



## **CONTRATO INTERADMINISTRATIVO CVC – UNIVALLE 188 DE 2008**

### **PROYECTO:**

**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**

**- M I D A S -**

**INFORME AMENAZAS POR REMOCIÓN  
EN MASA PARA EL MUNICIPIO DE  
EL CAIRO**

**SUPERVISIÓN A CARGO DE  
HIDROOCCIDENTE**

**Santiago de Cali, Marzo de 2010**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA</b>	<b>5</b>
<b>1.1. TÉCNICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD</b>	<b>5</b>
1.1.1. Método Bivariado	5
<b>1.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES</b>	<b>8</b>
1.2.1. Pendiente (PEND)	9
1.2.2. Curvatura (CURVAR)	11
1.2.3. Orientación de la ladera (ORIENTACIÓN)	13
1.2.4. Usos del Suelo (USO)	15
1.2.5. Cuenca Acumulada (ACUENCA)	17
<b>1.3. ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD</b>	<b>19</b>
<b>2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA</b>	<b>24</b>
<b>2.1. ASPECTOS METODOLOGICOS GENERALES</b>	<b>25</b>
<b>2.2. MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO</b>	<b>26</b>
<b>2.3. DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES EN PROFUNDIDAD</b>	<b>28</b>
<b>2.4. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN</b>	<b>30</b>
<b>2.5. MECANISMOS DE FALLA MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE</b>	<b>30</b>
2.5.1. Falla Planar en Talud Infinito	30
2.5.2. Falla Rotacional	31
<b>3. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR ESCENARIOS</b>	<b>41</b>
<b>3.1. FUERZA SÍSMICA</b>	<b>41</b>
3.1.1. Escenario 1. Talud parcialmente Saturado sin Sismo	42
3.1.2. Escenario 2. Talud seco con Sismo	44
3.1.3. Escenario 3. Talud parcialmente saturado con Sismo	46

## CONTENIDO DE TABLAS

<i>Tabla 1.1. Categorización de la variable PEND.</i>	11
<i>Tabla 1.2. Categorización de la variable CURVAR.</i>	11
<i>Tabla 1.3. Categorías de la variable ASPECTO.</i>	13
<i>Tabla 1.4. Categorías de la variable USO.</i>	15
<i>Tabla 1.5. Categorización de la variable ACUENCA</i>	17
<i>Tabla 2.1. Parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos.</i>	30
<i>Tabla 3.1. Escenarios de análisis para la estimación de factores de seguridad.</i>	41
<i>Tabla 3.2. Rangos del Factor de Seguridad para definir el nivel de amenaza.</i>	42

## CONTENIDO DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Diagrama de flujo general del método estadístico bivariado (Van Westen, 1996).</i>	7
<i>Figura 1.2 Mapa de pendientes municipio de El Cairo.</i>	10
<i>Figura 1.3 Mapa de curvatura municipio de El Cairo.</i>	12
<i>Figura 1.4. Mapa de aspecto municipio de El Cairo.</i>	14
<i>Figura 1.5 Mapa de usos del suelo municipio de El Cairo.</i>	16
<i>Figura 1.6 Mapa de cuenca acumulada municipio de El Cairo.</i>	18
<i>Figura 1.7 Mapa de índice de susceptibilidad para el municipio de El Cairo.</i>	21
<i>Figura 1.8 Distribución porcentual de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa.</i>	22
<i>Figura 2.1 Esquema metodológico general. Evaluación de la amenaza por movimientos en masa.</i>	25
<i>Figura 2.2 Localización en planta de secciones en estudio.</i>	27
<i>Figura 2.3 Localización de ensayos de campo realizados en el municipio de El Cairo.</i>	28
<i>Figura 2.4 Perfil geotécnico típico de la zona de estudio.</i>	29
<i>Figura 2.5 Perfil geológico geotécnico.</i>	29
<i>Figura 2.6 Análisis de equilibrio límite, sección E-E', para talud parcialmente saturado sin sismo.</i>	33
<i>Figura 2.7 Análisis de equilibrio límite, sección E-E' para talud seco y sismo de 0.2g.</i>	34
<i>Figura 2.8 Análisis de equilibrio límite, sección E-E' con sismo y talud parcialmente saturado.</i>	35
<i>Figura 2.9 Análisis de sensibilidad del nivel freático en la estabilidad de la ladera sección E-E'.</i>	35
<i>Figura 2.10 Análisis de estabilidad para la condición sin sismo y talud parcialmente saturado.</i>	37
<i>Figura 2.11 Análisis de estabilidad para la condición seca con sismo.</i>	38
<i>Figura 2.12 Análisis de estabilidad para condición con sismo y talud parcialmente saturado.</i>	39
<i>Figura 3.1 Mapa de amenaza escenario 1.</i>	43
<i>Figura 3.2 Distribución porcentual de amenaza, escenario 1.</i>	44
<i>Figura 3.3 Mapa de amenaza escenario 2.</i>	45
<i>Figura 3.4 Distribución porcentual de amenaza, escenario 2.</i>	46
<i>Figura 3.5 Distribución porcentual de amenaza, escenario 3.</i>	46
<i>Figura 3.6 Mapa de amenaza, escenario 3.</i>	47

# **1. EVALUACIÓN DE LA 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 1.1), 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:

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

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 movimientos ocurrirá en el caso de presencia de factores causantes y en el caso de ausencia de éstos:

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

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):

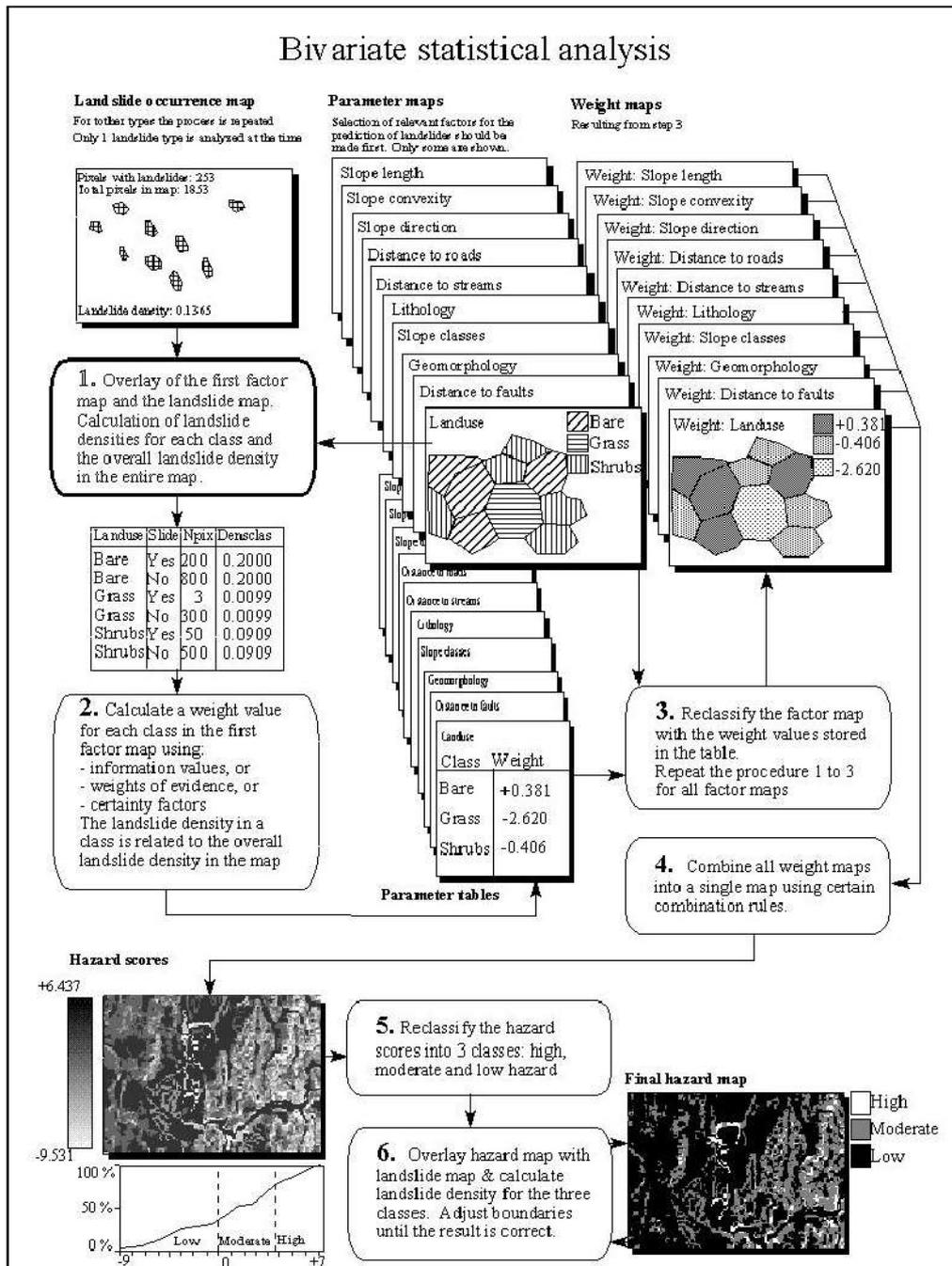


Figura 1.1 Diagrama de flujo general del método estadístico bivariado (Van Westen, 1996).

$$W_j^+ = \frac{\frac{Np_j^{x_1}}{Np_j^{x_1} + Np_j^{x_2}}}{\frac{Np_j^{x_3}}{Np_j^{x_3} + Np_j^{x_4}}} \quad (4)$$

$$W_j^- = \frac{\frac{Np_j^{x_2}}{Np_j^{x_1} + Np_j^{x_2}}}{\frac{Np_j^{x_4}}{Np_j^{x_3} + Np_j^{x_4}}} \quad (5)$$

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:  $W_f = W^+ - W^-$  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:

$$LSI = \sum W f_j$$

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.

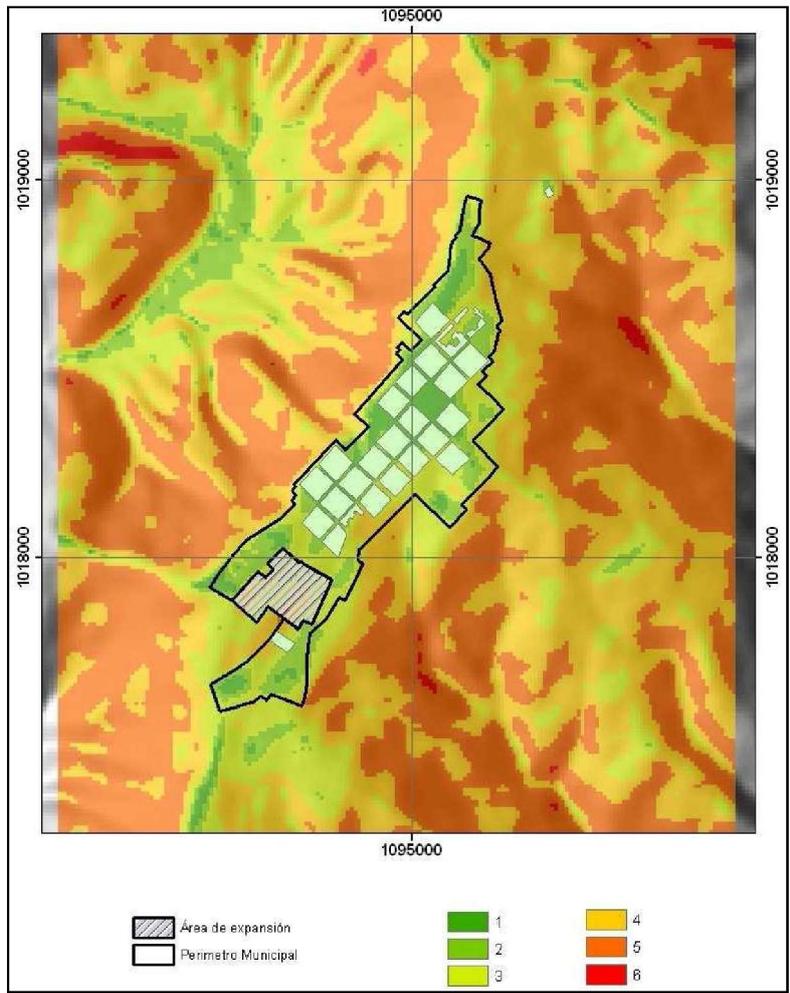
#### ✓ **Modelo Digital de Elevación (MDE)**

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, obteniendo un total de 37996 pixeles.

