principales procedimientos utilizados en la evaluación y confección de los mapas de susceptibilidad:

- Métodos Cualitativos
- Métodos Cuantitativos

En el desarrollo de este proyecto se utilizó el método estadístico bivariado a escala 1:5.000, incluido en los métodos cuantitativos de evaluación de susceptibilidad. El procesamiento de la información base y los resultados fueron integrados por medio de herramientas SIG, usando el formato *raster* que implica la división de la zona en unidades de tamaño regular, normalmente cuadradas, donde en cada celda se asigna un valor para un factor determinado.

1.1.1. Método bivariado

El análisis estadístico bivariado (Ver Figura 3.1), se basa en el modelo de pesos de las variables y aplica la teoría de probabilidad Bayesiana, de modo que se puede evaluar la importancia de cada factor que influye en los movimientos independientemente.

Según Neuhauser y Terhorst (2007) para aplicar el método, es necesario conocer datos históricos de movimientos en masa, dado que se asume que los movimientos futuros ocurrirán bajo factores o condiciones similares a la de los movimientos pasados; también se asume que los factores que causan los movimientos permanecen casi constantes en el tiempo.

El principio de este método es el concepto de probabilidad *a priori* y condicional/posterior. La probabilidad P es usualmente determinada empíricamente con el conocimiento de la ocurrencia de un evento D en el pasado bajo condiciones similares, y es definida como la probabilidad *a priori* P (D). Esta probabilidad puede ser modificada con datos B que influyen la probabilidad y son obtenidos de experimentos o análisis. Aquí, se denominan los factores causantes. Cuando los factores causantes se integran al cálculo de la probabilidad, esta se define como una probabilidad condicional o posterior P (D/B). Esta probabilidad posterior expresa la probabilidad que un evento D ocurrirá bajo la presencia de un factor causante B. Ambas probabilidades (*a priori* y posterior) son integradas en el Teorema de Bayes:

$$P(D) = \frac{P(D) + P(B/D)}{\dots} \quad (1)$$

La superposición de los movimientos en masa con cada factor causante, permite calcular la relación estadística entre ellos, y evaluar la importancia de la ocurrencia en los movimientos antiguos. Un par de pesos W^+ y W^- es calculado para cada factor causante. Las ponderaciones dependen de las relaciones espaciales entre los movimientos y los factores causantes. Este cálculo se realiza mediante la aplicación de cocientes de probabilidad, que describen como probablemente un movimiento ocurrirá en el caso de presencia de factores causantes y en el caso de ausencia de éstos:

$$W_j^+ = \ln \frac{P(D/B_j)}{P(D)} \quad (2) \quad W_j^- = \ln \frac{P(D/B_j)}{P(D)} \quad (3)$$

Donde W^+ es el cociente de probabilidad que expresa la relación en caso de presentarse los factores causantes B (de un número j de factores causantes) un movimiento puede o no ocurrir. W^- expresa la misma relación en caso ausencia de factores causantes. En consecuencia, los pesos dan información si hay una correlación positiva o negativa entre los factores causante y los lugares de movimientos.

Para evaluar la contribución de los factores en los movimientos, las ecuaciones 2 y 3 se reescriben en función del número de celdas del modelo digital de elevación (DEM) que se utilice (Dahal *et al.*, 2008):

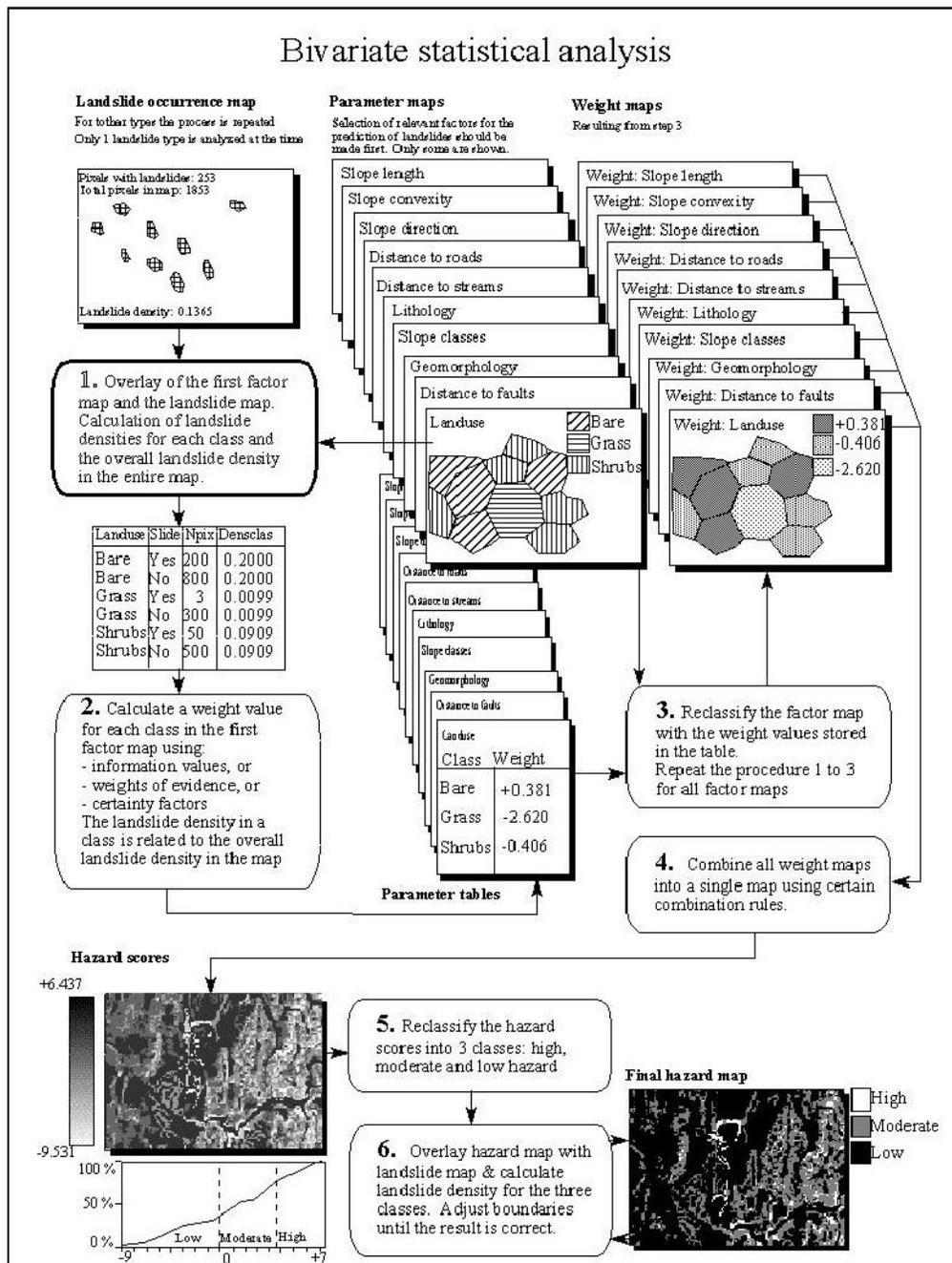


Figura 1.1 Diagrama de flujo general del método estadístico bivariado (Van Western. 1996).

$$W_j^+ = \frac{\frac{Np_jx_1}{Np_jx_1 + Np_jx_2}}{\frac{Np_jx_3}{Np_jx_3 + Np_jx_4}} \quad (4)$$

$$W_j^- = \frac{\frac{Np_jx_2}{Np_jx_1 + Np_jx_2}}{\frac{Np_jx_4}{Np_jx_3 + Np_jx_4}} \quad (5)$$

Donde W^+ es el cociente de probabilidad que expresa la relación en caso de presentarse los factores causantes B (de un número j de factores causantes) un movimiento puede o no ocurrir. W^- expresa la misma relación en caso ausencia de factores causantes. En consecuencia, los pesos dan información si hay una correlación positiva o negativa entre los factores causante y los lugares de movimientos.

Adicionalmente, se define el peso total así: $W_j = W^+ - W^-$ que representa una medida de correlación espacial entre los factores causante y los movimientos en masa. Si el peso total es positivo, el factor es favorable para la ocurrencia de movimientos, si este es negativo, es desfavorable.

Los pesos obtenidos son asignados a las clases de cada factor causante, para definir por medio de la suma algebraica de los pesos totales, el Índice de Susceptibilidad por Movimientos en Masa (LSI), el cual integra los aportes de cada uno de los factores causantes, así:

$$LSI = \sum W_j$$

Donde j es el número de factores considerados.

1.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES

En la investigación de la influencia de los parámetros físicos en los movimientos en masa, se analiza la correlación entre los movimientos y las variables que los representan. En este estudio las variables utilizadas son: pendiente, curvatura, aspecto, uso del suelo y cuenca acumulada, las cuales son analizadas con el Método Bayesiano, anteriormente explicado.

Dentro de este grupo de variables, las correspondientes con características geométricas del relieve, son derivadas a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE). Las variables

temáticas como uso del suelo, son obtenidas a partir de la cartografía elaborada en otras componentes del proyecto.

Debido a que la cartografía geológica tan solo presentaba una unidad superficial, se decidió trabajar solo con la cartografía de uso y cobertura del suelo para generar la variable temática. Esta cartografía se transforma a formato raster, con el mismo tamaño de píxel que el de las otras variables para poder ejecutar los análisis estadísticos.

Una vez obtenidas las variables intrínsecas que controlan la ocurrencia de los movimientos en masa, se aplica el método estadístico bivariado y aplicar el modelo de probabilidad bayesiano.

Para esta zona se utilizaron los siguientes procesos obtenidos en la cartografía geológica:

- Deslizamientos antiguos
- Deslizamientos rotacionales antiguos y recientes
- Escalonamientos
- Hundimientos
- Cárcavas
- Zonas de erosión potencial
- Zonas de erosión activa
- Cicatrices de deslizamientos antiguos.

✓ **Modelo Digital de Elevación (MDE)**

Se denomina Modelo Digital de Elevaciones a la representación numérica de la elevación del terreno en un medio digital. Dicha representación es posible en varios formatos, en este caso el raster, cuya resultante es una imagen en la cual cada píxel contiene los valores de las coordenadas planas x, y, y el valor de altura en dicho punto.

Para esta zona de estudio se generó un MDE con celdas cuadradas de de 10 m x 10 m, basados en el nivel de detalle que presentaba la información topográfica.

Para la aplicación del método es necesario categorizar las variables, puesto que éste calcula el peso de los movimientos en cada categoría basado en la presencia o ausencia del movimiento en el área. A continuación se presentan las variables utilizadas en el análisis.

1.2.1. Pendiente (PEND)

Variable geométrica continua, obtenida a partir del MDE; es definida como el ángulo formado por la superficie del terreno y la horizontal. Se expresa en grados, en un rango entre 0 y 90. En la Figura 1.2, se ilustra la distribución de las pendientes en la zona de estudio. Nótese que en la mayor parte de la zona montañosa, las pendientes del terreno se

encuentran entre los rangos de 5 y 10 grados, y 10 y 25 grados. Se concluyen que en general la zona de laderas se caracteriza por presentar pendientes relativamente suaves.

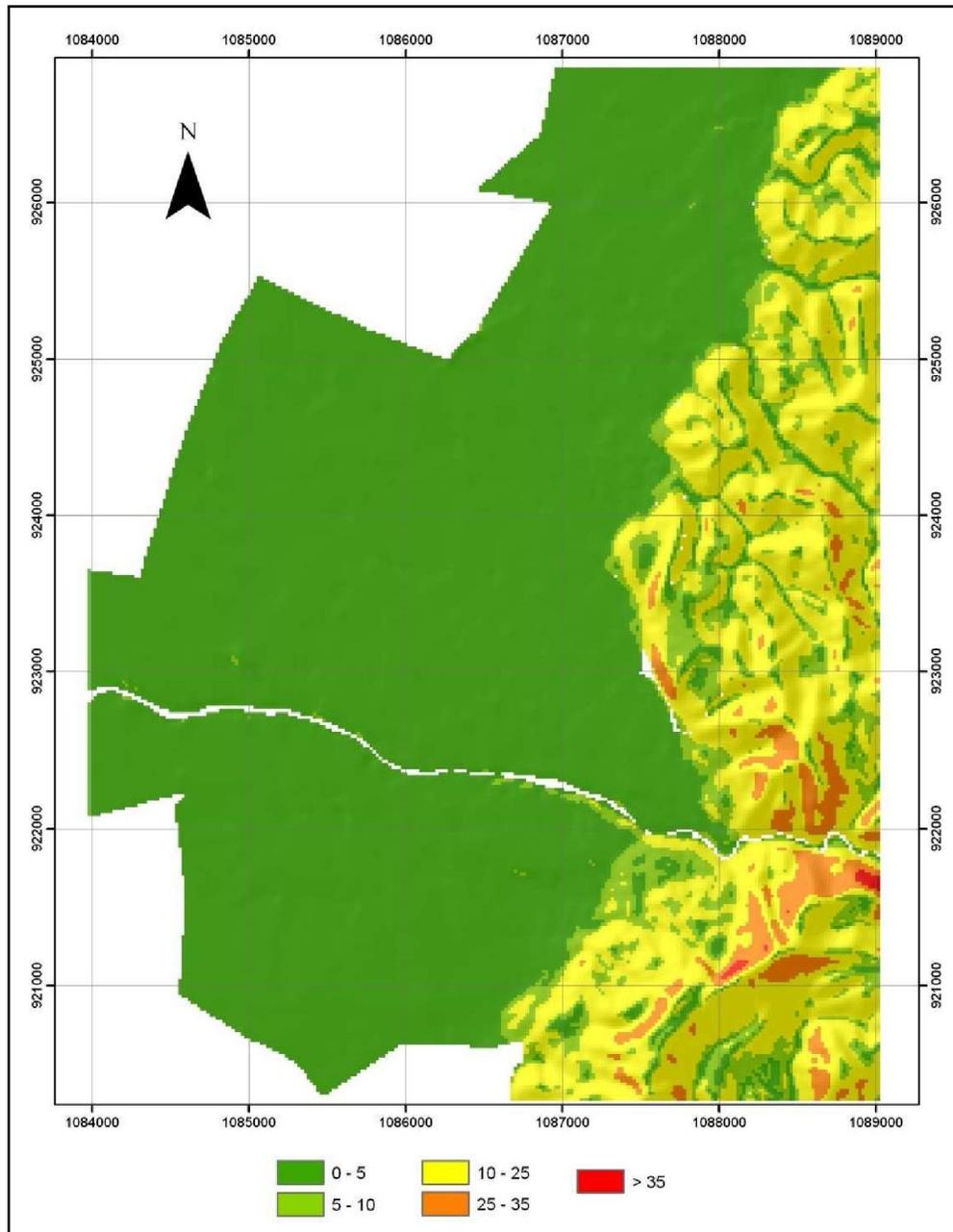


Figura 1.2 Mapa de pendientes, municipio de Buga.

1.2.2. Curvatura (CURVAR)

Variable que muestra la relación concavidad/convexidad del terreno. Este factor puede controlar el comportamiento hídrico y sedimentológico de las laderas, y es generada a partir del DEM; los valores negativos indican que la superficie es cóncava hacia la celda, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores de 0 corresponde a una superficie plana (Ver Figura 1.3). La zona se caracteriza por presentar una gran cantidad de zonas cóncavas que teóricamente facilitarían el empozamiento y posterior infiltración del agua de escorrentía. Sin embargo, muchas de estas zonas se encuentran interconectadas de manera que es muy difícil que se presente este fenómeno.

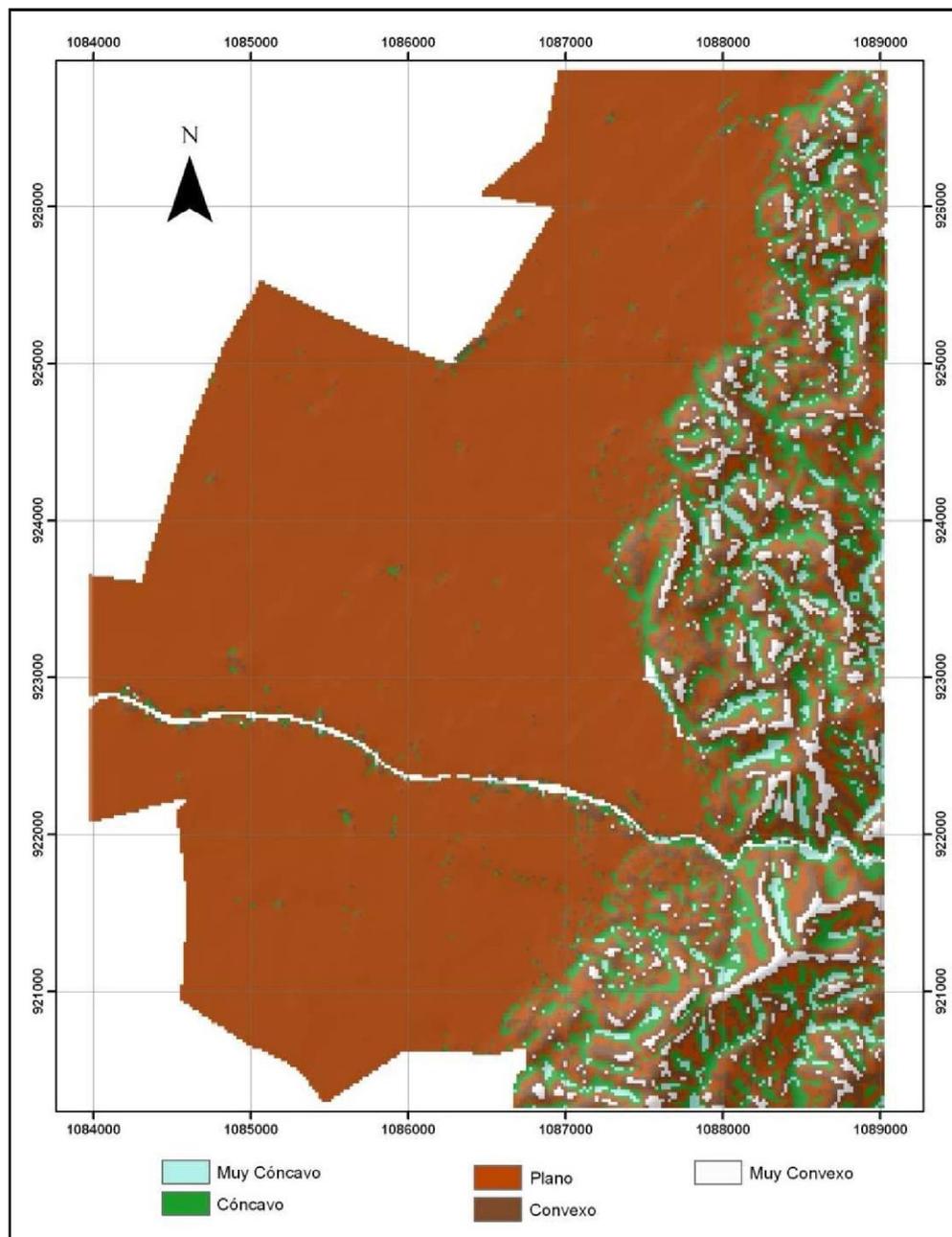


Figura 1.3 Mapa de curvatura, municipio de Buga.