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. Para el municipio de El Cairo, la variable pendiente (Ver Figura 1.2) se agrupa en los rangos presentados en la Tabla 1.1. En dicha figura se observa que las laderas que rodean el municipio de El Cairo presentan pendientes que fluctúan entre 20° y 45°, siendo el sector más empinado el ubicado en el costado occidental del municipio. Estas fuertes pendientes por otro lado, están asociadas a antiguos deslizamientos, tal como se desprende del mapa geológico.



*Figura 1.2* Mapa de pendientes municipio de El Cairo.

**Tabla 1.1.** Categorización de la variable PEND.

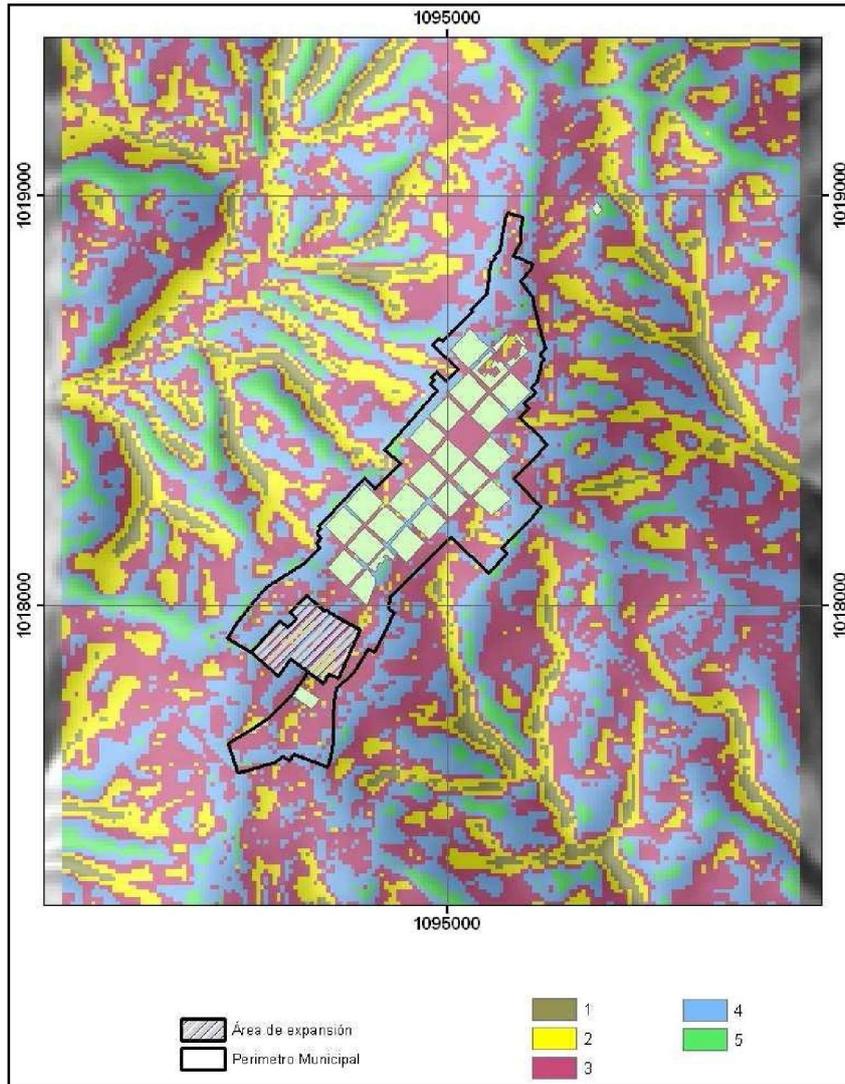
<b>Clases</b>	<b>Rango (°)</b>
1	0 – 5
2	5 – 10
3	10 – 20
4	20 – 30
5	30 – 45
6	> 45

### **9.2.2. 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. En la Tabla 1.2 se presentan las categorías de esta variable. En la Figura 1.3 se observa que las zonas cóncavas están asociadas a las corrientes de agua o a depresiones que presenta el terreno como consecuencias de hundimientos de antiguos deslizamientos.

**Tabla 1.2.** Categorización de la variable CURVAR.

<b>Clases</b>	<b>Descripción</b>
1	Muy cóncavo: -11.6156 - - 2.4893
2	Cóncavo: -2.4896 - -0.79933
3	Plano: -0.7993 – 0.44
4	Convexo: 0.44 – 1.792
5	Muy convexo: 1.792 – 17.1151



*Figura 1.3* Mapa de curvatura municipio de El Cairo.

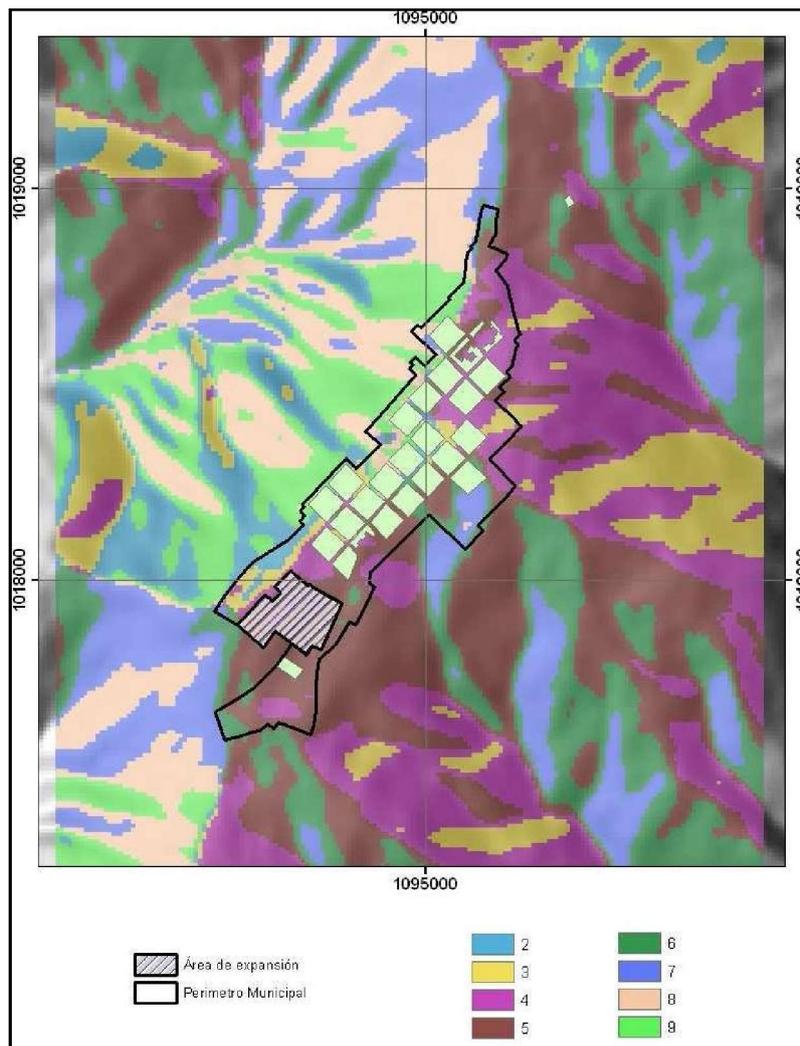
### 9.2.3. Orientación de la ladera (ORIENTACIÓN)

Variación, 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. En la Tabla 1.3 se presentan las categorías de esta variable.

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).

**Tabla 1.3.** Categorías de la variable ASPECTO.

<b>Clases</b>	<b>Descripción</b>
2	N: 337.5° - 22.5°
3	NE: 22.5° - 67.5°
4	E: 67.5° - 112.5°
5	SE: 112.5° - 157.5°
6	S: 157.5° - 202.5°
7	SW: 202.5° - 247.5°
8	W: 247.5° - 292.5°
9	NW: 292.5° - 337.5°



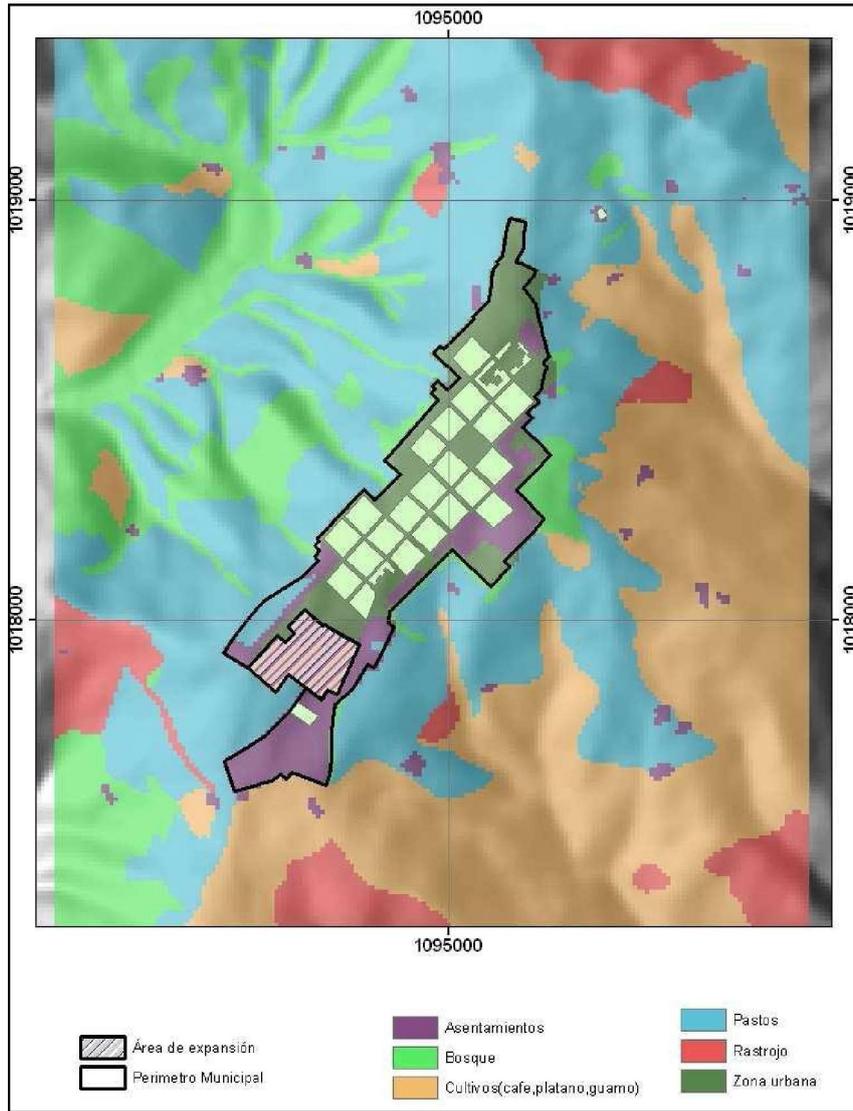
*Figura 1.4.* Mapa de aspecto municipio de El Cairo.

#### 1.2.4. Usos del Suelo (USO)

Representa la vegetación o cobertura vegetal del área de estudio, y el uso actual del suelo. Las categorías utilizadas en esta variable son presentadas en la Tabla 1.4. 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 y uso del suelo utilizado para la obtención del mapa de susceptibilidad. Nótese que las zonas de pastos están asociadas a los deslizamientos, es decir las zonas de mayor actividad antrópica, son las que presentan mayores problemas de inestabilidad.

*Tabla 1.4.* Categorías de la variable USO.

<b>Clase</b>	<b>Descripción</b>
1	Rastrojo
2	Cultivos
3	Pastos
4	Bosque
5	Asentamientos
6	Zona Urbana



*Figura 1.5* Mapa de usos del suelo municipio de El Cairo.

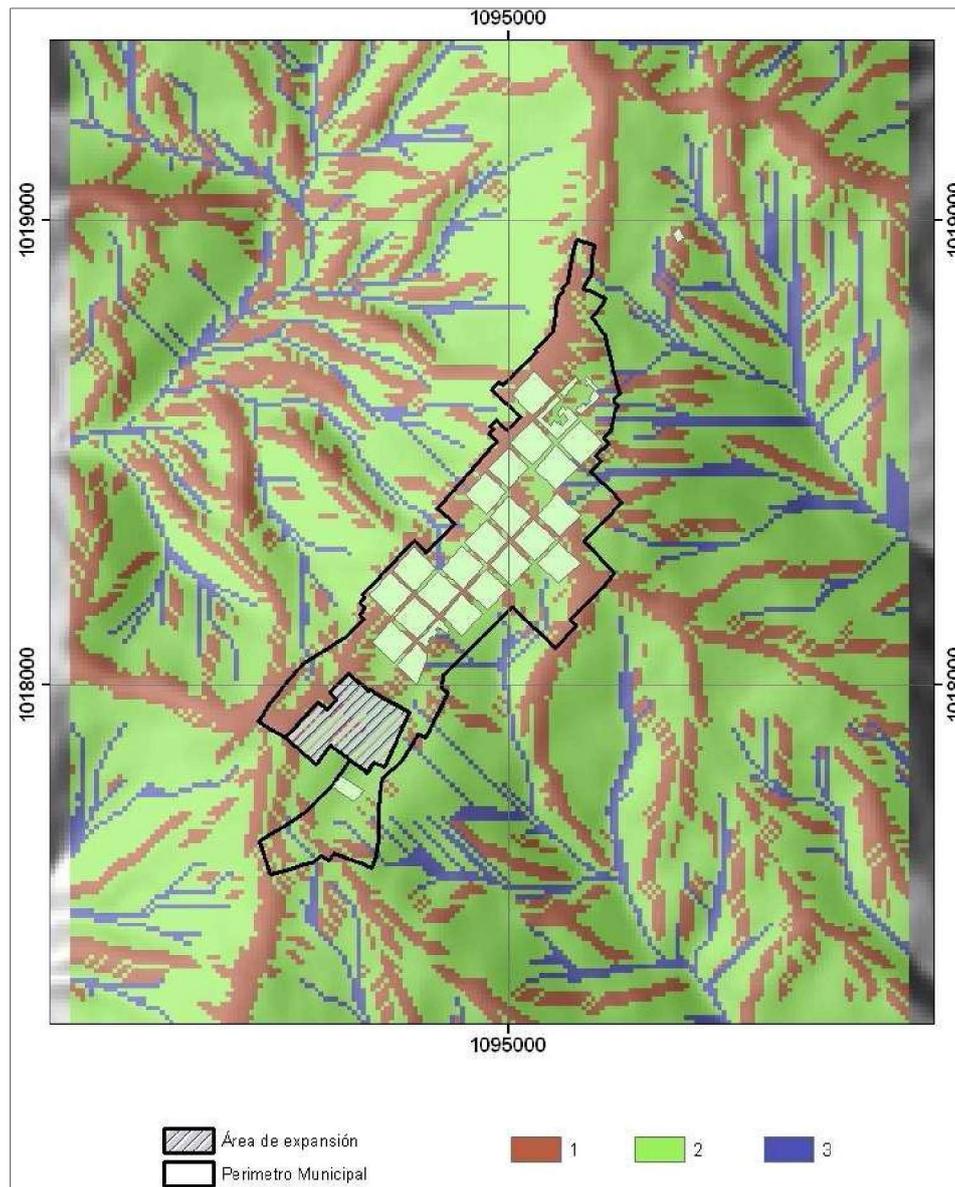
### 1.2.5. Cuenca Acumulada (ACUENCA)

Esta variable es generada como un raster a partir del MDE, acumulando el peso para todas los píxeles que fluyan en cada píxel de altura más baja. Los valores de menor a mayor valor, indican zonas de menor a mayor concentración de flujo, siendo los valores más altos los canales de drenaje. Para efectos de análisis se definieron 3 clases para esta variable, tal como se ilustra en la Tabla 1.5.

El área cuenca se relaciona con la cantidad de agua que es capaz de recoger e infiltrar en el terreno. A mayor superficie más agua infiltrada y más posibilidades de producir inestabilidad. Los resultados de estos análisis se ilustran en la Figura 1.6, destacándose el hecho de que además de las corrientes de agua existentes, se han generado una serie de canales a consecuencia de los movimientos de remoción en masa que se han generado sobre las laderas.

*Tabla 1.5.* Categorización de la variable ACUENCA

<b>Clases</b>	<b>Rangos</b>
1	Divisoria: 0 - 200
2	Vertientes: 200 - 3500
3	Corrientes: >3500



*Figura 1.6* Mapa de cuenca acumulada municipio de El Cairo.

### 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 1. Una vez obtenidos todos los factores  $Wf$ , se suman las variables para obtener el índice LSI según la siguiente expresión:

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

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)<sup>1</sup> del programa SIG ArcGIS, el cual 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 1.7 y Anexo 1.1):

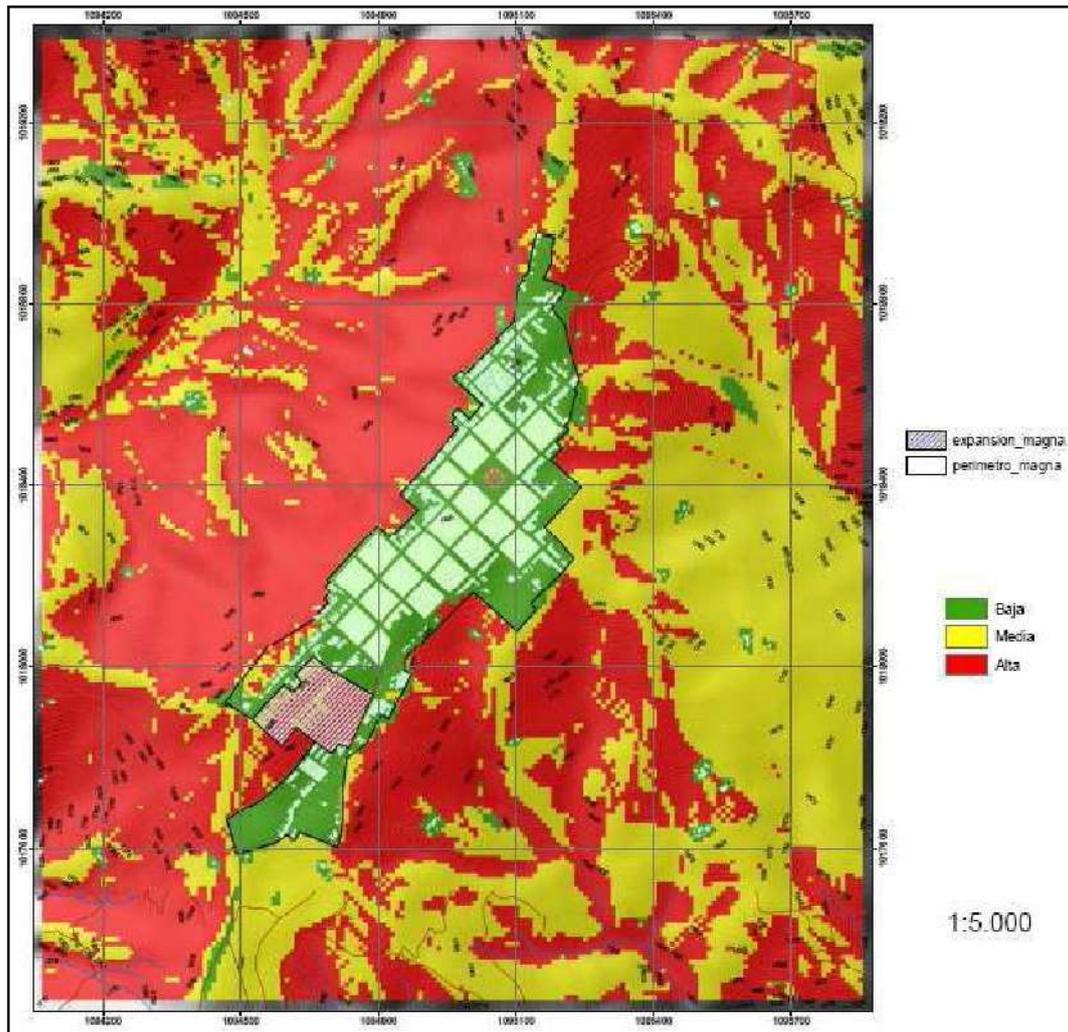
**SUSCEPTIBILIDAD ALTA:** Zonas con condiciones altamente favorables a la ocurrencia de procesos de inestabilidad asociados principalmente con las características litológicas del material aflorante en la zona, fuertes pendientes y sectores de cultivos limpios (pastos especialmente). Es importante destacar que el material es altamente permeable, lo cual facilita la infiltración del agua de escorrentía, tal como se desprende de los ensayos de infiltración. En general las zonas de alta susceptibilidad se ubican en las laderas que rodean el municipio del Cairo, tal como se observa en la Figura 1.7. Nótese que el área urbana y de expansión de El Cairo, posee baja susceptibilidad a los movimientos en masa, pero la zona de alta susceptibilidad se encuentra muy próxima a ésta, correspondiente al sector noroccidente del municipio, donde las pendientes de ladera son muy altas. Desafortunadamente, el casco urbano se puede ver afectado por deslizamientos que se presenten en las laderas del mismo, afectando las viviendas ubicadas en el perímetro urbano del municipio. Estos resultados se notarán más claramente cuando se proceda a evaluar la amenaza. Finalmente, se destaca el hecho que hacia la parte suroriental, aunque en menor proporción, también se presenta el mismo fenómeno. Finalmente, en la Figura 1.8, se presenta la distribución de la susceptibilidad en el área de estudio. Nótese que la alta susceptibilidad abarca una proporción importante dentro de la zona de estudio (52.53%).