1.2.3. Orientación de la ladera (ORIENTACIÓN)

Variable, definida como la dirección de exposición de la ladera en un punto y que representa la dirección de la máxima pendiente calculada para cada celda. Se calcula a partir del ángulo existente entre el norte geográfico y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en un punto dado. Se trata de una variable derivada del MDE, cuantitativa, continua y con un rango de valores de 1 a 360 grados. La orientación indica de manera indirecta la situación de una ladera en cuanto a su insolación y, por lo tanto, si una ladera se encuentra húmeda o seca con mayor frecuencia.

También se puede interpretar en términos de cantidad de vegetación (por ejemplo en zonas umbrías suele existir más bosque o matorral y una mayor estabilidad de la formación superficial por la presencia de raíces). La orientación de la ladera también influirá en la cantidad de lluvia recibida, según la dirección de avance de los frentes nubosos (Ver Figura 1.4).

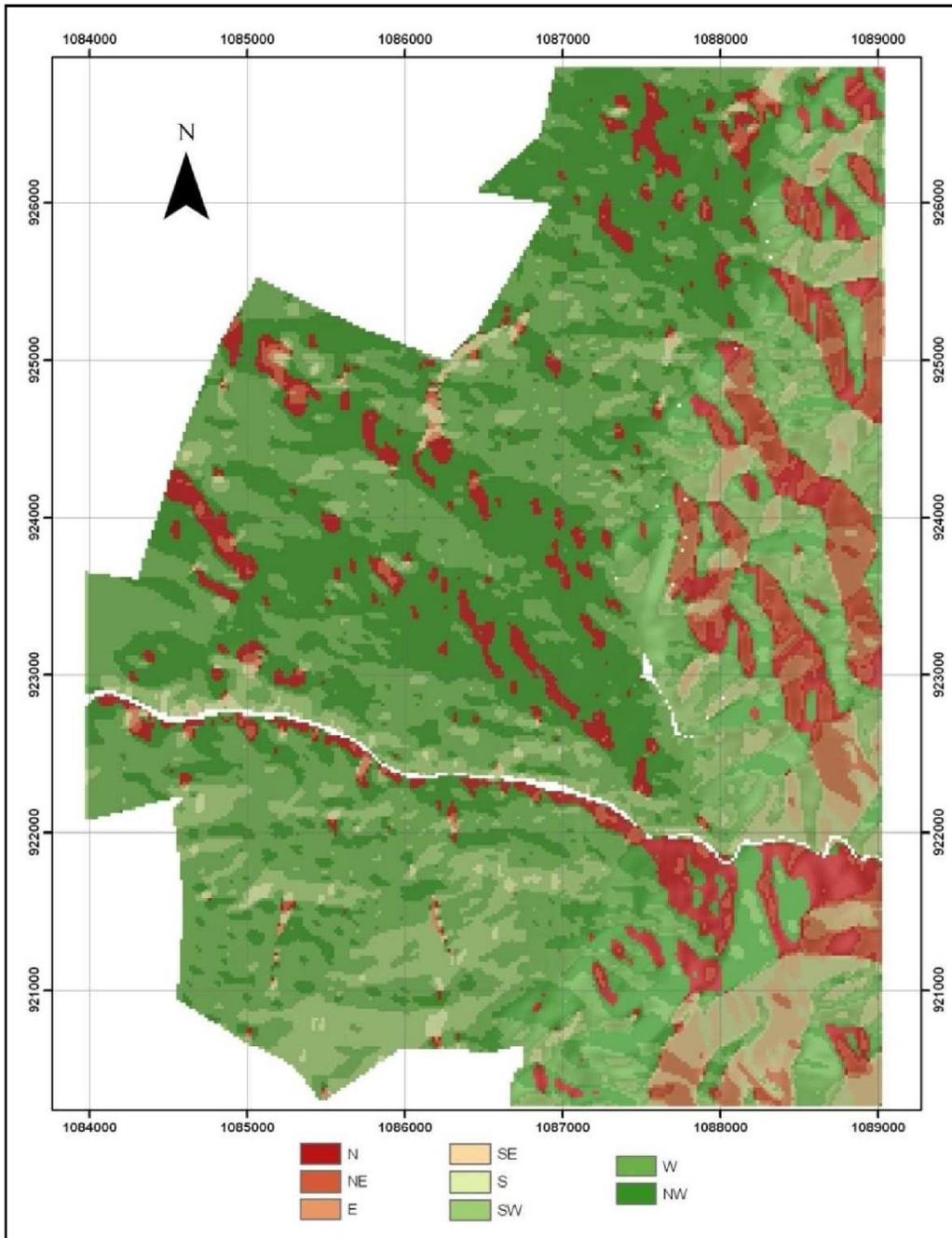


Figura 1.4 Mapa de orientación, municipio de Buga.

1.2.4. Usos del Suelo (USO)

Representa la vegetación o cobertura vegetal del área de estudio, y el uso actual del suelo. Esta variable es de tipo cualitativo y se deriva del mapa de cobertura y uso del suelo. La cobertura del suelo, influye en la estabilidad de depósitos, suelos y macizos rocosos. En la Figura 1.5, se ilustra el mapa de cobertura actual del suelo del municipio de Buga. Nótese que la zona montañosa se caracteriza por la presencia de bosques y pastos. En general los problemas de inestabilidad y erosión se detectaron precisamente en la zona de pastos.

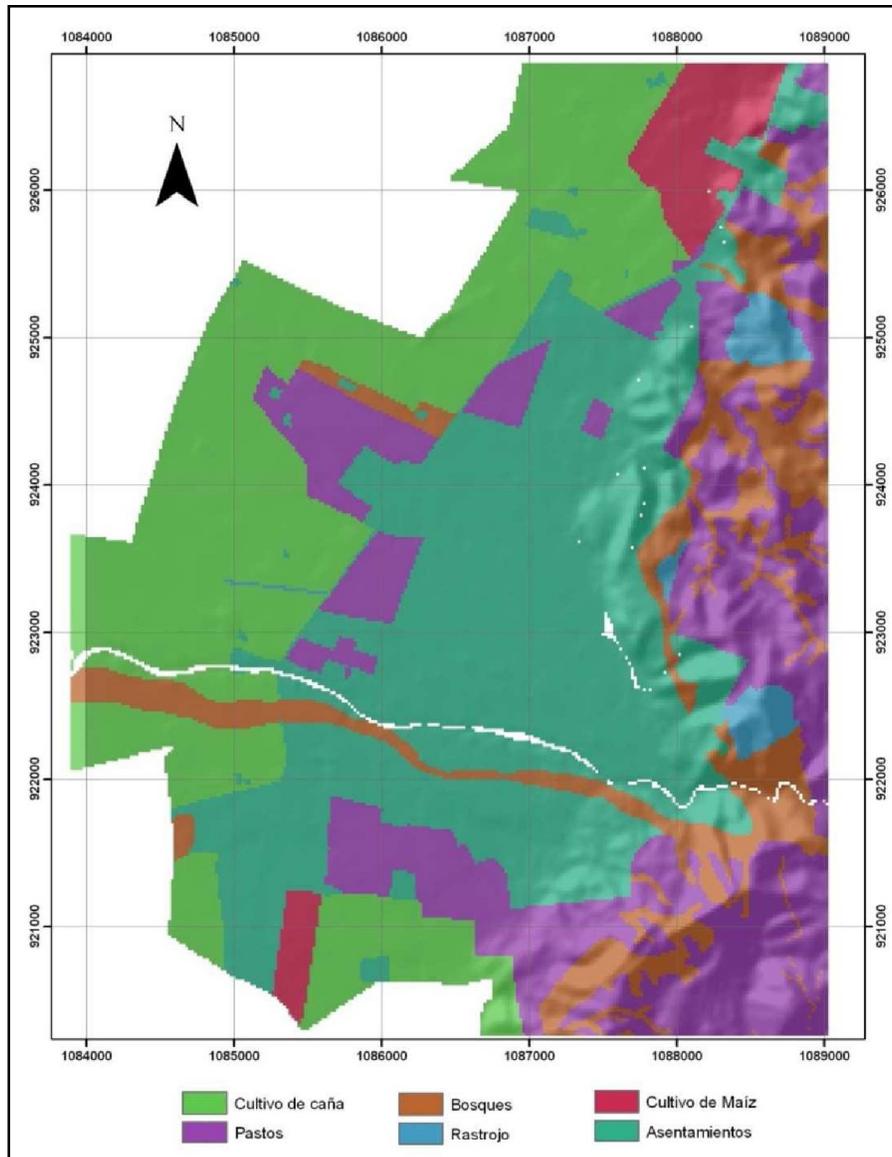


Figura 1.5 Mapa de usos del suelo, municipio de Buga.

1.2.5. Geología (GEOL)

Variable cualitativa que se deriva de la cartografía de unidades geológicas, y representa el tipo de material geológico a nivel superficial (Figura 1.6). En general se observa que la mayor parte de los fenómenos de inestabilidad están asociados a la formación la Paila y terrazas aluviales.

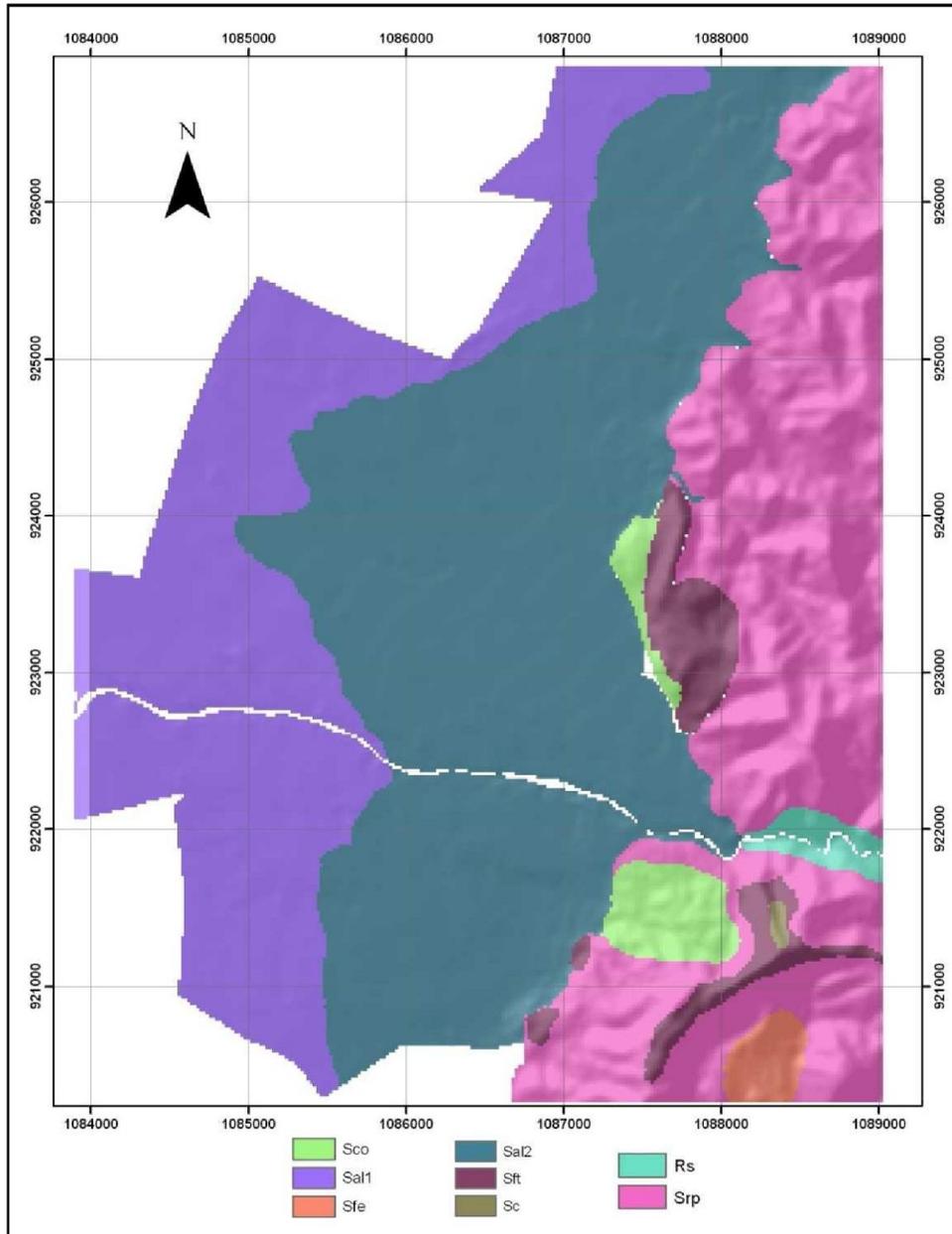


Figura 1.6 Mapa de geología, municipio de Buga.

1.3. ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

Como se explicó anteriormente, la evaluación de la susceptibilidad se realizó por medio del análisis bivariado, lo que implica, tomar cada una de las variables categorizadas y cruzarlas con la variable movimiento, para obtener un resultado intermedio del análisis de pesos Wf de cada variable según las ecuaciones (4) y (5) presentadas en el apartado 3. Una vez obtenidos todos los factores Wf , se suman las variables para obtener el índice LSI según la siguiente expresión:

$$LSI = WfPendiente + WfCurvar + WfOrientación + WfUsos + WfGeología$$

Una vez aplicado el método en cada una de las variables, se observa que los factores cuyos pesos indican mayor relación con la presencia de los movimientos en masa son la Pendiente, Orientación y Uso del suelo. En general las zonas con pastos tienen mayor peso y podrían generar problemas de inestabilidad; las zonas intervenidas por cultivos tienen menor peso con relación al anterior, en la ocurrencia de movimientos.

En cuanto la variable Pendiente, tiene una gran influencia en la generación de zonas de inestabilidad, de acuerdo con los pesos Wf positivos que representan estas variables. La clasificación de los Índices en categorías de susceptibilidad, se basó en el método de *Divisiones Naturales* (Natural Breaks)¹ del programa SIG ArcGIS, el cuál busca los grupos “inherentes” de los datos, es decir, identifica saltos o puntos de quiebre en secuencias de valores similares y maximiza las diferencias entre clases.

El método induce cierta homogeneidad en las categorías. Una vez calculados los pesos para cada una de las variables, se realiza la suma algebraica de las mismas para obtener el mapa Índice de Susceptibilidad (LSI), cuyos resultados se presentan a continuación (ver Figura 1.8):

✓ **SUSCEPTIBILIDAD ALTA:** Zonas con condiciones altamente favorables a la ocurrencia de procesos de inestabilidad asociados principalmente con movimientos antiguos y a zonas afectadas por erosión concentrada y pequeños movimientos en masa, además de las características litológicas del material aflorante en la zona, y de fuertes pendientes que caracterizan la zona alta del municipio. En general la zona enmarcada dentro de susceptibilidad alta, corresponde al frente montañoso en donde se pueden visualizar actuales deslizamientos menores de remoción en masa y procesos de erosión activa, como se puede observar en la Figura 1.8. Finalmente, en la Figura 1.7, se presenta la

¹ <http://webhelp.esri.com>

distribución de la susceptibilidad en el área de estudio. Nótese que la susceptibilidad alta abarca una proporción pequeña dentro de la zona de estudio (6%).

- ✓ **SUSCEPTIBILIDAD MEDIA:** Las zonas de susceptibilidad media están relacionadas con pendientes topográficas muy bajas del abanico de Buga, el cual se encuentra urbanizado; y la parte baja del frente montañoso la cual se encuentra cubierta por pastos y bosques los cuales reducen la infiltración directa del agua de escorrentía proveniente de las lluvias. Nótese que las zonas de susceptibilidad media se caracterizan por presentar pendientes relativamente suaves, y en todos los casos inferiores a 25 grados.

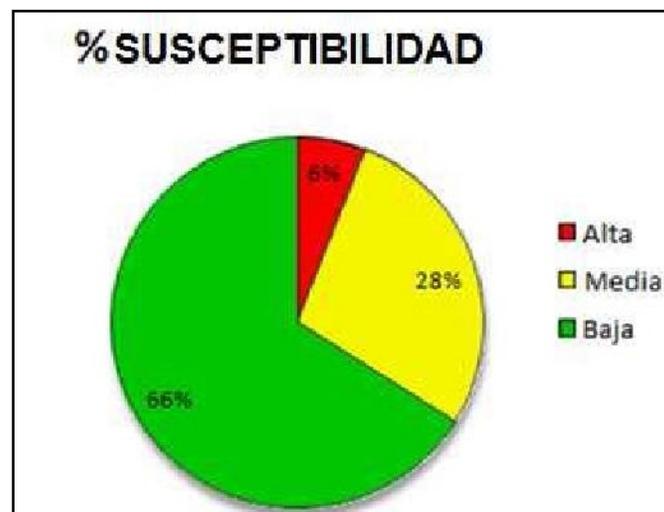


Figura 1.7 Distribución porcentual de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa.

- ✓ **SUSCEPTIBILIDAD BAJA:** Zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad. Corresponde al sector plano compuesto por la llanura del río Cauca que abarca gran parte de la zona urbana y de expansión del municipio.