---

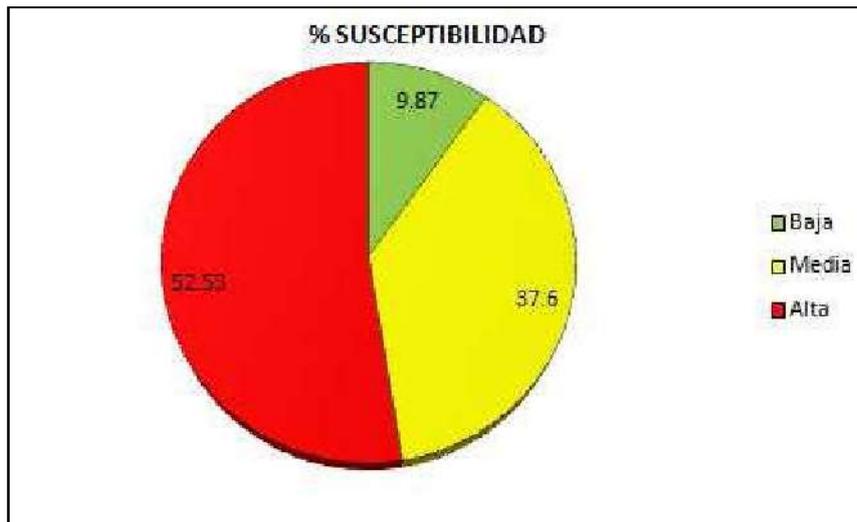
<sup>1</sup> <http://webhelp.esri.com>

**SUSCEPTIBILIDAD MEDIA:** Las zonas de susceptibilidad media están asociadas a sectores cuyas pendientes fluctúan entre  $10^0$  y  $30^0$ . Se caracterizan por presentar cultivos intermedios tipo café, plátano y guamo. Se caracteriza adicionalmente porque la geoforma del terreno no permite fácilmente la infiltración del agua de escorrentía proveniente de las lluvias. Finalmente se caracteriza por presentar pocos cursos de agua que faciliten los procesos erosivos y de socavación.

**SUSCEPTIBILIDAD BAJA:** Zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad. Están restringidas casi exclusivamente a las áreas de bosques, en las que la intervención o modificación de las condiciones naturales por cuenta del hombre es muy baja. Se caracteriza por presentar pendientes comprendidas entre  $1^0$  y  $10^0$  grados. Finalmente, es importante destacar el hecho que el casco urbano del municipio se encuentra ubicado en una planicie, razón por la cual se obtiene que el terreno presenta una susceptibilidad baja. Sin embargo, estos resultados es necesarios mirarlos con precaución ya que la parte superior está expuesta a fenómenos de remoción en masa, dado el carácter retrogresivo de los deslizamientos que se han presentados en las laderas aledañas al casco urbano.



*Figura 1.7* Mapa de índice de susceptibilidad para el municipio de El Cairo.



*Figura 1.8* Distribución porcentual de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa.

## **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 depósitos), 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 catorce 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', SECCIÓN G-G', SECCIÓN H-H', SECCIÓN I-I', SECCIÓN J-J', SECCIÓN K-K', SECCIÓN L-L', SECCIÓN M-M' SECCIÓN N-N y SECCIÓN O-O', consideradas las secciones más críticas durante la fase de campo. La ubicación de estas secciones se ilustra en la Figura 2.2.

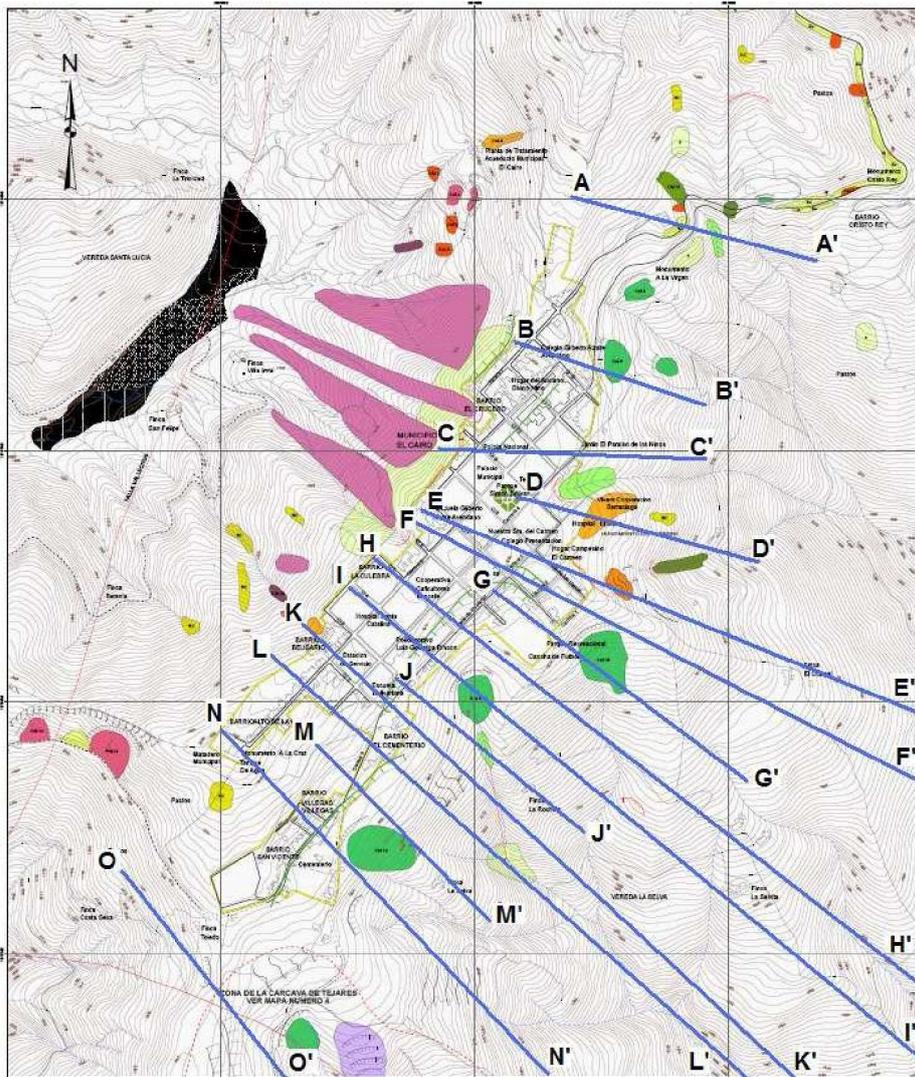
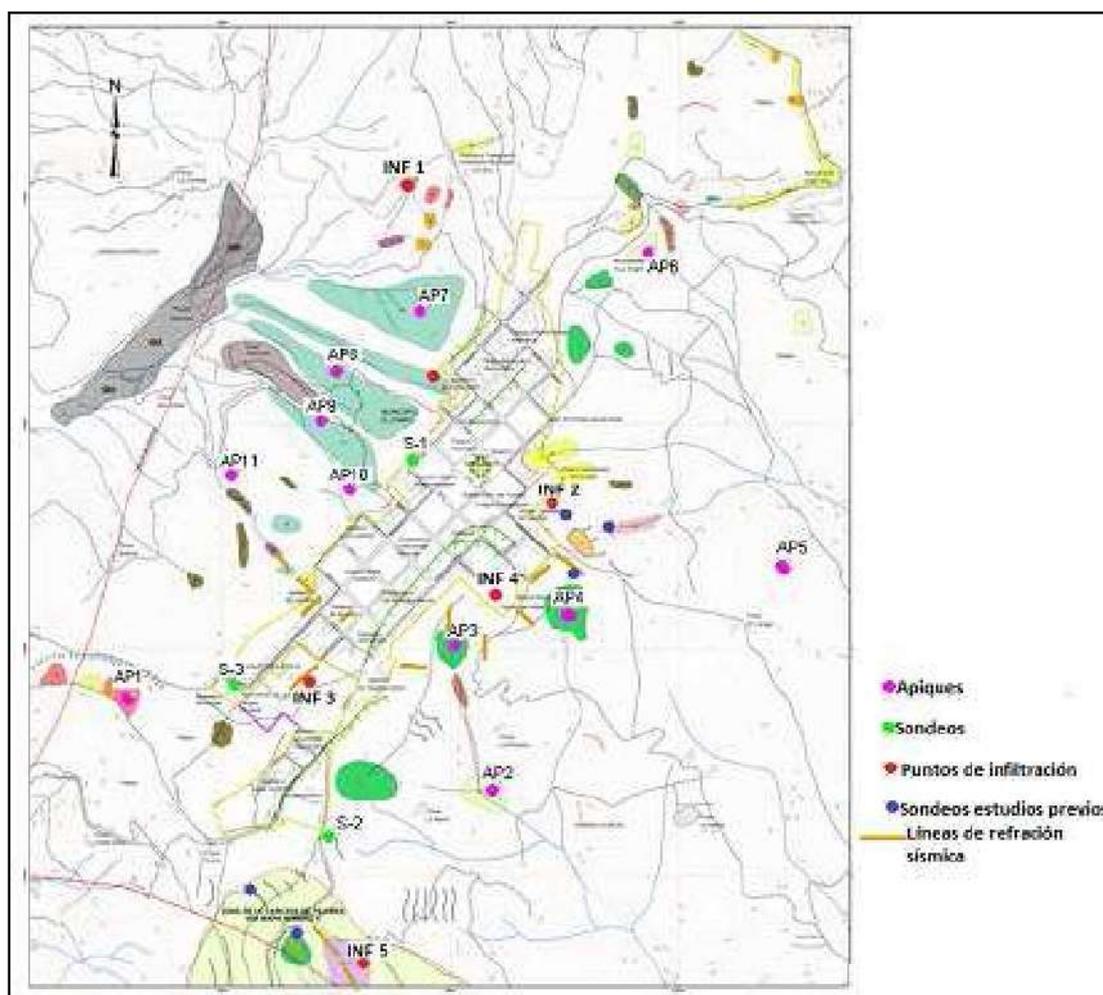


Figura 2.2 Localización en planta de secciones en estudio.

### 2.3. DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES EN PROFUNDIDAD

De acuerdo a la información obtenida del registro de perforación (S-1, S-2 y S-3), 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 cuenta con registros de perforaciones realizadas en estudios anteriores y de ensayos geofísicos e infiltraciones realizadas dentro del marco de éste estudio, la ubicación de estos puntos y de las líneas de refracción se pueden observar en la Figura 2.3.

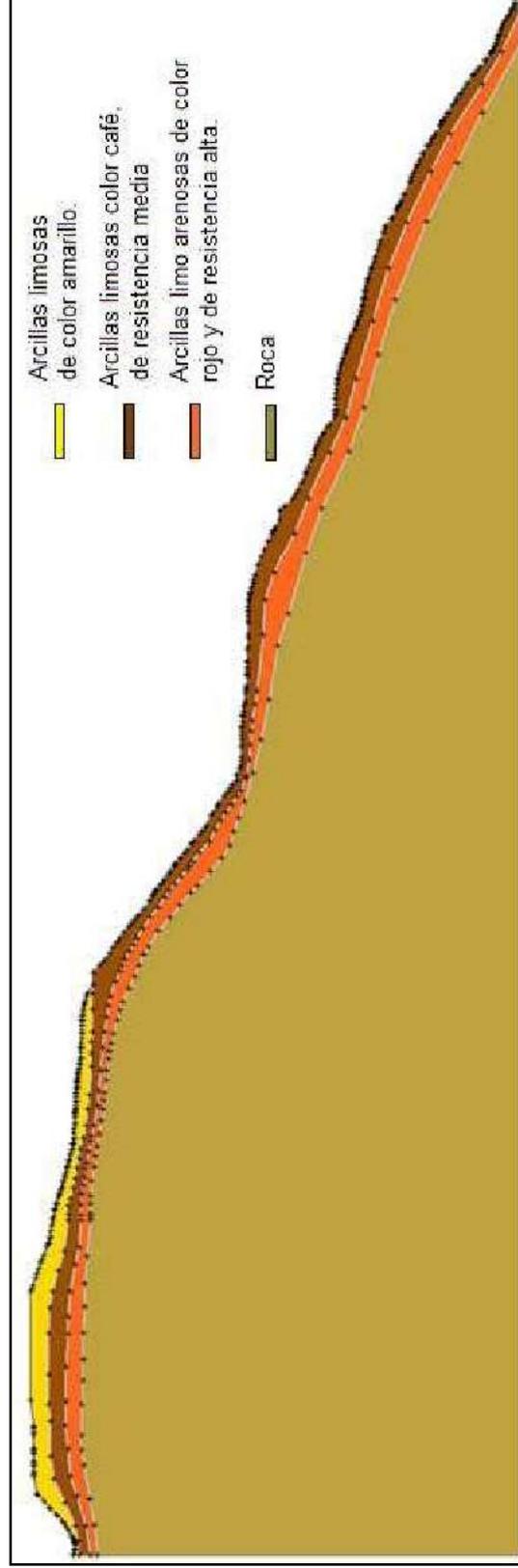


*Figura 2.3* Localización de ensayos de campo realizados en el municipio de El Cairo.