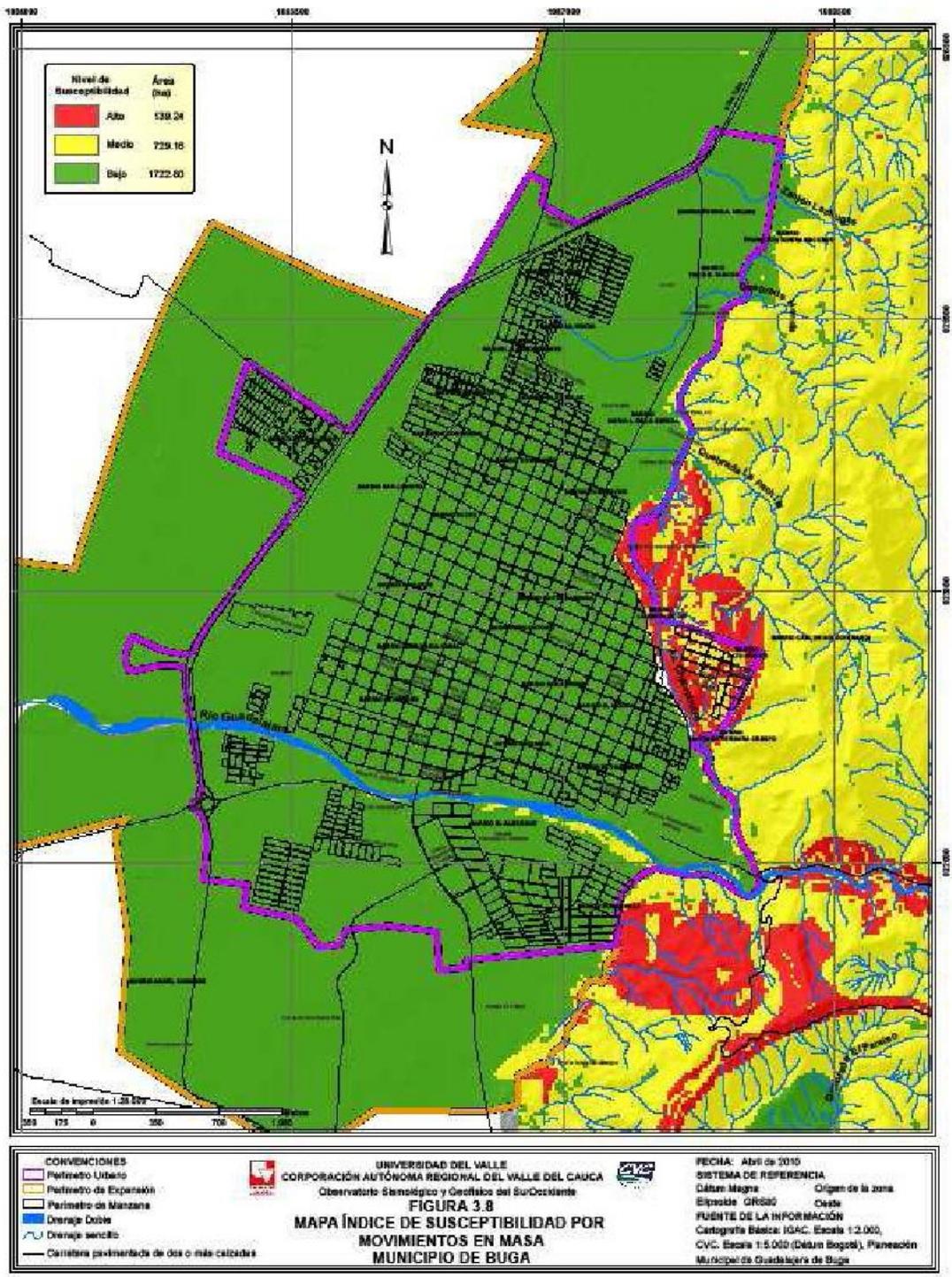


Figura 1.8 Mapa de índice de susceptibilidad para el municipio de Buga.

2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

La zonificación de amenazas de un territorio es una de las herramientas necesarias para la administración racional de la ocupación de áreas socio-económicamente aprovechables. Permite la toma de decisiones tendiente al mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad, a cargo de entes territoriales ya que es un insumo para el ordenamiento territorial, la planeación del desarrollo y la gestión de riesgos, entre otros. Es fundamental para determinar bien sea el emplazamiento de vivienda, usos comerciales, industriales, institucionales, recreación, infraestructura, conservación entre otros. Además permitirá restringir y condicionar el uso del suelo, en zonas de amenaza alta, de manera que ha futuro se eviten eventuales demandas y problemas asociados a reubicación de viviendas.

La amenaza por movimientos en masa de una ladera, entendida como un evento natural, humano o combinado, potencialmente destructivo de vidas, bienes, economía y/o cultura de una comunidad (INGEOMINAS, 2006), involucra en su evaluación, el conocimiento claro del tipo de movimiento en masa amenazante activo o potencial, así como estimativos de su magnitud, recurrencia y localización geográfica. Esta es una actividad compleja que requiere una gran cantidad de información de aspectos tales como: topografía, cobertura y usos del suelo, geología (geología para ingeniería, estratigrafía, geología estructural) geomorfología, clima, hidrología, hidráulica, hidrogeología (niveles piezométricos y su variación en el tiempo, régimen de flujo de aguas subterráneas), parámetros geomecánicos de materiales e intensidad y probabilidad de ocurrencia de factores detonantes tales como lluvias y sismos.

En este capítulo se presenta la metodología seguida, así como las técnicas numéricas de equilibrio límite utilizada en los análisis de estabilidad.

2.1. ASPECTOS METODOLOGICOS GENERALES

Para la evaluación de la amenaza se tuvo en cuenta el mapa de susceptibilidad previamente obtenido, el cual tiene en cuenta, la predisposición o susceptibilidad de las laderas del área de estudio a desarrollar este tipo de procesos, evaluada mediante la herramienta SIG. Al anterior mapa se le incorporan los agentes externos sismo y lluvia, para de esta manera obtener el respectivo mapa de amenaza. Dentro de este mapa se tienen en cuenta aspectos tales como: inclinación del terreno, parámetros de resistencia, pruebas de infiltración y sismicidad de la zona.

Para el caso de las áreas altamente susceptibles a los movimientos en masa tipo flujo torrencial, la evaluación de la amenaza se realizó con base en el modelo digital del terreno, características geotécnicas de los materiales superficiales.

En la Figura 2.1, se ilustra el esquema metodológico general utilizado para evaluación de la amenaza por movimientos en masa, nótese que el mapa de amenazas depende básicamente del mapa de susceptibilidad al cual se le han adicionado los agentes detonantes lluvia y sismo. En este orden de ideas se procederá a continuación a detallar la obtención de dicho mapa.

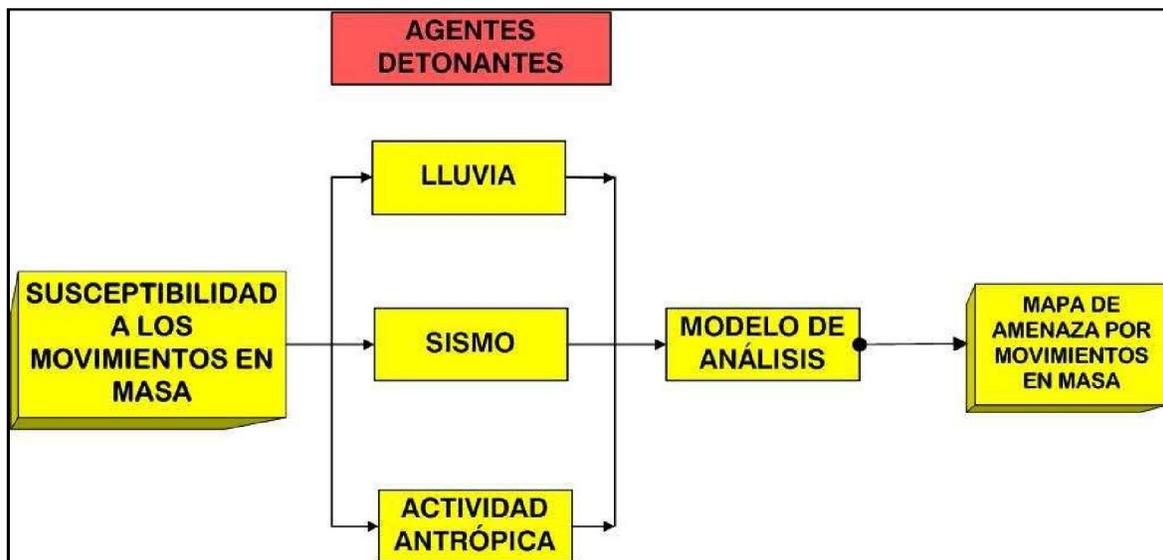


Figura 2.1 Esquema metodológico general - Evaluación de la amenaza por movimientos en masa.

2.2. MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

El modelo geológico-geotécnico se define como aquel que involucra aspectos geológicos (variación en profundidad de los diferentes depósitos) y geotécnicos (caracterización geomecánica de los diferentes materiales), que permitirá un adecuado modelamiento numérico de la zona que se pretende estudiar. Las anteriores variables son necesarias para la obtención de perfiles geotécnicos que serán utilizados posteriormente en los análisis de equilibrio límite. En este orden de ideas se definieron siete perfiles geotécnicos, los cuales se definieron basados en los registros de perforaciones realizados en la zona de estudio denominadas: SECCIÓN A-A', SECCIÓN B-B', SECCIÓN C-C', SECCIÓN D-D', SECCIÓN E-E', SECCIÓN F-F' y SECCIÓN G-G, consideradas las secciones más críticas durante la fase de campo. La ubicación de estas secciones se ilustra en la Figura 2.2. Es importante aclarar que en los sectores donde se realizaron los perfiles geológicos, se

caracterizan porque el mecanismo de falla es rotacional, y que en la restante zona de estudio, el mecanismo de falla es traslacional.

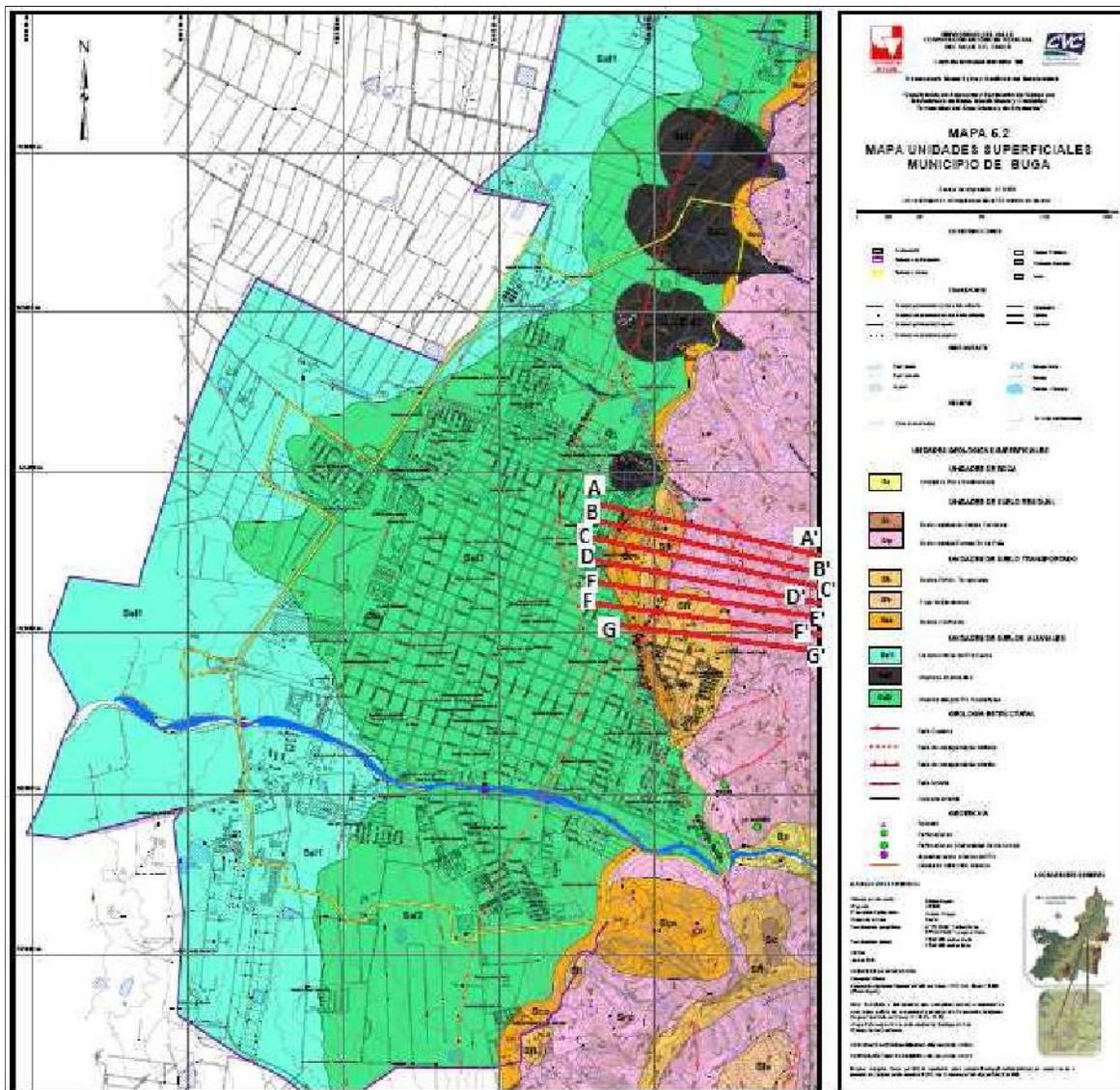


Figura 2.2 Localización en planta de secciones en estudio.

2.3. DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES EN PROFUNDIDAD

De acuerdo a la información obtenida de los registros de perforaciones (S-1 y S-2), apiques y ensayos de refracción sísmica, los resultados de laboratorio y la geología del sector, se procedió a definir tipos y espesores de los materiales, agrupándolos de acuerdo a su similitud desde el punto de vista geomecánico. Además se contó con registros de

perforaciones realizadas en estudios anteriores y la cual fue tenido en cuenta en la ejecución del presente estudio. La información utilizada para efectos de los modelamientos que se presentarán en las subsiguientes secciones se ilustra en la Figura 2.3.

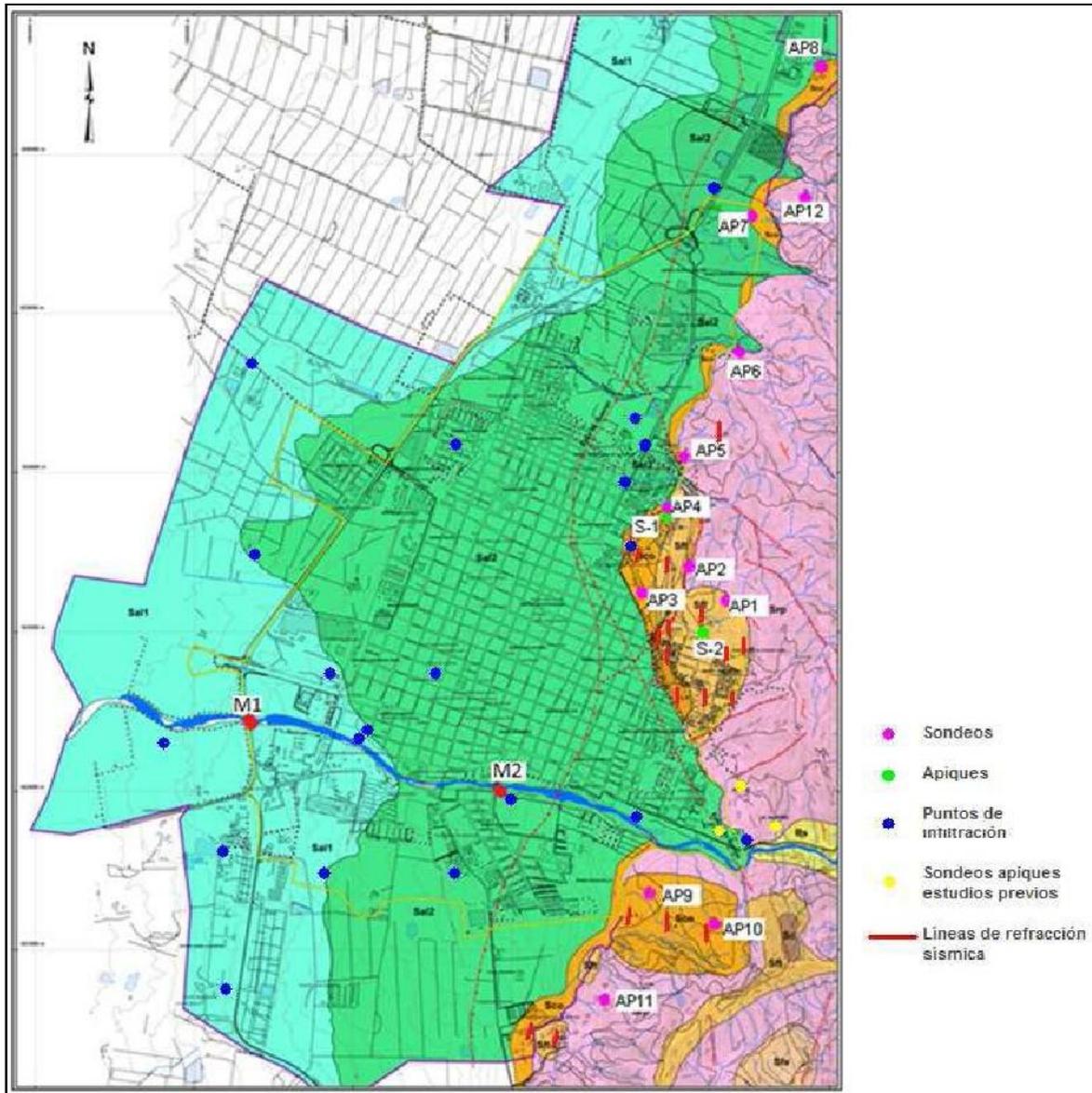


Figura 2.3 Localización de ensayos de campo realizados en el municipio de Buga.

Basados en los registros de las perforaciones, apiques, líneas de refracción sísmica, y en el perfil topográfico, se construyeron los perfiles geológico-geotécnicos ilustrados en la Figura 2.4. De este perfil se deduce la presencia de cuatro estratos, cuyo espesor variará de un sector a otro. Los restantes perfiles geológico-geotécnicos e presentan en el anexo de análisis de estabilidad.

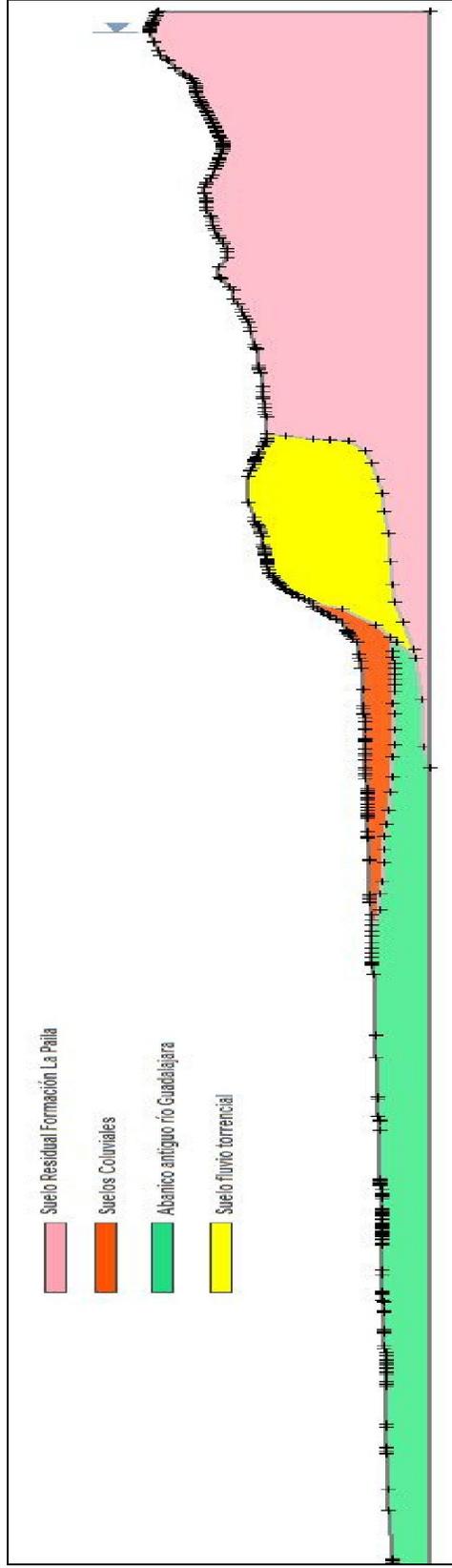


Figura 2.4 Perfil geológico geotécnico, tomado del perfil D – D’.

2.4. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN

Definido el modelo geológico-geotécnico, se procedió a la asignación de los parámetros de resistencia de las diferentes capas detectadas previamente. Es importante resaltar que estos parámetros se obtuvieron de los ensayos triaxiales y de corte directo, presentados en el capítulo de exploración y ensayos de laboratorio (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos

DESCRIPCIÓN	ϕ' (°)	c' (Kg/cm ²)	g (Gr/cm ³)
Suelo residual formación La Paila	37.0	0.08	1.7
Suelos Coluviales	21.8	0.20	1.7
Abanico antiguo río Guadalajara	26.5	0.20	1.9
Suelos fluvio-torrenciales	23.4	0.20	1.9

2.5. MECANISMOS DE FALLA MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE

Dentro de la zona de estudio se identificaron básicamente dos mecanismos de falla predominantes en las laderas del municipio de Buga: falla traslacional y falla rotacional. A continuación se presentan las bases teóricas de los mecanismos identificados, para posteriormente entrar a realizar los respectivos análisis y poder de esta manera obtener el mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa.

2.5.1. Falla Planar en Talud Infinito

Este mecanismo de falla es el más frecuente en la zona de estudio y corresponde a movimientos del terreno relativamente superficiales paralelos al talud y cuyo espesor en general no supera los dos metros. El análisis de estabilidad se analizó para dos condiciones, en primer lugar para talud parcialmente saturado (expresión 1) y en segundo lugar para talud parcialmente saturado con sismo (expresión 2). Las expresiones utilizadas para cada uno de los anteriores casos están dadas por la siguiente expresión:

Parcialmente saturado

$$FS = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w)h \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma \sin \beta \cos \beta} \quad (1)$$

Parcialmente saturado y sismo

$$FS = \frac{c' + (\gamma \cos^2 \beta - \alpha h \gamma \sin \beta \cos \beta - m\gamma_w h \cos^2 \beta) \tan \phi'}{\gamma \sin \beta \cos \beta + \alpha \gamma h \cos^2 \beta} \quad (2)$$

Donde:

c' = intercepto de cohesión

ϕ = ángulo de fricción

β = inclinación del terreno

α = coeficiente de aceleración horizontal

h = espesor de la capa de suelo

m = factor que varía entre 0 y 1. (0 = talud seco, 1 = talud saturado)

FS = Factor de seguridad

La anterior expresión fue programada en ARcGis, para talud saturado, talud parcialmente saturado y sismo. Los resultados de dichos análisis se presentan en las secciones subsecuentes, y serán plasmados en el mapa de amenaza.

2.5.2. Falla Rotacional

Estos análisis de estabilidad se realizaron con el programa SLIDE (Rocscience, 2003), asumiendo que el mecanismo de falla es rotacional. Debido a que el método de análisis es iterativo, no es posible programarlo en la plataforma del SIG.

La metodología seguida para este tipo de análisis involucró las siguientes actividades:

- Definición del modelo Geológico-Geotécnico.
- Asignación de parámetros de resistencia a los diferentes estratos definidos en el modelo geológico-geotécnico (obtenidos previamente en los ensayos de laboratorio).
- Definición de las condiciones de frontera. Es decir, definición y ubicación de las cargas externas transmitidas por las estructuras y posición del nivel freático.

- Análisis de estabilidad para la condición actual.
- Análisis de estabilidad para la condición futura con sismo y lluvia.
- Análisis de estabilidad para la condición futura con medidas de mitigación.

De los anteriores análisis, la condición futura con sismo y lluvia corresponderá básicamente a los resultados del mapa de amenaza. Para tal fin se generaron 2000 superficies de falla circulares procediéndose posteriormente a escoger las diez superficies de falla más críticas. Estos análisis serán utilizados en la calibración del mapa de amenaza (ver Anexo 1 “Análisis por secciones falla rotacional”). Para efectos de análisis, a continuación se presentan los resultados obtenidos para dos secciones típicas (B-B’ y F-F’).

Resultados Análisis Sección B-B’

Para todas las siete secciones se realizaron los análisis de estabilidad para los tres escenarios de amenaza que se discutirán en la próxima sección, es decir, talud parcialmente saturado sin sismo, talud seco con sismo y talud parcialmente saturado con sismo. De los análisis de esta sección se destacan los siguientes aspectos:

- Para el caso de talud parcialmente saturado sin sismo, se obtiene que la urbanización y pavimentación limitan la infiltración y como consecuencia de esta condición el talud es estable, aún en la parte más alta de éste (Figura 2.5). Nótese que en todos los análisis, se ha tenido en cuenta la carga transmitida por las viviendas existentes en el sector.
- Para la condición de talud seco y con sismo (Figura 2.6), se destaca que el talud tampoco fallará en el evento de un sismo en época de verano. El mecanismo de falla para este caso, corresponde a deslizamientos rotacionales muy superficiales.
- En la Figura 2.7 se ilustran los resultados de los análisis en condiciones de talud parcialmente saturado con sismo, siendo ésta la condición más desfavorable de las tres, presentándose la falla a todo lo largo del talud afectando parte del barrio. Para este caso se observa que se verán afectadas no solamente las viviendas ubicadas en la parte superior del talud, sino también las ubicadas en la parte intermedia, debido a que la superficie de falla es profunda siendo el material involucrado el depósito fluvio- torrencial.

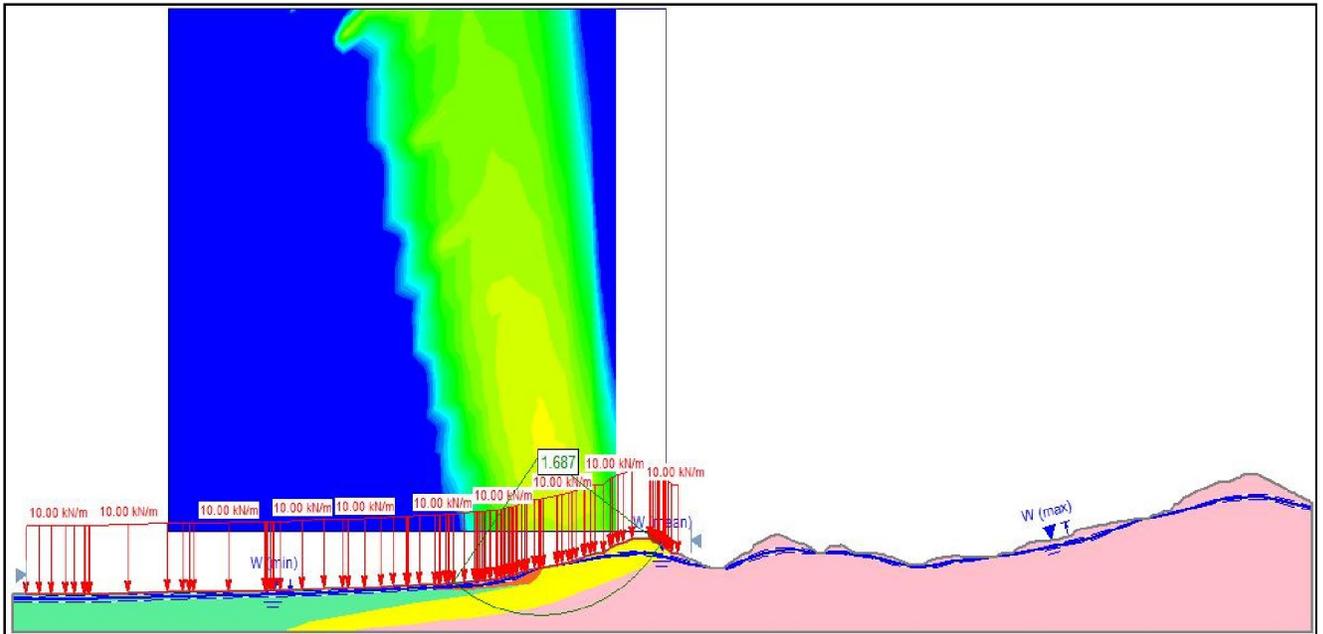


Figura 2.5 Análisis de equilibrio límite, sección B – B' para talud parcialmente saturado sin sismo.

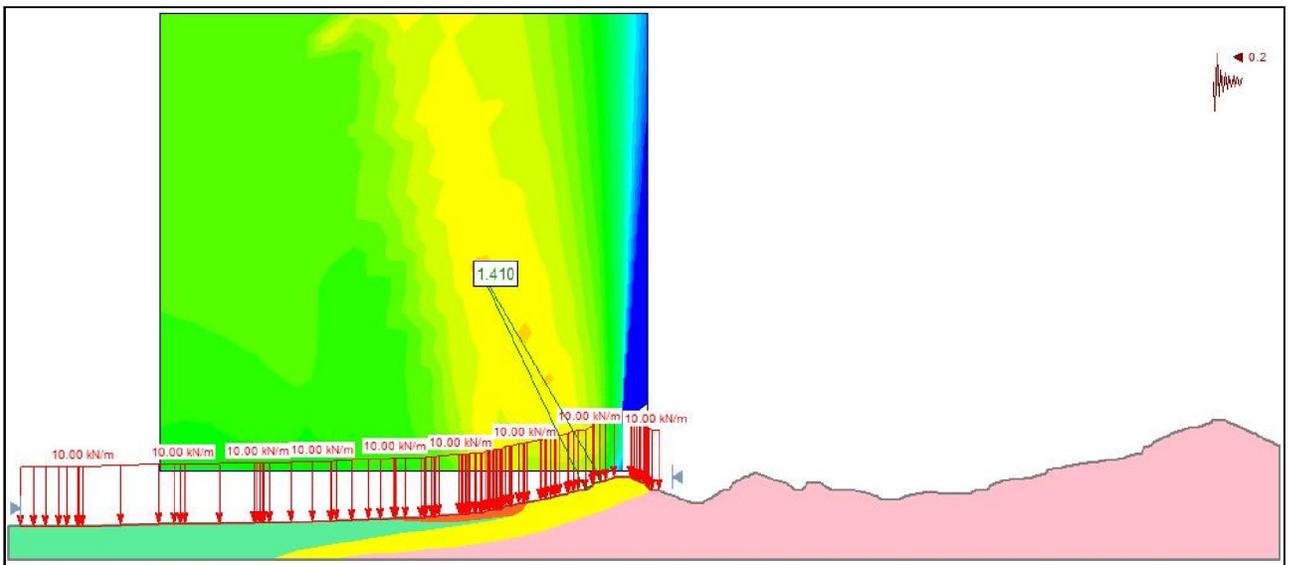


Figura 2.6 Análisis de equilibrio límite, sección B – B' para talud seco y sismo de 0.2 g.

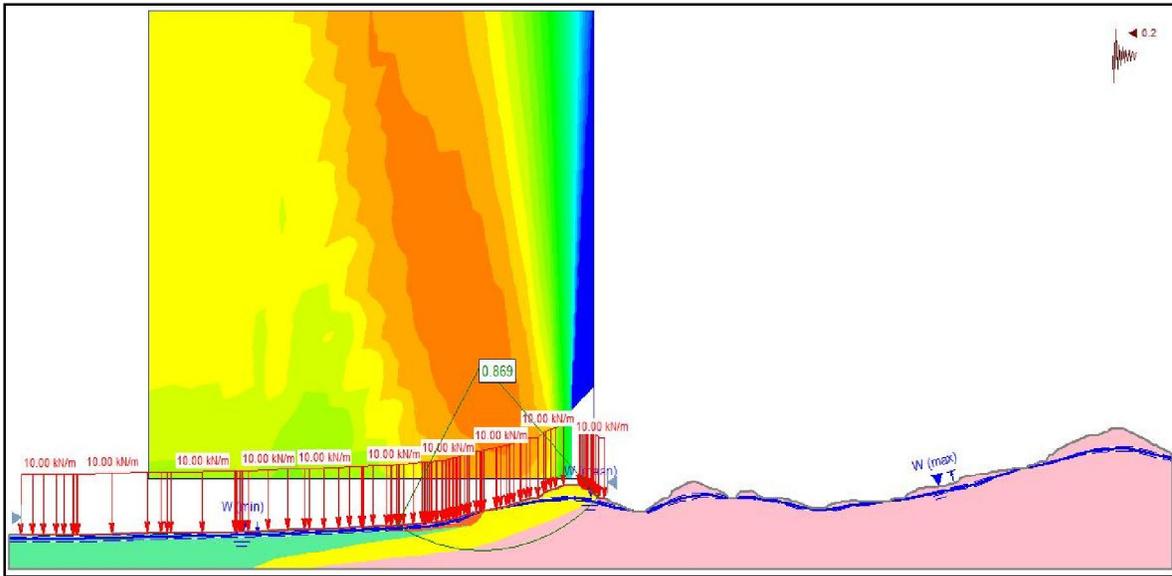


Figura 2.7 Análisis de equilibrio límite, sección B – B' para talud parcialmente saturado y sismo 0.2 g.

Resultados Análisis Sección F-F'.

Esta sección pasa por el costado norte del barrio Alto Bonito cerca al alto de la Cruz, en un sector donde actualmente se pueden observar pequeños movimientos en masa y zonas de erosión concentrada. A continuación presentaremos los resultados de los análisis de estabilidad de esta sección para los diferentes escenarios:

- En la Figura 2.8 se puede visualizar que el talud es estable en épocas de lluvias fuertes y prolongadas, es decir, para la condición de talud parcialmente saturado sin sismo. Este hecho se debe a que la zona alta del talud se encuentra cubierta por pastos, el material es relativamente impermeable y además, la ladera cuenta con una adecuada red de flujo que reducen la infiltración directa del agua de escorrentía, y en la zona baja se cuenta con buenas estructuras para el manejo de dichas aguas. Con el fin de mantener esta condición, sería importante implementar medidas adicionales con el fin de minimizar el efecto del agua en la inestabilidad de la ladera.

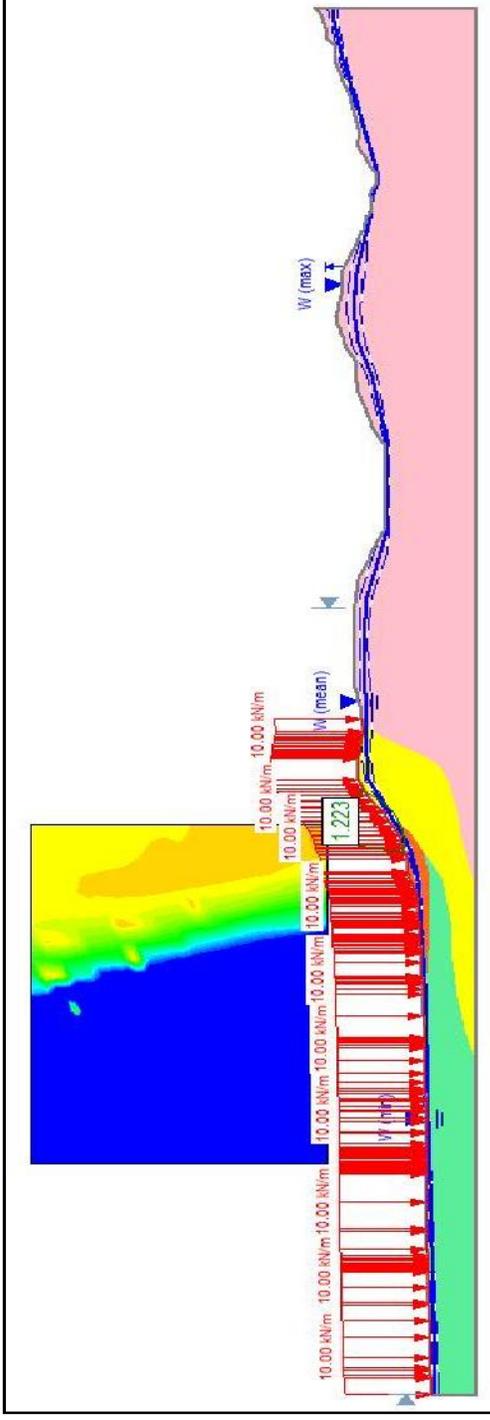


Figura 2.8 Análisis de equilibrio

- En la Figura 2.9, por otro lado, se presentan los resultados de talud seco con sismo. Para este caso se destaca que bajo condición sísmica el talud tampoco fallaría.