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 tres estratos, cuyo espesor variará de un sector a otro. Por otro lado, en la Figura 2.5, se presenta un perfil geológico geotécnico donde no solamente se presenta la distribución de los anteriores estratos, sino que además se ilustra la ubicación de la roca.

	Arcillas limosas de color amarillo.
	Arcillas limosas color café, de resistencia media.
	Arcillas limo arenosas de color rojo y de resistencia alta.

**Figura 2.4** Perfil geotécnico típico de la zona de estudio.



**Figura 2.5** Perfil geológico geotécnico.

## 2.4. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN

El siguiente paso consistió en la asignación de los parámetros de resistencia a las diferentes capas detectadas previamente. Es importante resaltar que estos parámetros se obtuvieron de los ensayos triaxiales consolidados no drenados con medición de presión de poros, presentados en el capítulo de exploración y ensayos de laboratorio (Ver Tabla 2.1).

**Tabla 2.1.** Parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos.

DESCRIPCIÓN	$\phi'$ (°)	$c'$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\rho$ (Gr/cm <sup>3</sup> )
Arcillas limosas de color café.	18	0.20	1.48
Arcillas limosas de color amarillo.	23	0.21	1.77
Arcillas limosas de color rojo.	26.8	0.45	1.72

## 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 El Cairo: falla traslacional, sobre el costado occidental y falla rotacional, en el costado oriental. 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 tres metros. El factor de seguridad 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

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

#### Parcialmente saturado y sismo

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

Donde:

$c'$  = intercepto de cohesión

$\phi'$  = ángulo de fricción

$\beta$  = inclinación del terreno

$\alpha$  = 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 2.1). Para efectos de análisis, a continuación se presentan los resultados obtenidos para dos secciones típicas (E-E' y K-K').

Resultados Análisis Sección E-E'.

Para todas las catorce 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:

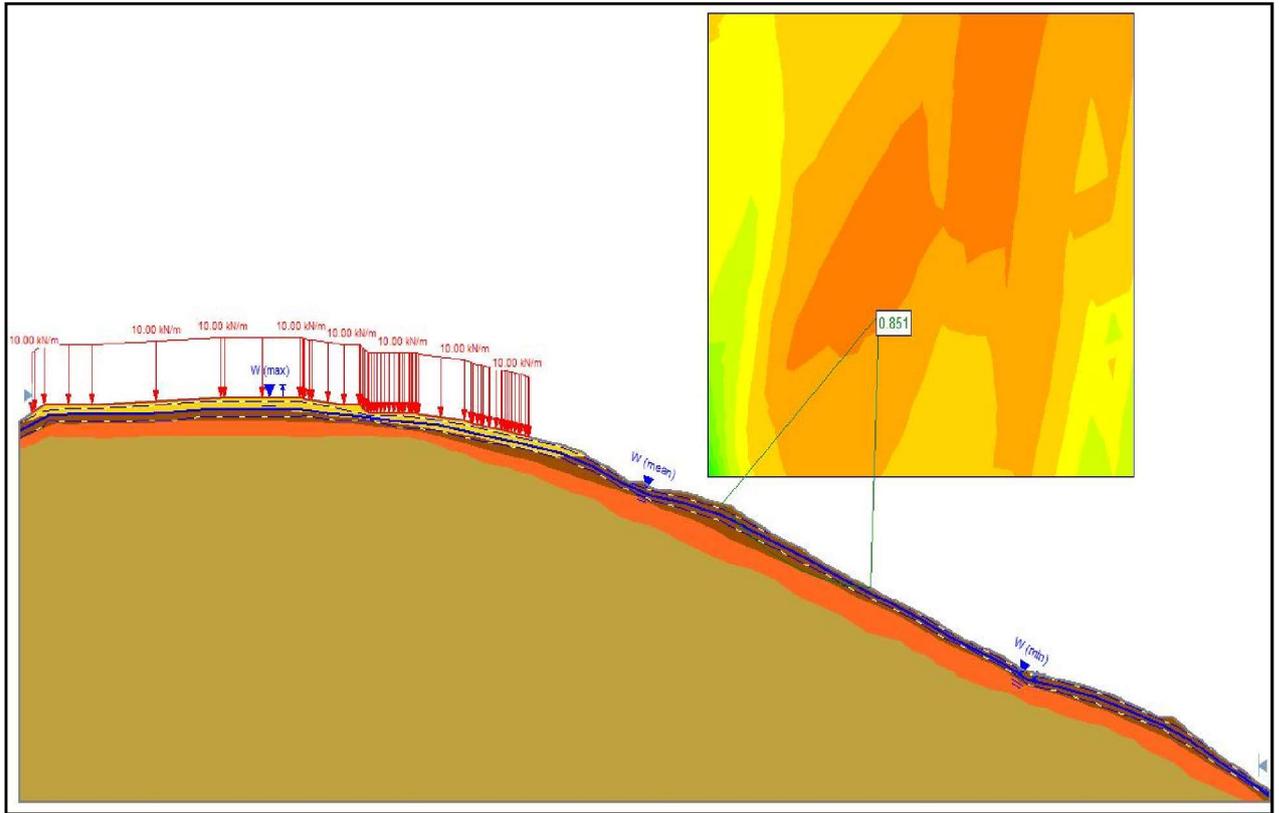
Para el caso de talud parcialmente saturado sin sismo, se obtiene que la presencia de cultivos limpios, así como el agrietamiento del terreno, facilita la infiltración generándose ascensos importantes en el nivel freático, como consecuencia de esta condición la falla del

talud es inminente. Estos deslizamientos son propensos a presentarse en las partes altas del talud, pero no llegan a afectar el casco urbano (Figura 2.6).

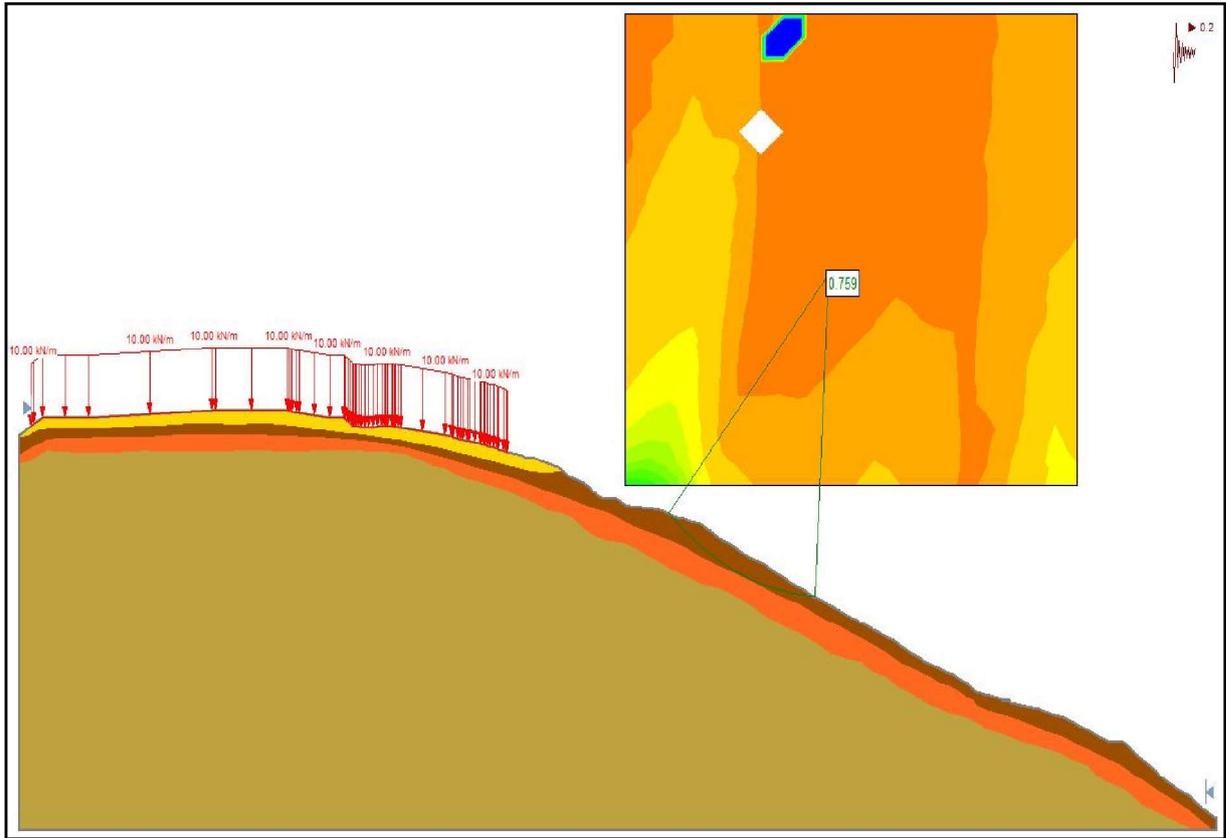
En la Figura 2.7, por otro lado, se presentan los resultados de talud seco con sismo. Para este caso se destaca que bajo condición sísmica el talud también fallaría, siendo la zona más afectada la ubicada hacia la parte superior del talud, sin llegar a afectar el casco urbano.

En la Figura 2.8 se ilustran los resultados destacándose el hecho que esta condición es la más desfavorable de las tres. Al igual que los dos casos anteriores, la falla se presentaría hacia la parte superior del talud.