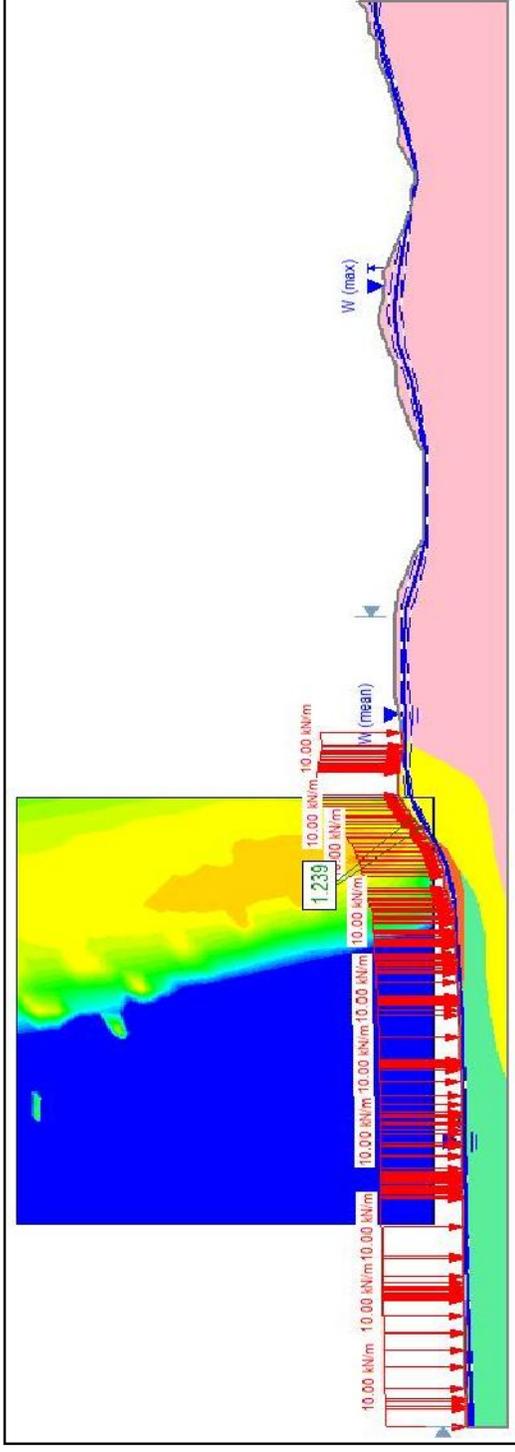


Figura 2.9 Análisis de equilibrio límite, sección F-F para talud seco y sismo de 0.2g.

- La condición más crítica será cuando se presenten simultáneamente dos agentes detonantes como lo son la lluvia y el sismo; bajo esta condición el talud fallará afectando la parte alta del barrio La Revolución (Figura 2.10). Nótese sin embargo, que dada la conformación actual del terreno, la superficie de falla sería muy superficial, pero suficiente para afectar las viviendas que se encuentran cimentadas en la ladera.

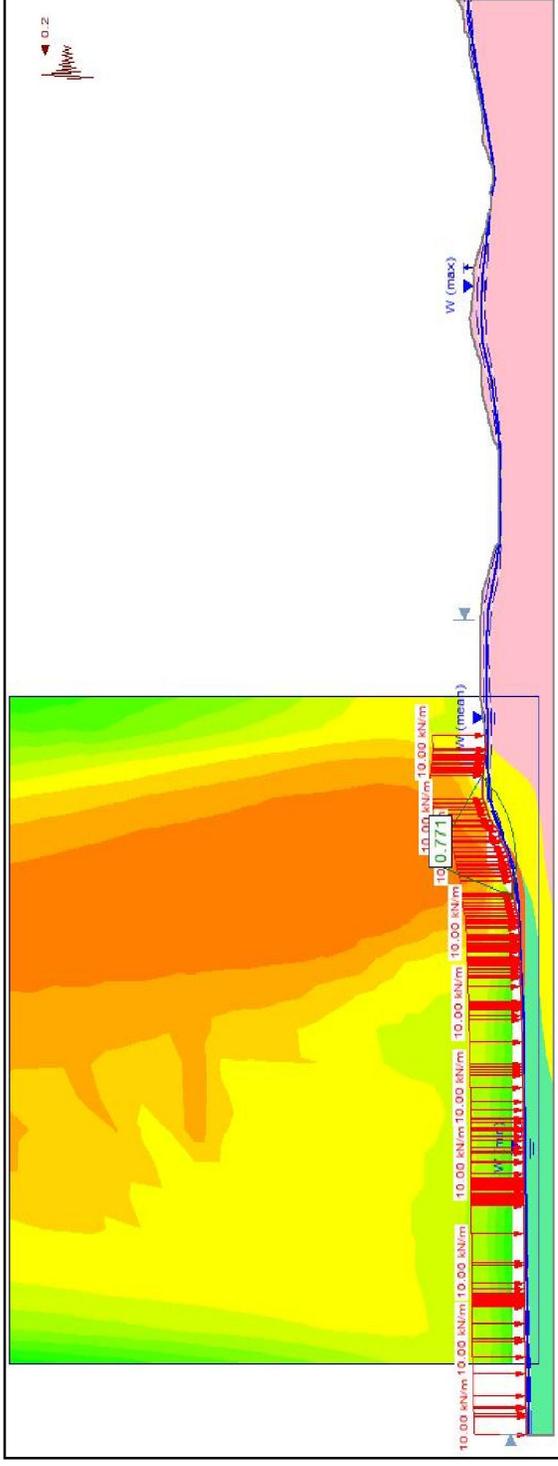


Figura 2.10 Análisis de equilibrio límite, sección F-F' para talud parcialmente saturado y con sismo de 0.2g.

- Finalmente en la Figura 2.11, se puede observar el análisis de sensibilidad del factor de seguridad con la variación del nivel freático, de donde se destaca que para que el talud falle es necesario la saturación total de la ladera (100%). Recordemos que los análisis anteriores se realizaron para talud parcialmente saturado.

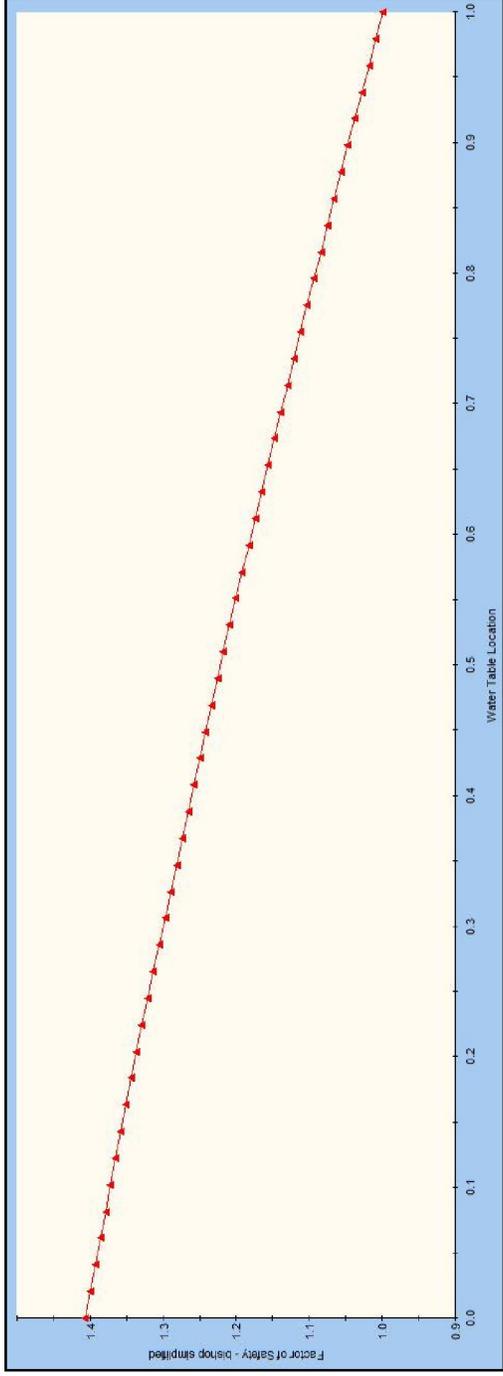


Figura 2.11 Análisis de sensibilidad con la variación del nivel freático.

3. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR ESCENARIOS

3. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR ESCENARIOS

Para el análisis determinístico en función del factor de seguridad, se considerarán diferentes escenarios de acuerdo con la profundidad del nivel freático y la aceleración del terreno. Para simular el efecto de lluvias detonantes correspondientes a un periodo de retorno de 25 años, el modelo toma el nivel freático a nivel superficial (condición saturada). De la misma manera, para simular el efecto de lluvias detonantes correspondientes a un periodo de retorno de 10 años, el modelo tomará el nivel freático a niveles intermedios del espesor de suelo movilizado (condición parcialmente saturada).

Teniendo presente el efecto adverso de los agentes detonantes lluvia y sismo, se generaron tres escenarios, en los que se tiene en cuenta de manera independiente el efecto del agua, el sismo y finalmente el efecto combinado de los anteriores agentes externos. En la Tabla 3.1, se ilustra los escenarios propuestos para la generación del mapa de amenazas.

Tabla 3.1 Escenarios de análisis para la estimación de factores de seguridad.

ESCENARIO	CONDICION	SISMO	Aa
1	Parcialmente saturado	Sin sismo	
2	Seca	Con sismo	0.20
3	Parcialmente saturado	Con sismo	0.20

3.1. FUERZA SÍSMICA

En la Norma Sismoresistente vigente en el territorio nacional, (NSR-98), se hizo una zonificación sísmica proporcionando para los diferentes municipios de Colombia, un valor aproximado del Coeficiente de Aceleración (Aa). Para el presente estudio, en el Departamento del Valle del Cauca, el valor de dicho coeficiente es de 0.25.

En la Resolución 227/2004, por la cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C, se especifica que la aceleración crítica a ser considerada en los análisis de tipo pseudo-estático no podrá ser menor a 2/3 de la aceleración máxima. Por tanto en este caso se tomo un $Aa = 0.20$, pero se realizaron evaluaciones de sensibilidad variando dicho valor desde 0 a 0.3. Existen diversos criterios para la escogencia de este factor, pero creemos que los 2/3, es un valor mundialmente aceptado.

Teniendo presente lo anterior se definieron una serie de rangos que permitieron subdividir los sectores en zonas de amenaza baja, media y alta, tal como se ilustran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Rangos del Factor de Seguridad para definir el nivel de amenaza.

AMENAZA	RANGO F.S.
BAJA	> 1.2
MEDIA	1 – 1.2
ALTA	< 1

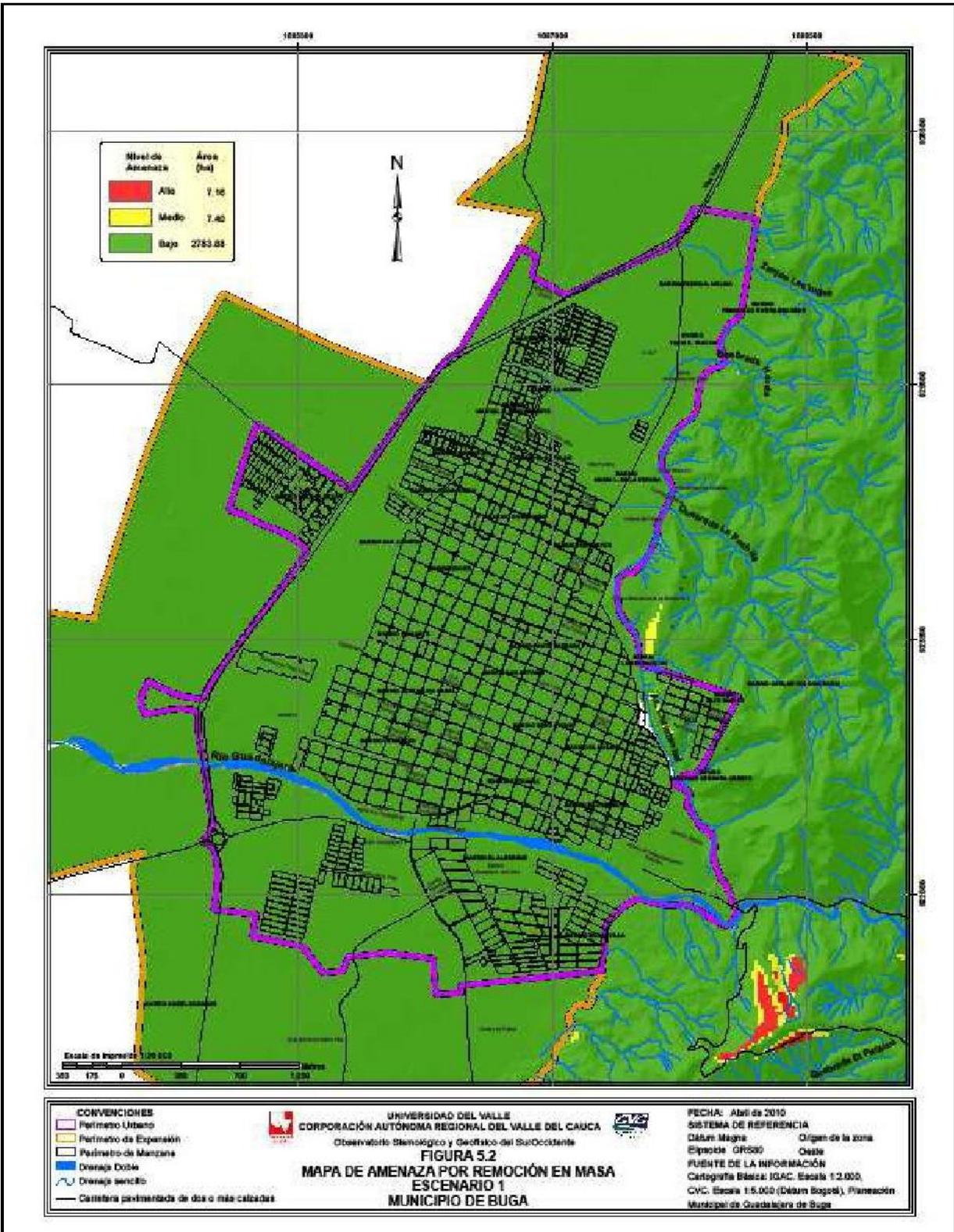
Para la obtención del mapa de amenazas, es necesario tener presente que durante la fase de campo (Geología), se detectó que en el frente montañoso hacia la parte alta del barrio Fuenmayor (alto de la cruz) el mecanismo de falla es de tipo rotacional, mientras que para el resto de la zona de estudio el mecanismo de falla imperante es de tipo traslacional. Lo anterior implicó que los análisis realizados fueran distintos, de manera que para un sector se realizaron análisis de estabilidad para falla circular, mientras que para el otro fue falla planar en talud infinito. Teniendo presente lo anterior, procederemos a destacar los principales resultados de los anteriores escenarios:

3.1.1. Escenario 1. Talud parcialmente Saturado sin Sismo

Esta condición se puede presentar durante lluvias fuertes y prolongadas, que ocasionen un rápido ascenso del nivel freático, así como la saturación del terreno. Bajo este escenario, se encuentra que el casco urbano y la zona de expansión no se verán afectados, a excepción de la zona sur oriental en donde históricamente se han presentado deslizamientos y en la actualidad existe un deslizamiento rotacional activado; en dicha zona se concentra el área de amenaza alta correspondiente al 0.5% del total de la amenaza que en gran parte corresponde a amenaza baja (98.5%) (Ver Figura 3.1). La discriminación del nivel de amenaza para la zona de estudio, se presenta finalmente en la Figura 3.2 y Mapa 3.1, destacándose el hecho que tanto el perímetro urbano como la zona de expansión se encuentran en un nivel de amenaza baja.



Figura 3.1 Distribución porcentual de amenaza, escenario 1.

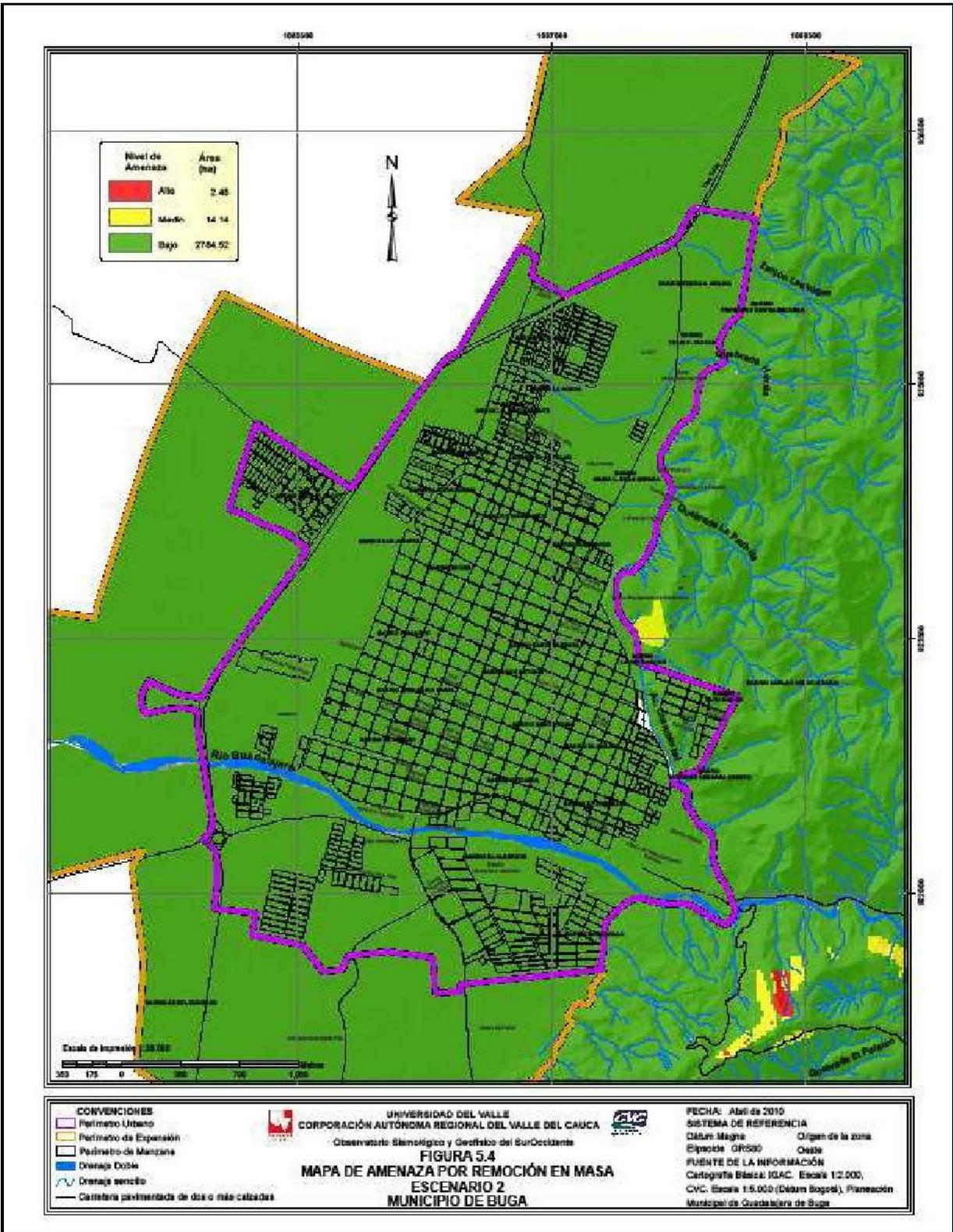


3.1.2. Escenario 2. Talud seco con Sismo

Esta condición implica la generación de un sismo en verano, en la que el régimen de lluvias es mínimo, y el nivel freático se encuentra abatido. Para efecto de análisis se asume un coeficiente de aceleración horizontal de 0.2g. Como consecuencia del sismo las laderas del alto de la Cruz y del filo de El Derrumbado se verían afectadas (ver Figura 3.4 y Mapa 3.2), siendo la zona más afectada esta última. Nótese que aún para este escenario, la zona de amenaza alta es realmente pequeña. Y no supera el 1%, tal como se ilustra en la Figura 3.3. Finalmente se observa que el nivel de amenaza baja es del orden del 98% total de la zona de estudio.



Figura 3.3 Distribución porcentual de amenaza, escenario 2.



UNIVERSIDAD DEL VALLE
 CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA
 Observatorio Sísmológico y Geotécnico del SurOccidente
FIGURA 5.4
MAPA DE AMENAZA POR REMOCIÓN EN MASA
ESCENARIO 2
MUNICIPIO DE BUGA

3.1.3. Escenario 3. Talud parcialmente saturado con Sismo

Corresponde a la condición más crítica. Este escenario se asume que se presente un sismo durante un periodo de lluvias fuertes y prolongadas. Como se puede observar en la Figura 3.6 y Mapa 3.3, el efecto del aumento en el nivel freático, como es el caso de lluvias torrenciales en la zona, tiene como consecuencia la falla de las laderas del costado oriental hacia el frente montañoso afectando los barrios Fuenmayor, La Revolución y la parte baja de Ato Bonito. Además también se verán afectadas las laderas de la zona suroriental correspondientes al Filo El Derrumbado y a la vereda El Tablazo muy cerca al casco urbano.

Es importante destacar que aunque el mayor porcentaje de la amenaza corresponde a amenaza baja (90%), los movimientos antes mencionados cubren el 5% del área de estudio tal como se ilustra en la Figura 3.5.

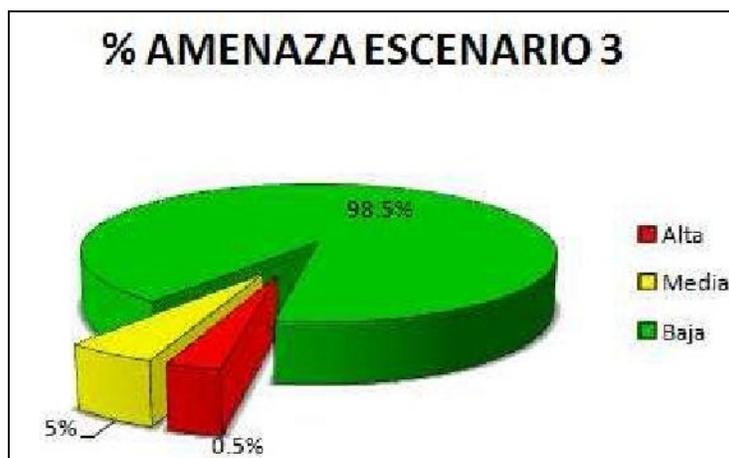
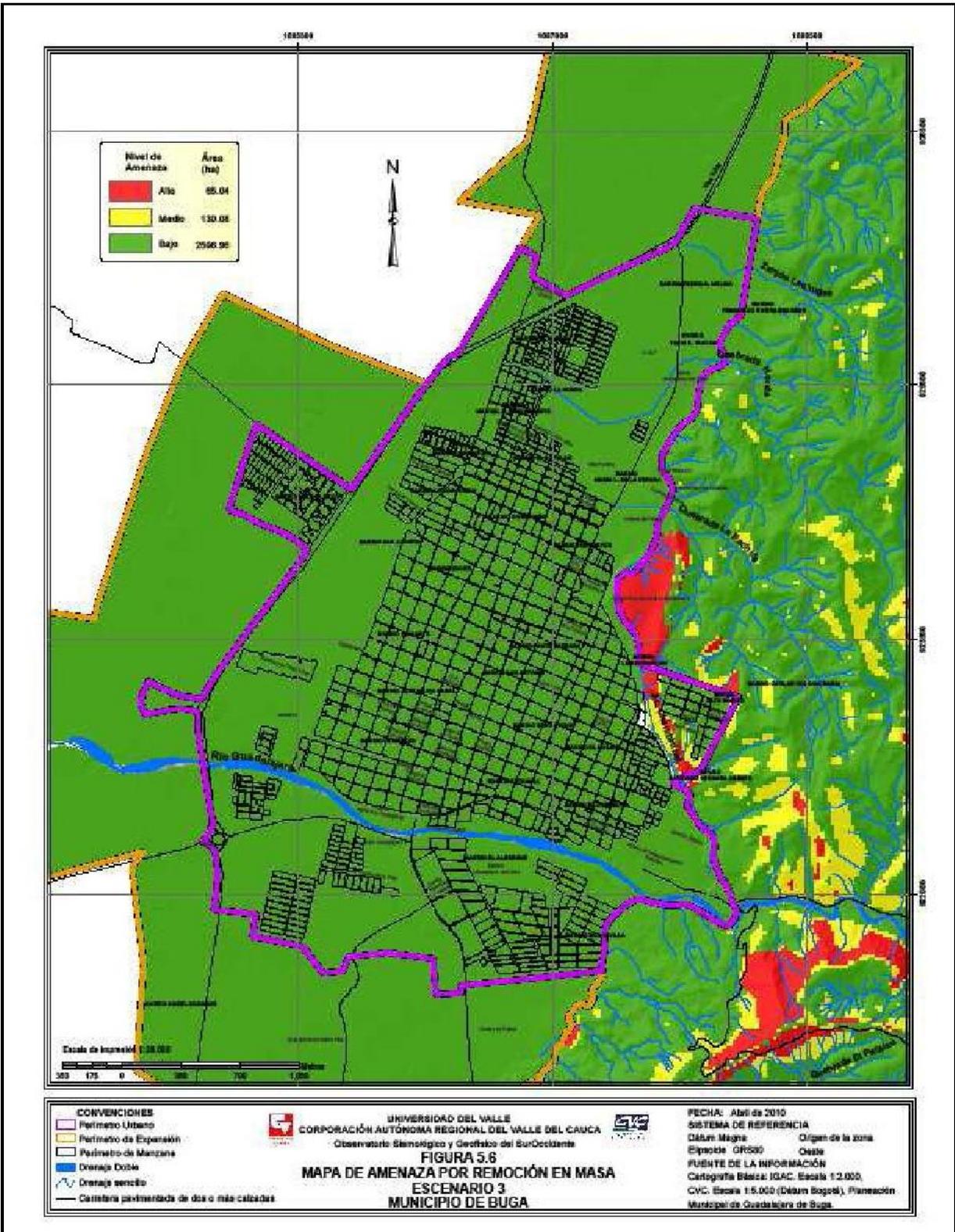


Figura 3.5 Distribución porcentual de amenaza, escenario 3.



Teniendo en cuenta los resultados de los anteriores escenarios procederemos a destacar los principales aspectos de los niveles de amenaza, así como el significado para cada uno de los escenarios:

AMENAZA BAJA: Corresponde a los sectores donde en general el terreno es estable por fenómenos de remoción en masa ante agentes externos. Estas áreas corresponden a zonas planas, las de menor pendiente, urbanizadas y con una cobertura vegetal bastante importante. Estas zonas sin embargo, pueden ser propensas a fenómenos de inundación y flujos torrenciales, tal como se describió en el capítulo de hidráulica.

AMENAZA MEDIA: Estos sectores se caracterizan por presentar pendientes intermedias, y se encuentran ubicadas en la generalidad de los casos en el sector oriental del frente montañoso, donde el mecanismo de falla es de tipo traslacional. Estos sectores se caracterizan adicionalmente, por presentar una buena cobertura vegetal.

AMENAZA ALTA: Corresponden a sectores de pendientes medias a fuertes, caracterizadas por presentar un espesor importante de la capa de suelo. El mecanismo de falla predominante hacia la ladera del alto de la Cruz es de tipo rotacional, mientras que en el sector sur oriental hacia el sector del filo del Derrumbado se pueden desarrollar movimientos en masa de tipo traslacional. Estas zonas se caracterizan por la falla del talud, por efecto de algunos de los agentes externos previamente descritos o por la combinación de ellos.

4. BIBLIOGRAFÍA

4. BIBLIOGRAFÍA

DAHAL, R.K., HASEGAWA, S., YAMANAKA, M., NONOMURA. A., DHAKAL S., PAUDYAL P., 2008. Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology* 102, 496 -150.

FELL, R., COROMINAS, J., BONNARD, C., CASCINI, L., LEROI, E., SAVAGE, W. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning - On behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. *Engineering Geology* 10 (3-4), 99-111.

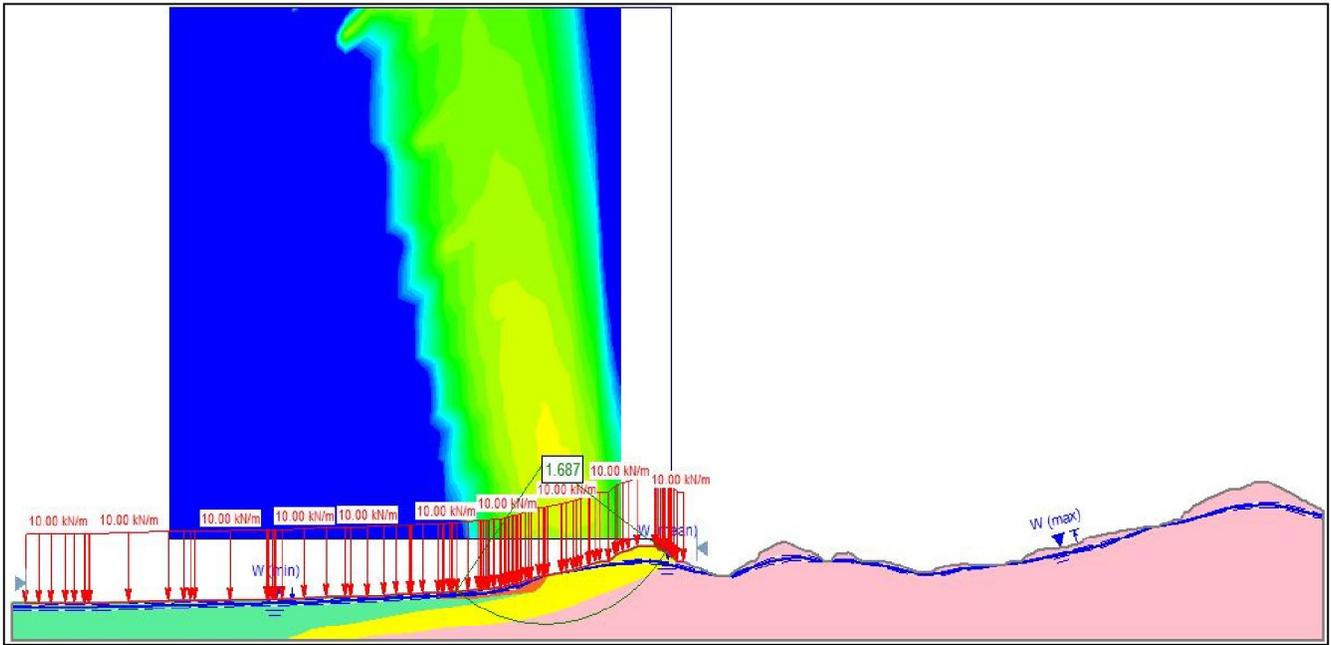
NEUHAUSER, B., TERHORST, G., 2007. Landslides susceptibility assessment using weights of evidence applied to study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany), *Geomorphology* 86, 12-24.

5. ANEXOS

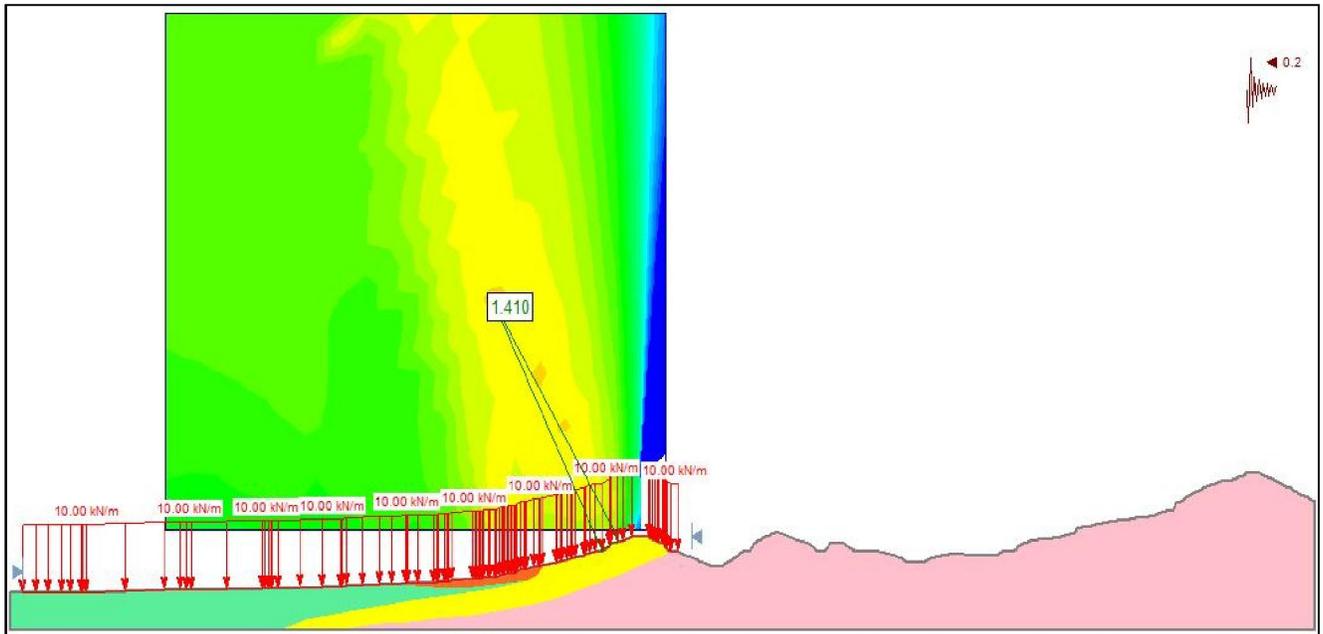
Anexo 1: Análisis por secciones falla rotacional

PERFIL B-B'