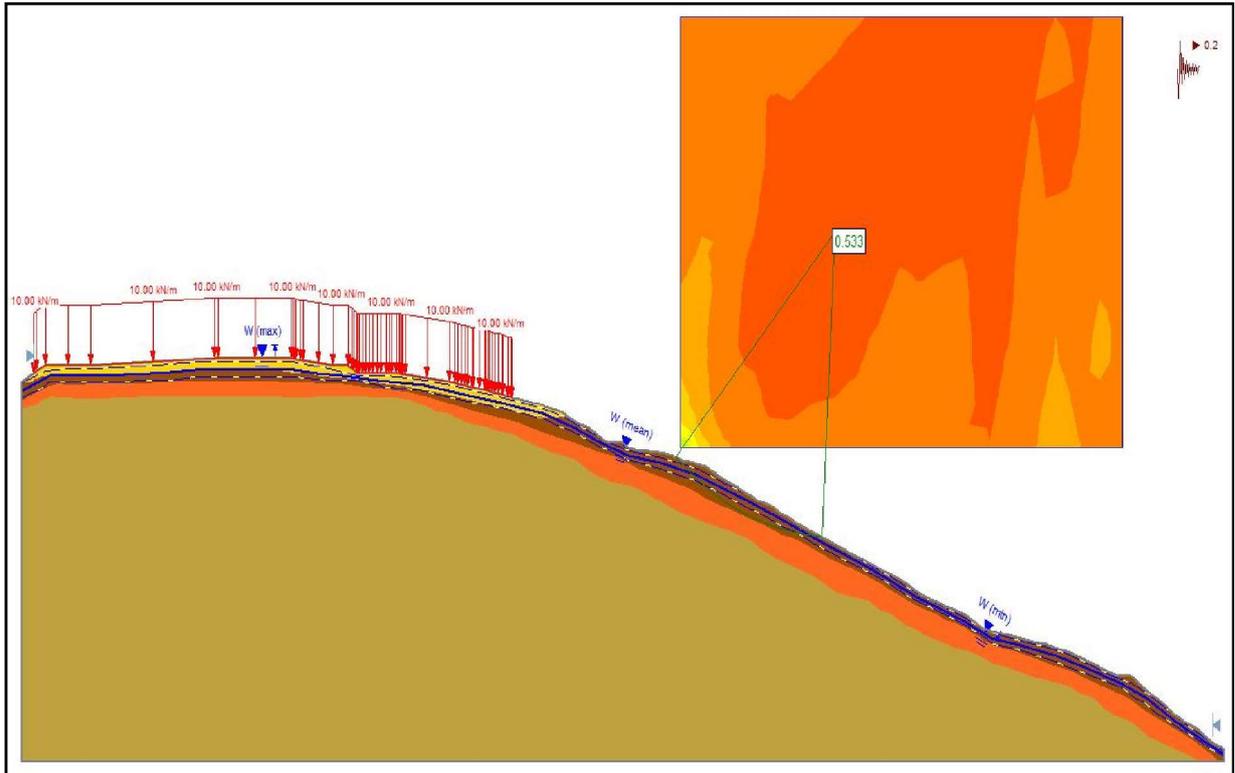
Finalmente, en la Figura 2.9 se ilustra el efecto del ascenso del nivel freático en la estabilidad del talud. De esta figura se desprende que bajo condición dinámica y un pequeño ascenso en el nivel freático, el talud fallaría.



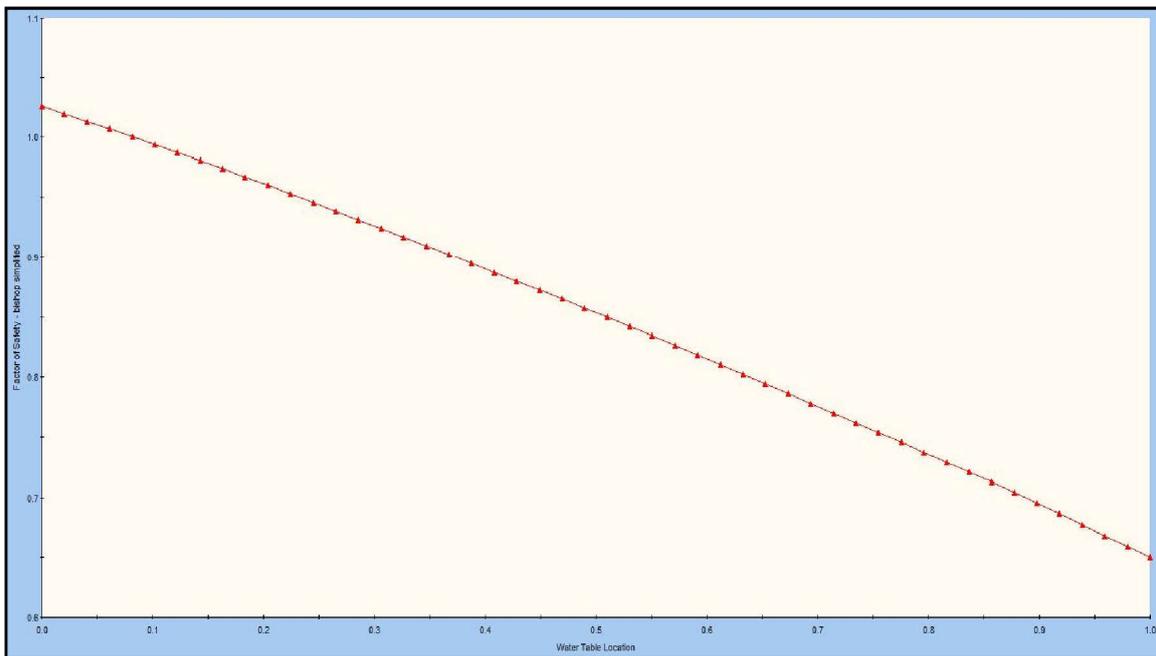
*Figura 2.6* Análisis de equilibrio límite, sección E-E', para talud parcialmente saturado sin sismo.



*Figura 2.7* Análisis de equilibrio límite, sección E-E' para talud seco y sismo de 0.2g.



*Figura 2.8* Análisis de equilibrio límite, sección E-E' con sismo y talud parcialmente saturado.



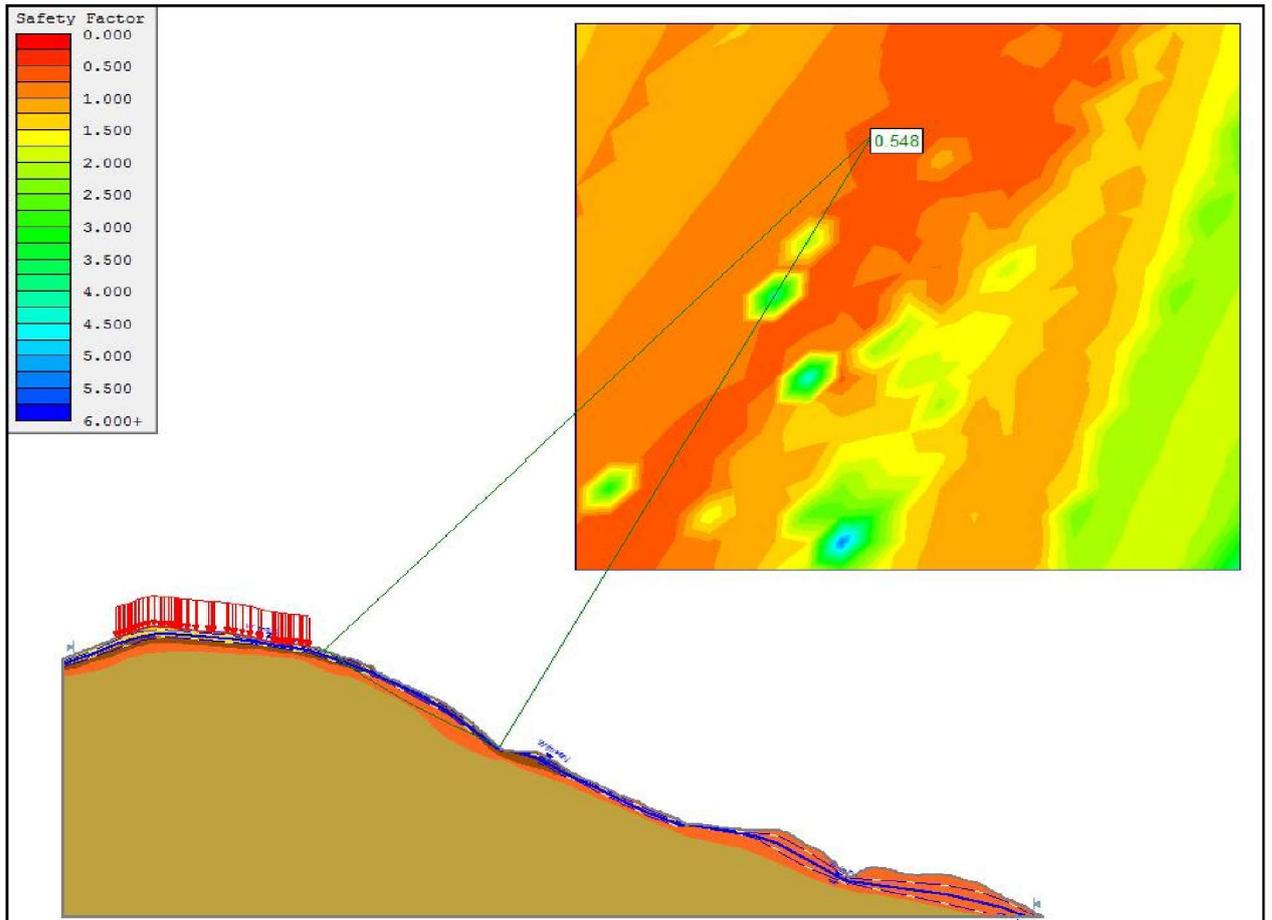
*Figura 2.9* Análisis de sensibilidad del nivel freático en la estabilidad de la ladera sección E-E'.

### Resultados Análisis Sección K-K’.

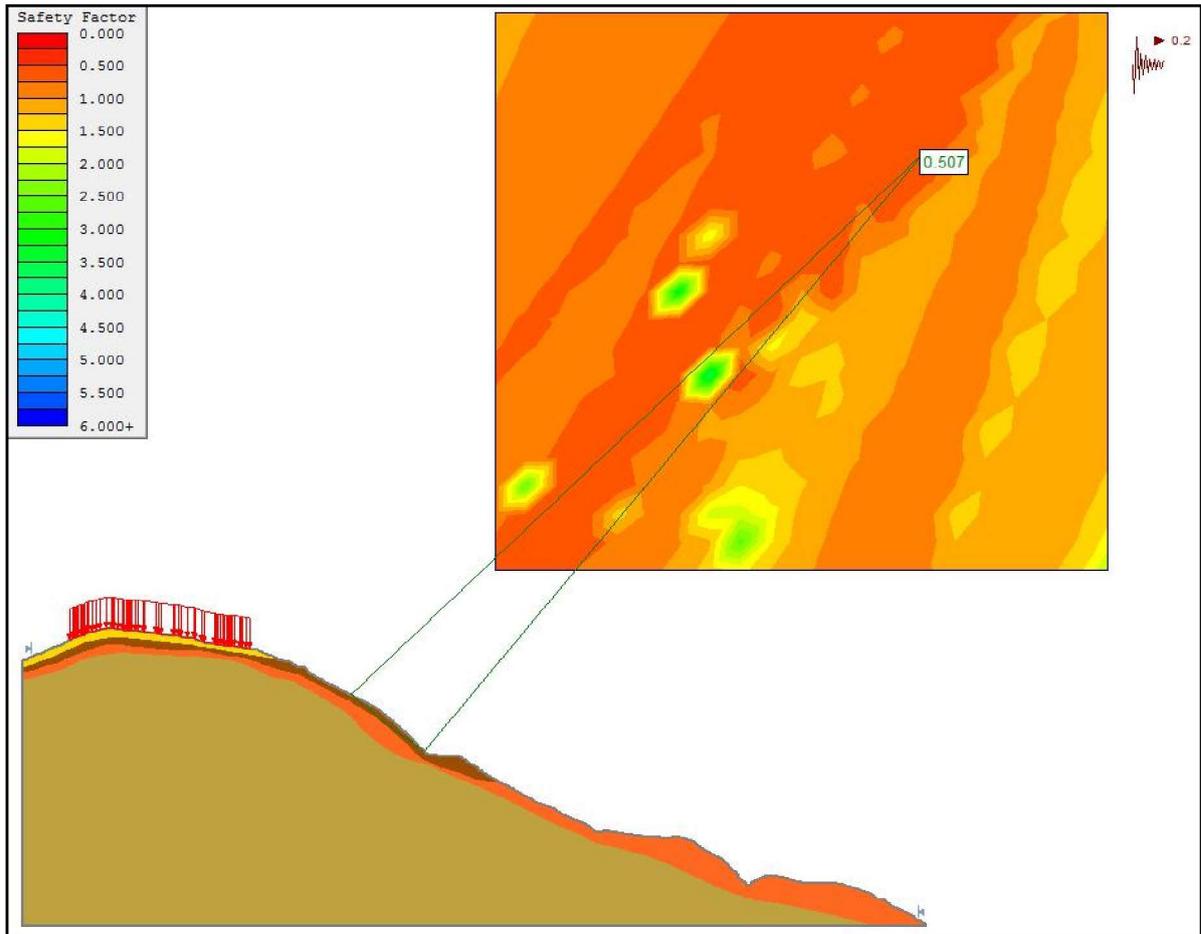
Esta sección de análisis es de suma importancia, ya que los deslizamientos que se puedan generar ante los diferentes escenarios, podrán afectar la el casco urbano de el Cairo, viéndose seriamente comprometidas las viviendas ubicadas a borde del talud. A continuación presentaremos los resultados de los análisis de estabilidad de esta sección para los diferentes escenarios:

Este análisis corresponde a la condición de talud parcialmente saturado sin sismo. Para esta condición se observa que una saturación parcial de la ladera, llevaría irremediablemente a la falla del talud. Desafortunadamente la zona implicada corresponde a la parte superior de la ladera, viéndose afectadas las viviendas colindantes con el talud. Esta condición se puede presentar durante épocas de lluvias fuertes y prolongadas. También pueden contribuir a la inestabilidad de la ladera, el rompimiento de tuberías bien sean del acueducto del sistema de alcantarillado de la población. Es importante realizar un periódico mantenimiento del sistema de aguas, con el fin de detectar y corregir los sectores de fugas. Los resultados de estos análisis se pueden visualizar en la Figura 2.10.

Para la condición de talud drenado y sismo, los análisis muestran que los sectores que se verían afectados corresponden a la parte media de la ladera. Esta condición podrá desencadenar en la falla de la parte superior de la ladera, dado el carácter retrogresivo del movimiento. Los resultados de estos análisis se ilustran en la Figura 2.11.

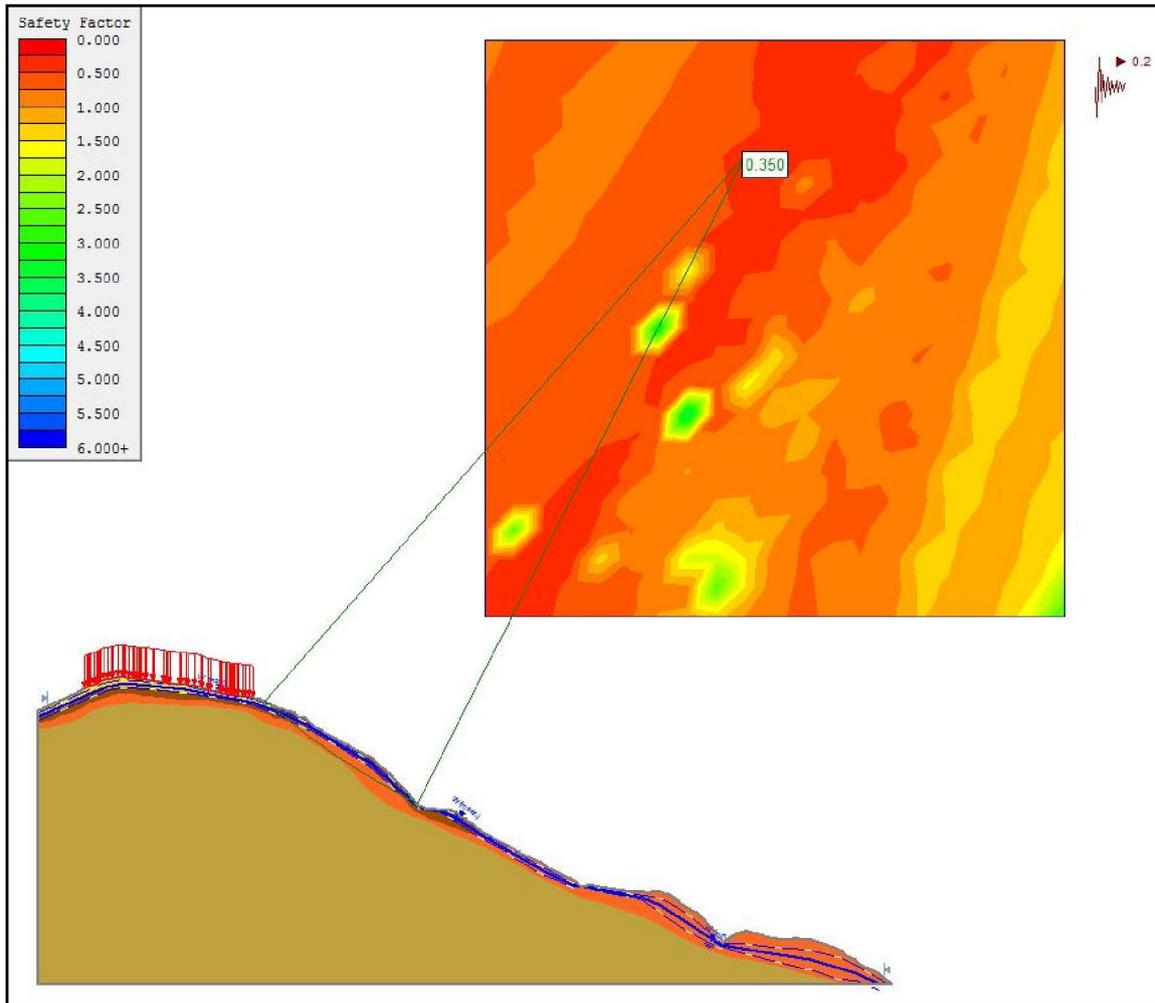


*Figura 2.70* Análisis de estabilidad para la condición sin sismo y talud parcialmente saturado.



*Figura 2.81* Análisis de estabilidad para la condición seca con sismo.

En la Figura 2.12 se presentan los análisis obtenidos para talud parcialmente saturado con sismo, destacándose el hecho que esta condición es la más desfavorable y además que las superficie de falla generada durante este evento afectará las viviendas ubicadas en cercanías de la ladera. Lo anterior implicaría que es necesario dejar una zona de aislamiento entre la cresta del talud y las viviendas, pero esta condición es muy difícil de cumplir debido a que estas zonas de aislamiento se encuentran actualmente habitadas.



**Figura 2.92** Análisis de estabilidad para condición con sismo y talud parcialmente saturado.

Análisis como los anteriormente expuestos se aplicaron a todas las secciones ilustradas en la Figura 2.2, y son la base para la generación del mapa de amenaza en los sectores donde el mecanismo de falla sea rotacional.

### **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. En general cual es coeficiente de aceleración más adecuado para un sector en especial, dependerá básicamente de un estudio de microzonificación sísmica, con el cual no cuenta en la actualidad el municipio del el Cairo.

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.

<b>AMENAZA</b>	<b>RANGO F.S.</b>
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 flanco oriental el mecanismo de falla es de tipo rotacional, mientras que para el costado occidental 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. Debido a que el terreno se encuentra muy expuesto al impacto directo de las gotas de agua a consecuencia de la ausencia de vegetación que disminuya el impacto de las gotas sobre el terreno. Adicionalmente, durante la fase de campo se pudo detectar la presencia de agrietamientos del terreno que facilitarían la infiltración del agua de escorrentía. Como consecuencia de este fenómeno, el ascenso del nivel freático ocasionará grandes deslizamientos rotacionales sobre el costado oriental, llegando en algunas ocasiones a afectar el casco urbano del municipio como se desprende de la Figura 3.1 y Mapa 3.1.

Como se puede observar en la Figura 3.2, aunque el mayor porcentaje corresponde a amenaza baja (48%) vale la pena destacar que existe un importante porcentaje de amenaza alta (32%).

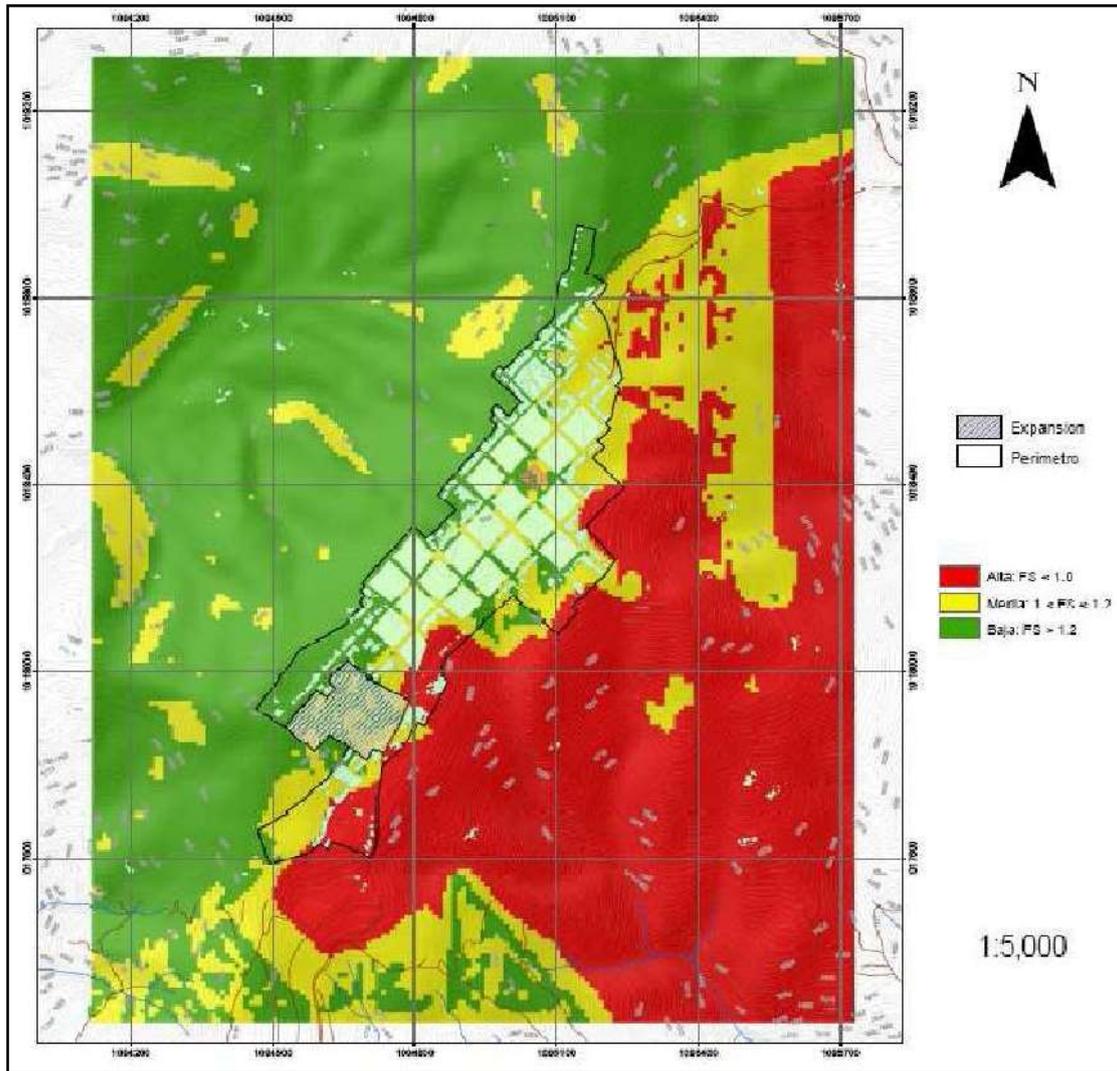
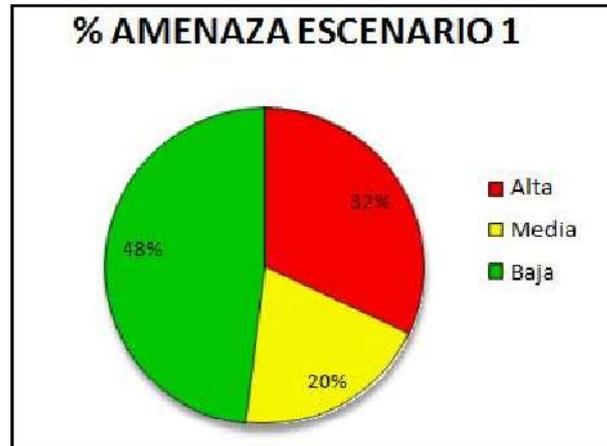


Figura 3.1 Mapa de amenaza escenario 1.