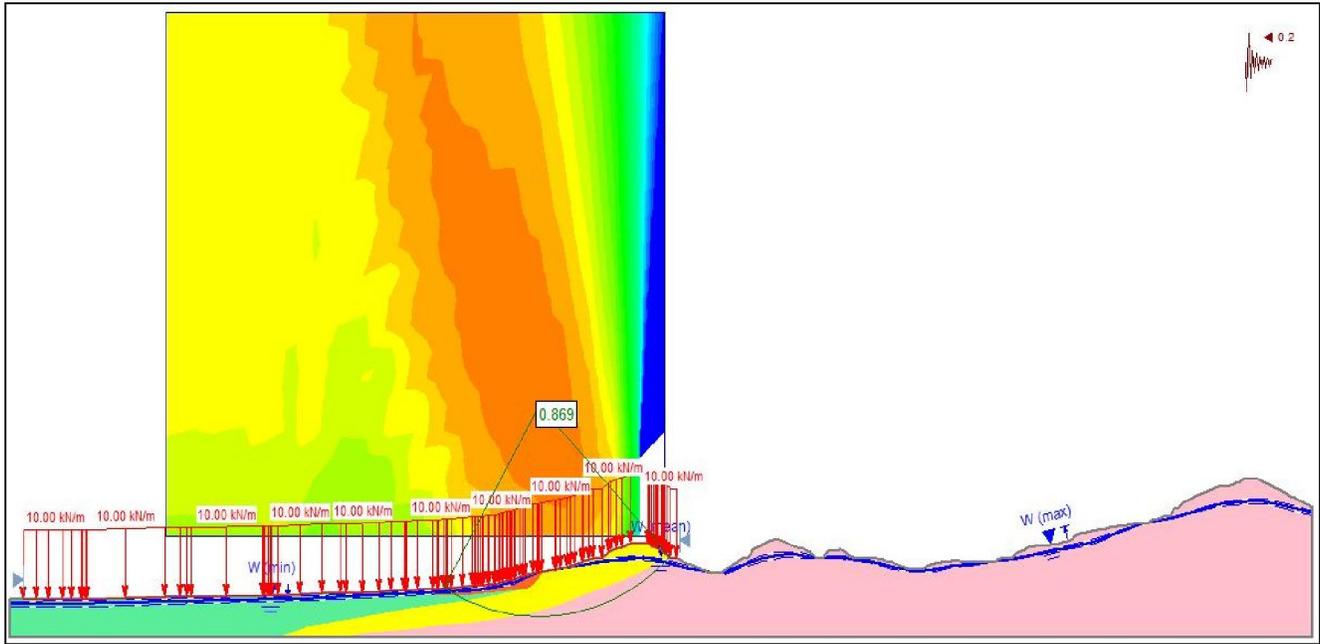
ESCENARIO 1



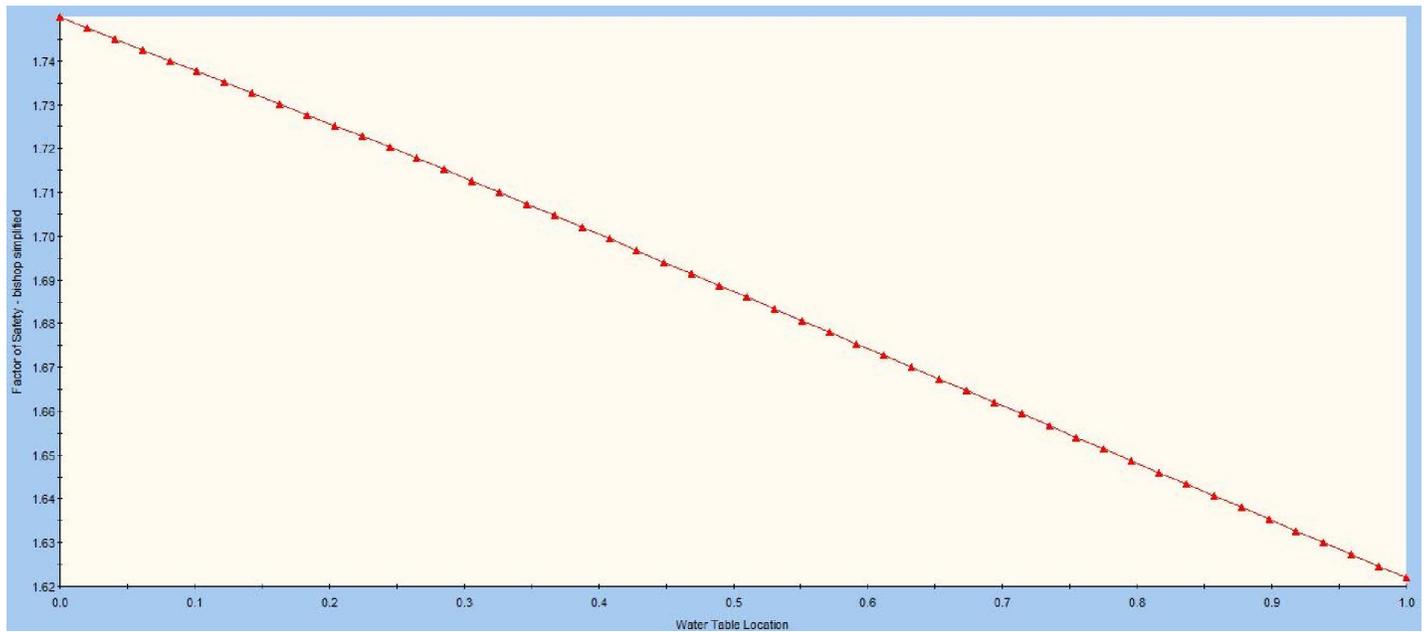
ESCENARIO 2



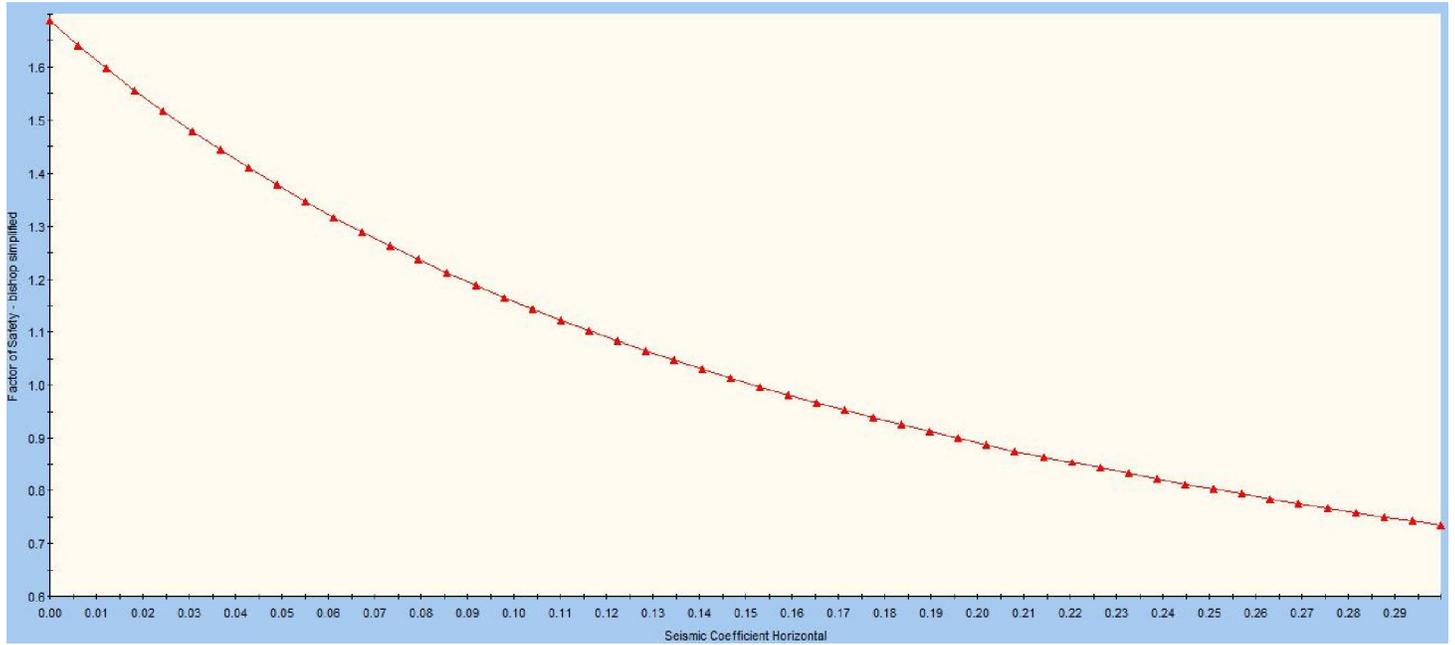
ESCENARIO 3



ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE NIVEL FREATICO

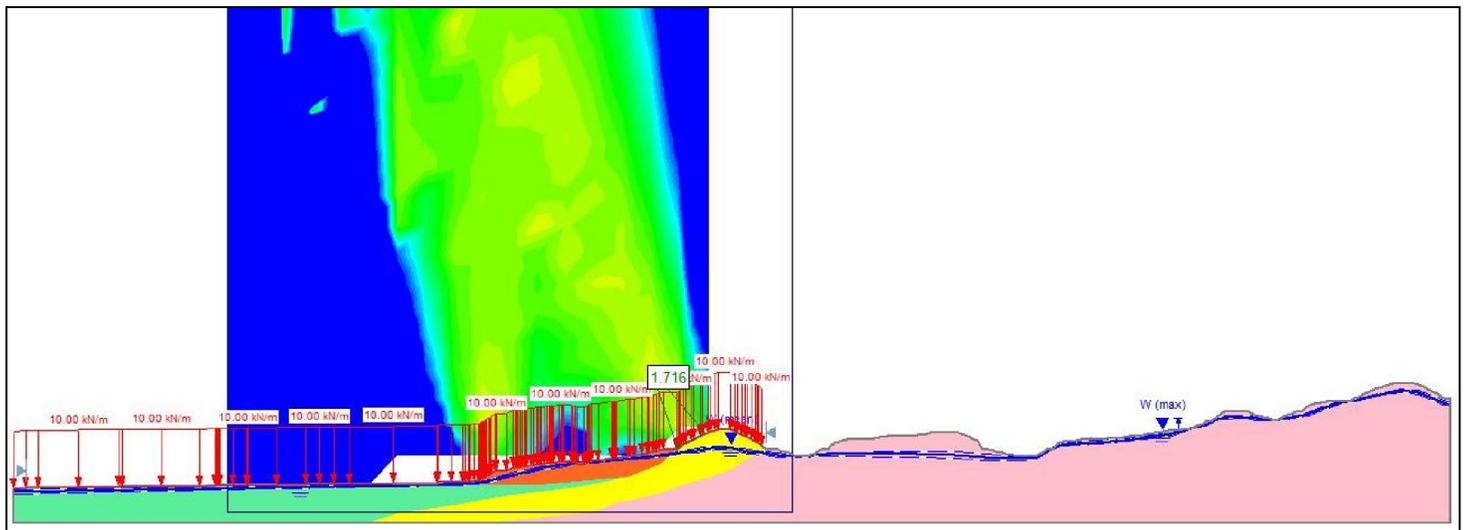


ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE A_a

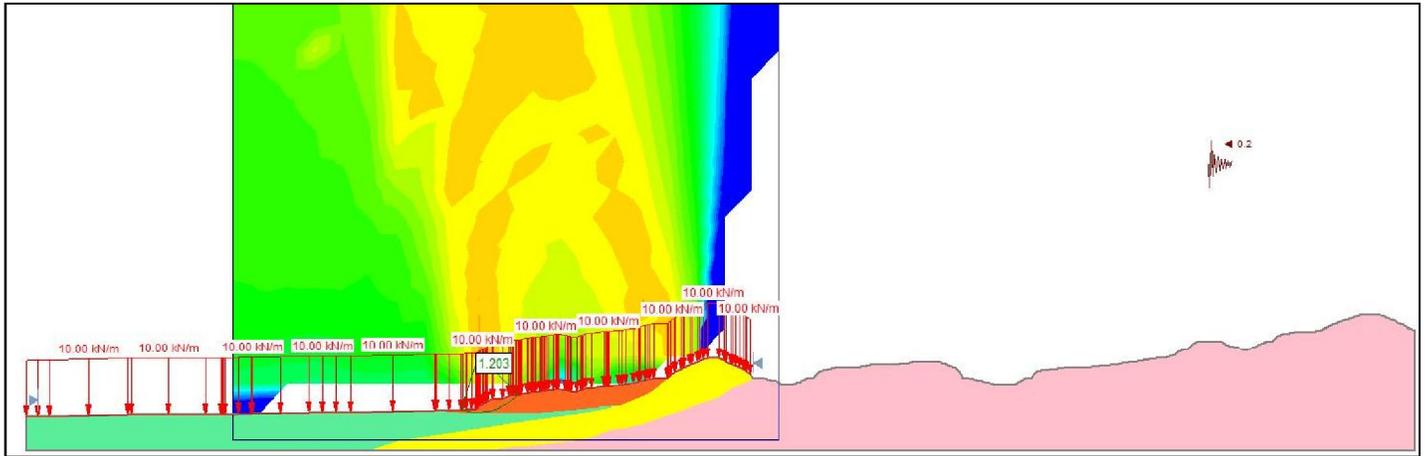


PERFIL C-C'

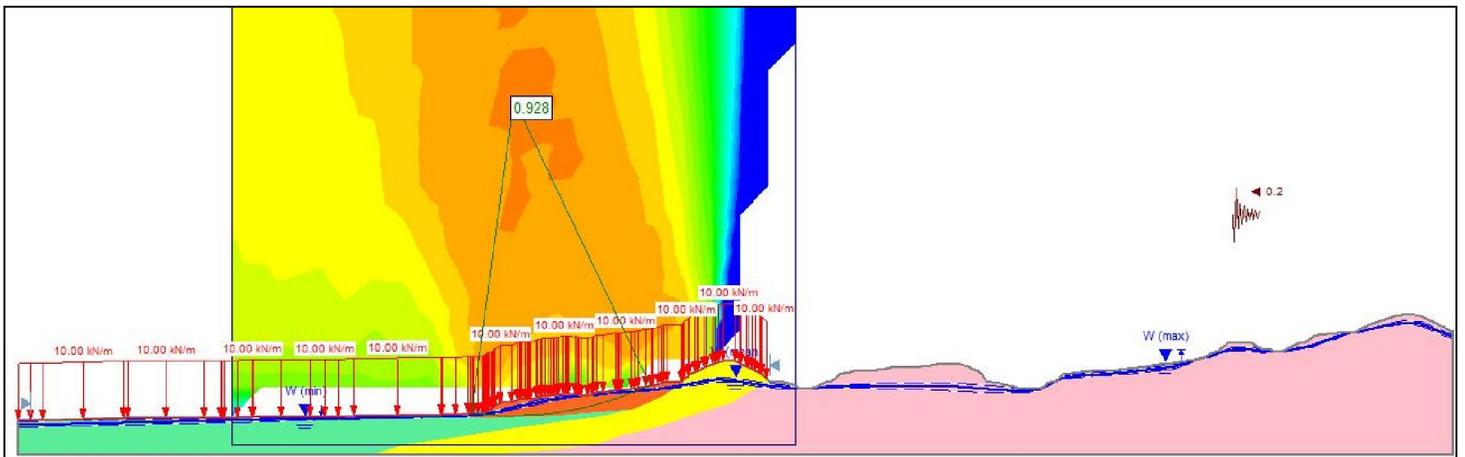
ESCENARIO 1



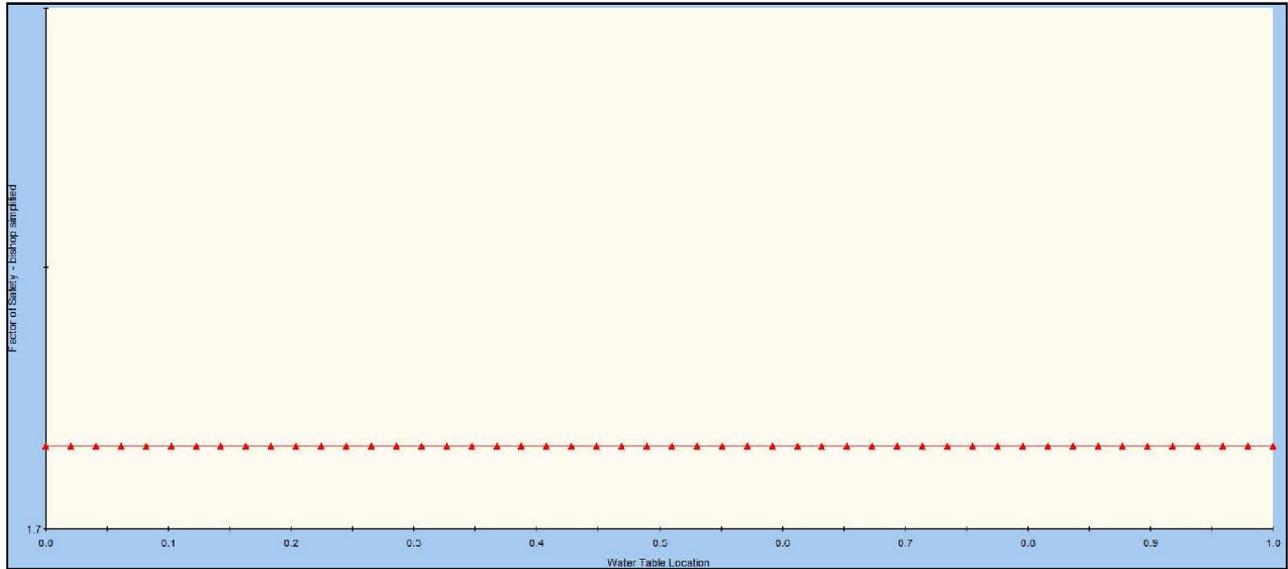
ESCENARIO 2



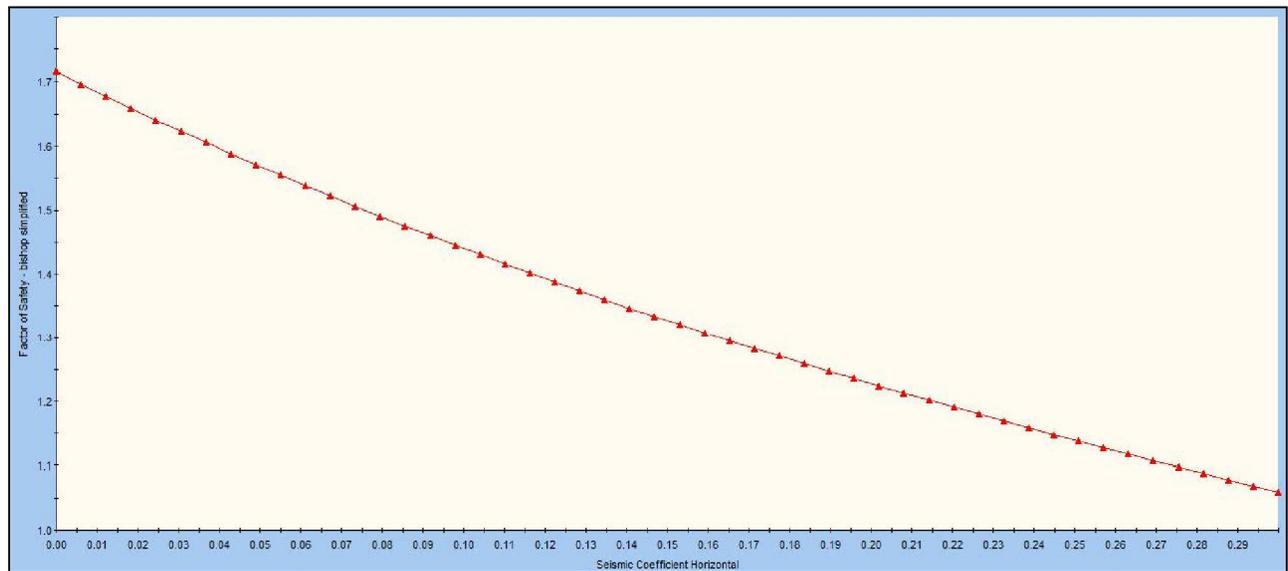
ESCENARIO 3



ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE NIVEL FREATICO

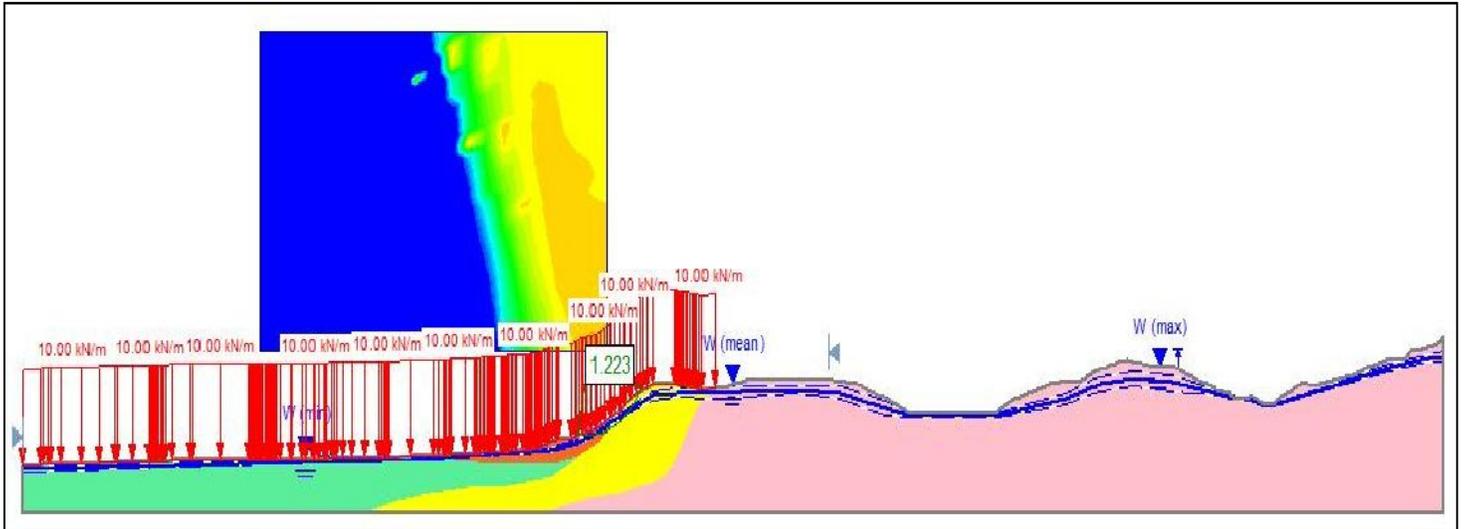


ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE A_a

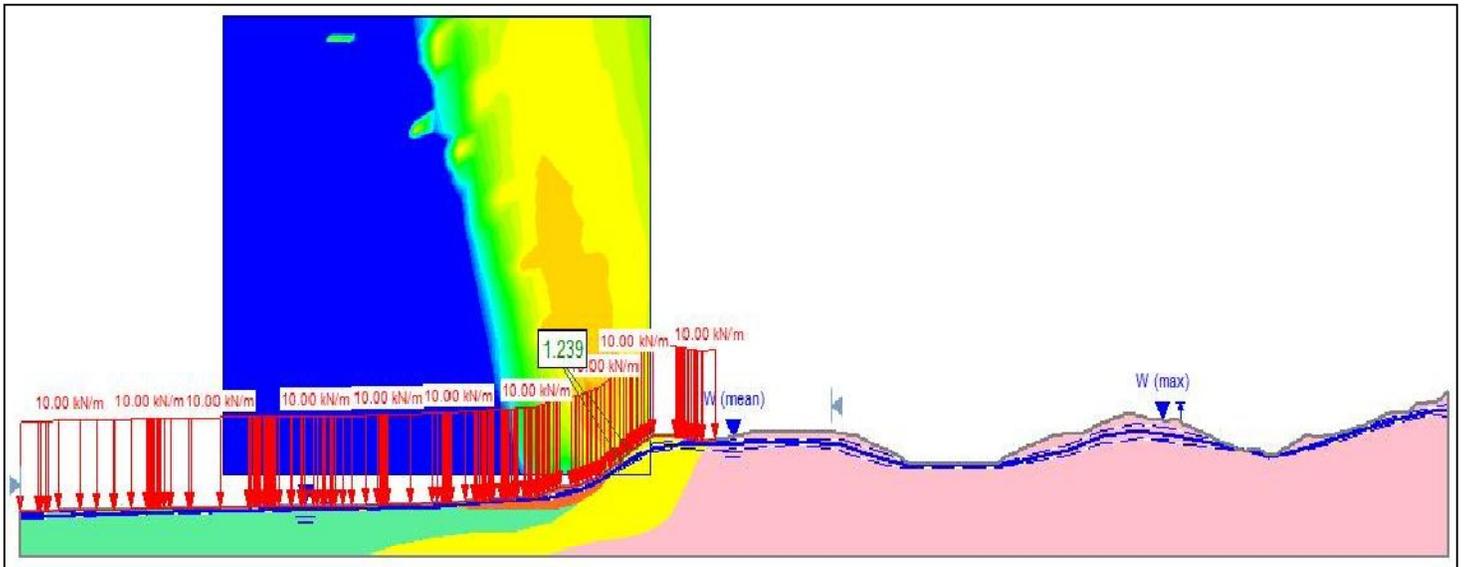


PERFIL F-F'

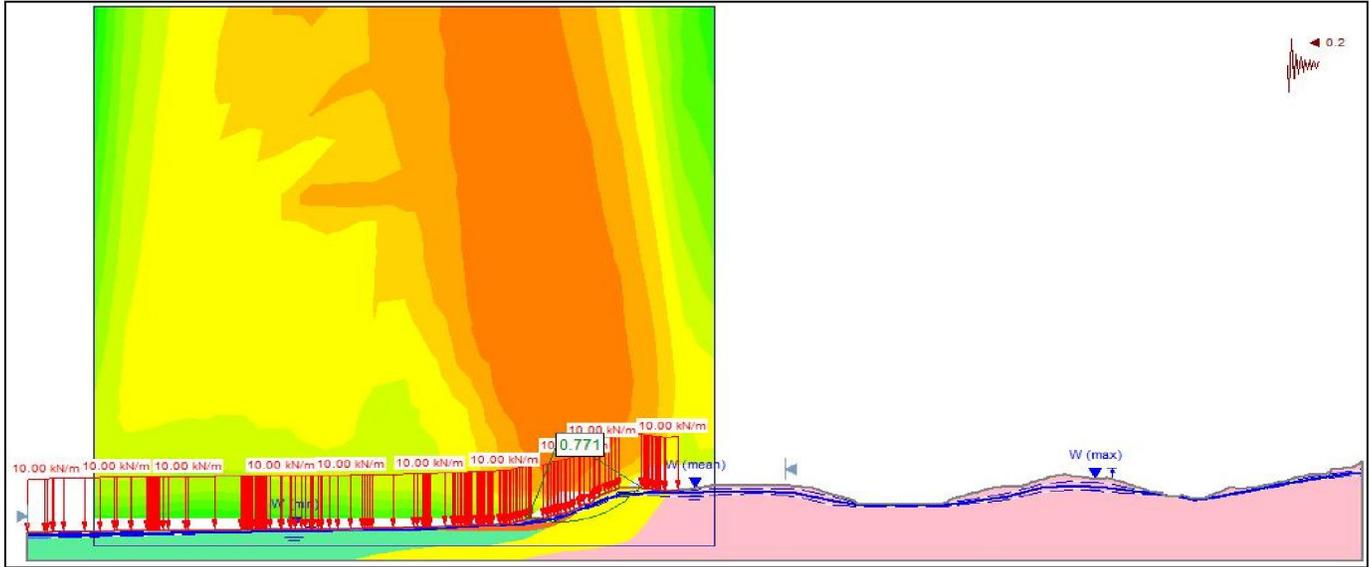
ESCENARIO 1



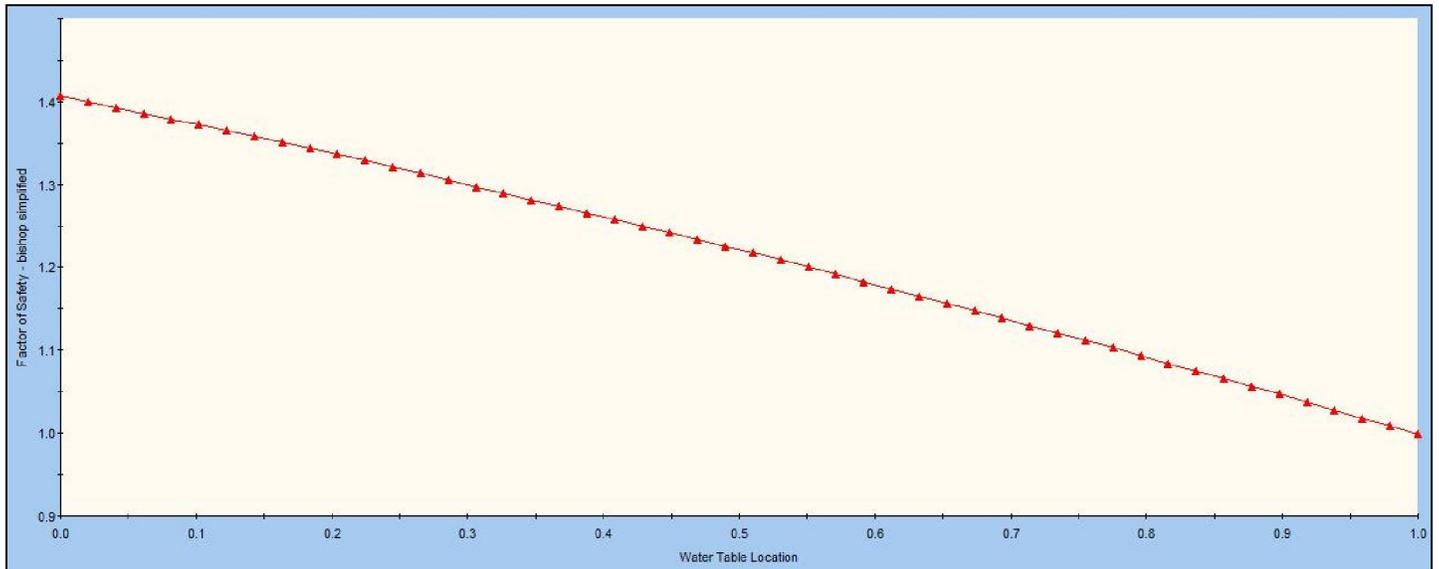
ESCENARIO 2



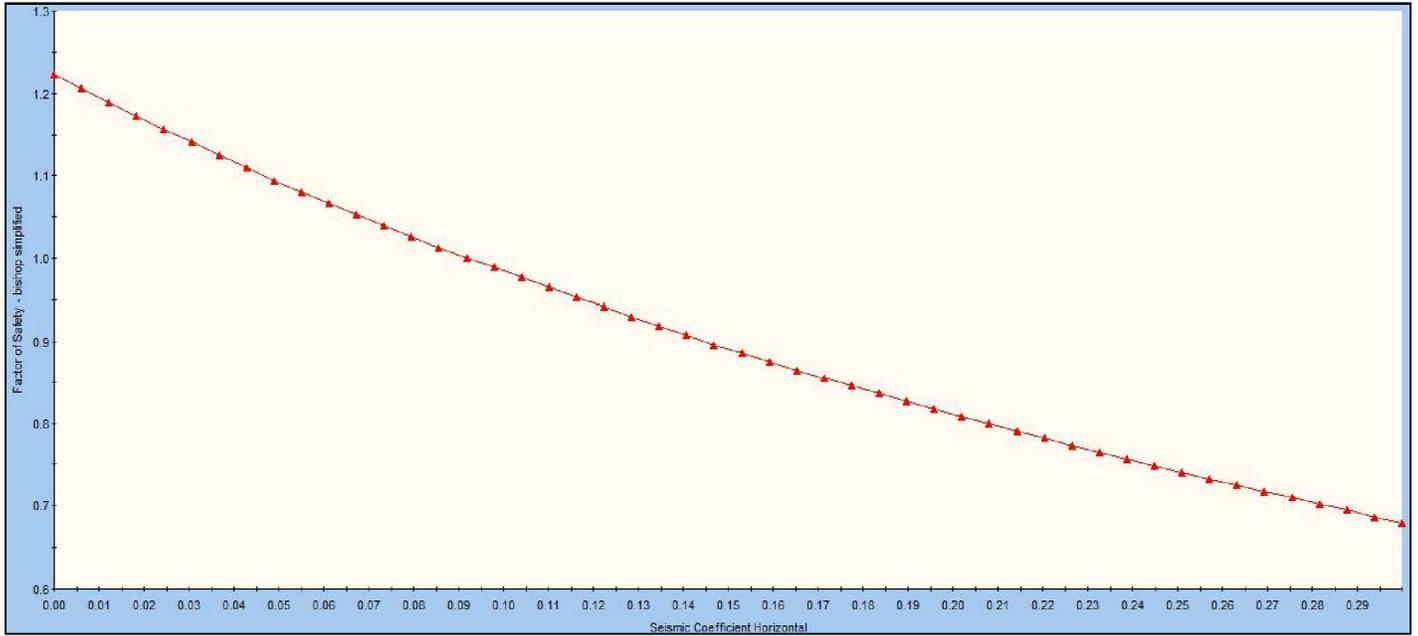
ESCENARIO 3



ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE NIVEL FREATICO

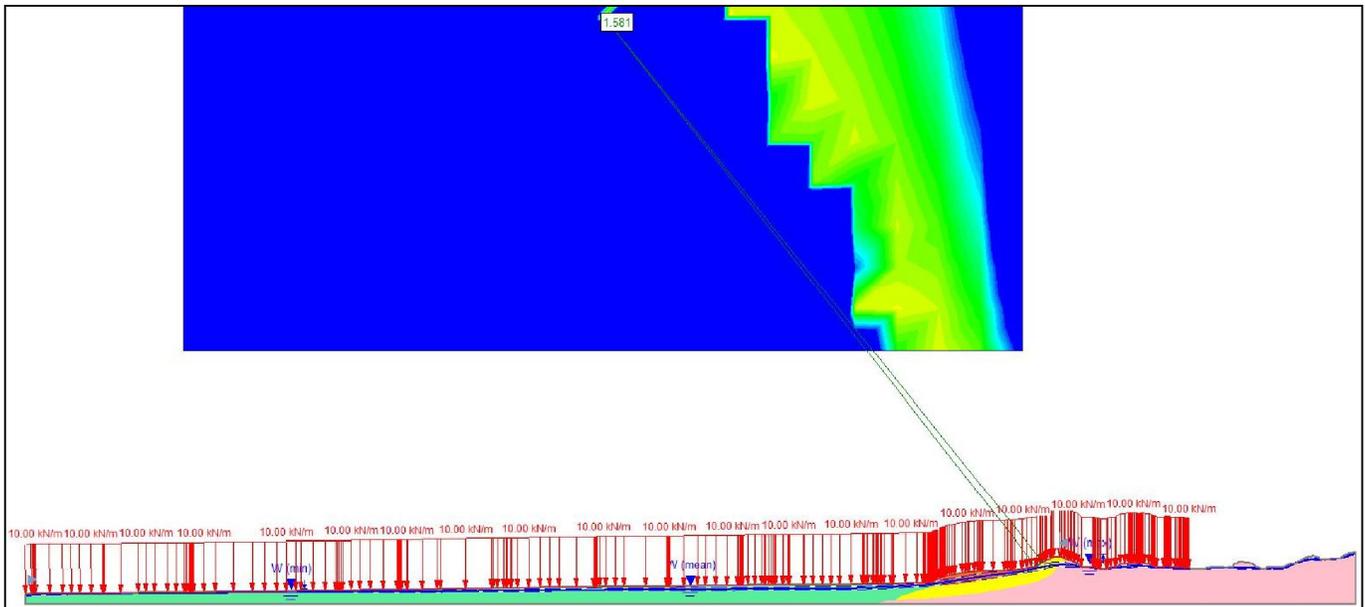


ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE Aa

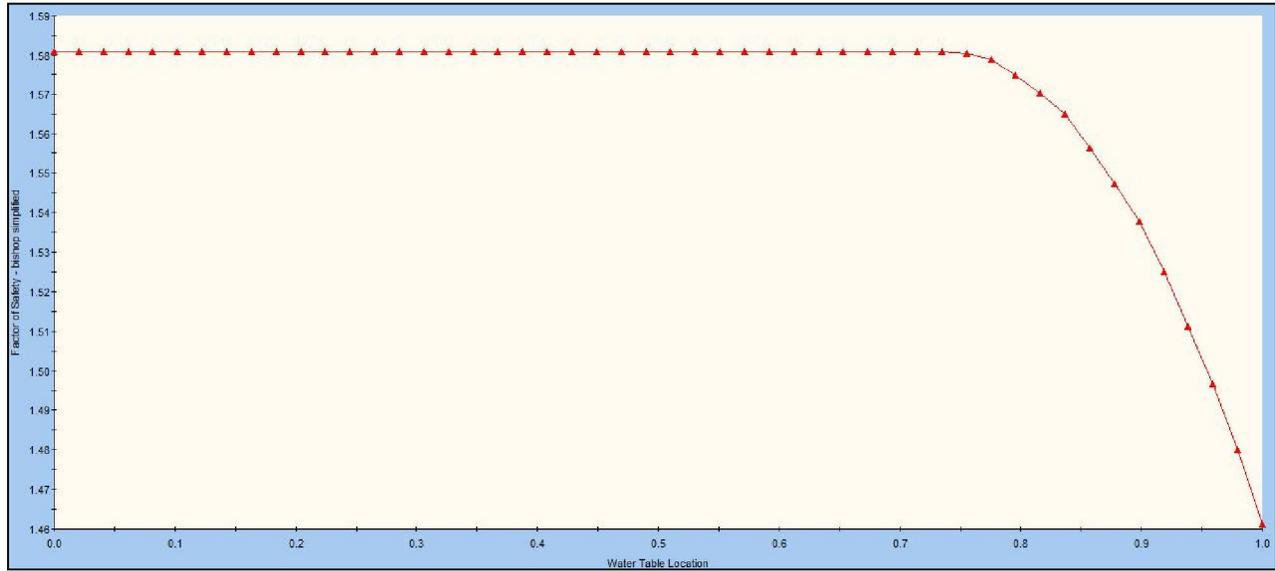


PERFIL G-G'

ESCENARIO 1



ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE NIVEL FREATICO



ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE Aa