*Figura 3.2* 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, los taludes que se verían seriamente afectados, corresponden a los de la ladera oriental, donde el mecanismo de falla más frecuente corresponde a deslizamientos de tipo rotacional. Se observa en la Figura 3.3, que los deslizamientos afectarán de manera importante las viviendas ubicadas en cercanías al talud oriental. Nótese un aspecto muy importante y es que para la condición actual del terreno, el sector que se ha visto involucrado en un mayor porcentaje por fenómenos de remoción en masa corresponde al sector oriental, donde se encuentra ubicada precisamente la cárcava de Tejares. Los resultados de estos análisis se ilustran en la Figura 3.3 y en mayor detalle en el Mapa 3.2. Finalmente, en la Figura 3.4, se presenta la distribución del nivel de amenaza, encontrándose que la zona de amenaza alta, ocupa el mayor porcentaje dentro de la zona de estudio.

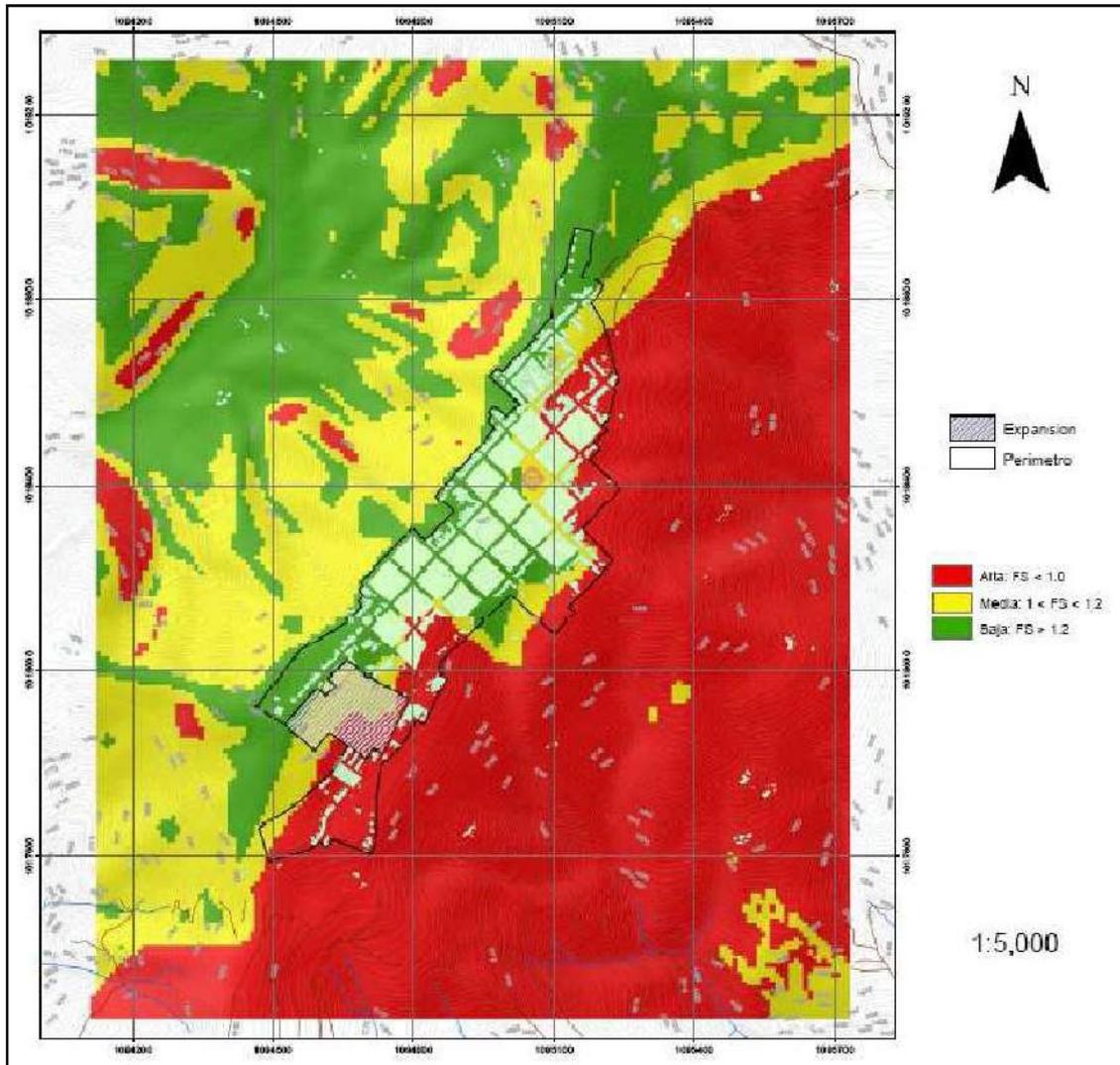


Figura 3.3 Mapa de amenaza escenario2.



Figura 3.4 Distribución porcentual de amenaza, escenario 2.

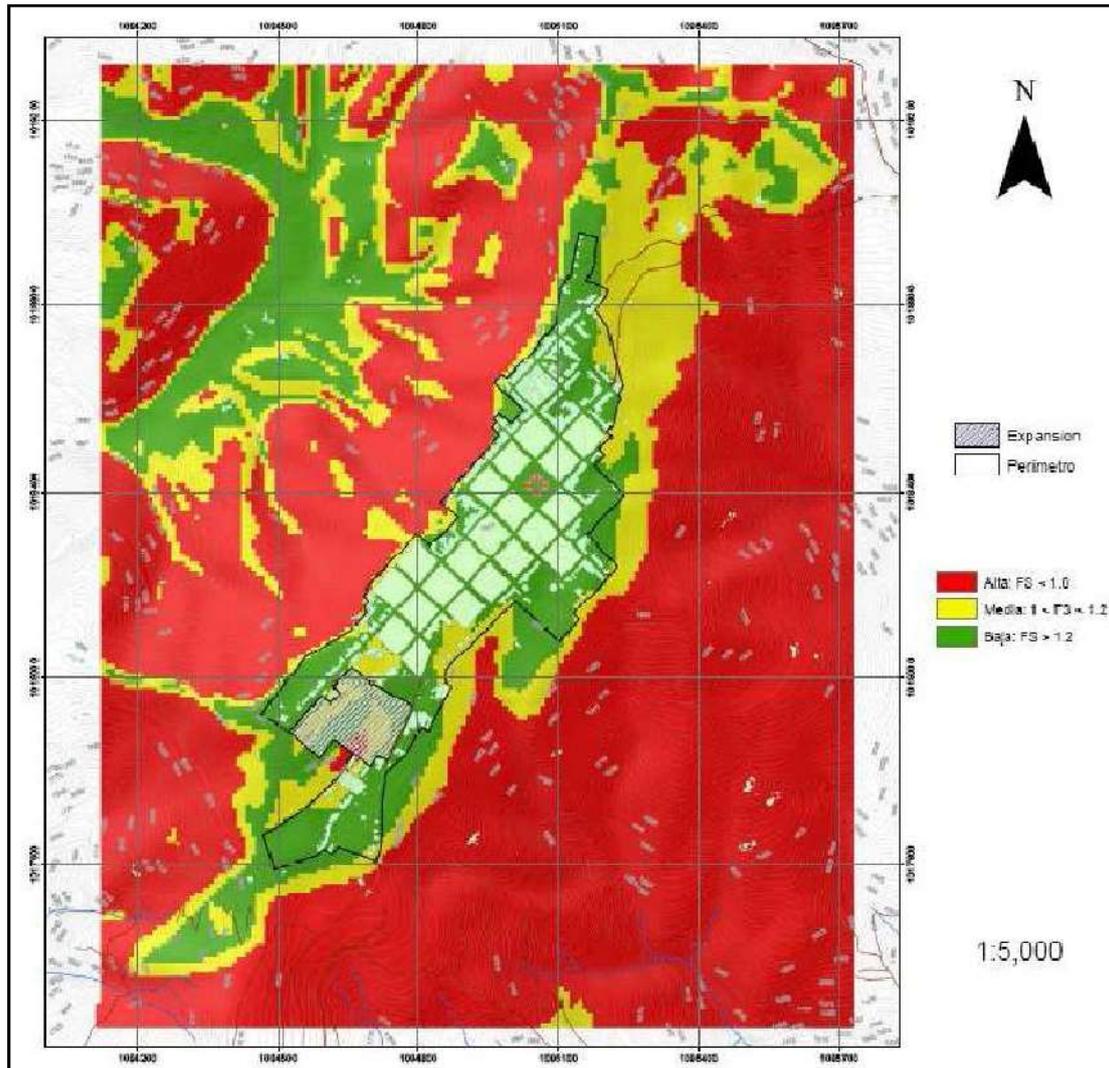
### 3.1.3. Escenario 3. Talud parcialmente saturado con Sismo

Corresponde a la condición más crítica. Este escenario en el que se asume que se presente un sismo durante un periodo de lluvias fuertes y prolongadas, tiene como consecuencia la falla de la totalidad de las laderas que bordean el municipio, siendo los deslizamientos de tal magnitud, que afectarán un sector importante del casco urbano, incluyendo la zona de expansión. Por otro lado, es importante destacar que el porcentaje de amenaza alta es del orden del 64%, tal como se ilustra en la Figura 3.5.

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, hace inestable especialmente el sur oriente del municipio, donde en la actualidad se pueden ver huellas de deslizamientos antiguos cubiertos por cultivos y pastos. Nótese que bajo esta condición la cárcava Tejares se verá muy afectada, generándose un incremento importante en el área afectada.



Figura 3.5 Distribución porcentual de amenaza, escenario 3.



*Figura 3.6* Mapa de amenaza, escenario 3.

Teniendo en cuenta los resultados de los anteriores escenarios se definieron tres niveles de amenaza: baja, media y alta. A continuación se describirán las principales características de las mismas:

**AMENAZA BAJA:** Corresponde a los sectores donde en general el terreno es estable por fenómenos de remoción en masa ante agentes externos. Estas áreas se verán ostensiblemente disminuidas a consecuencia del efecto adverso de las lluvias y el sismo. Están conformadas por las zonas planas, las de menor pendiente y con una cobertura vegetal bastante importante.

**AMENAZA MEDIA:** Estos sectores se caracterizan por presentar pendientes intermedias, y se encuentran ubicadas en la generalidad de los casos en el sector occidental de la meseta,

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, en especial en el sector oriental. El mecanismo de falla predominante es de tipo rotacional, aunque en el sector occidental se pueden desarrollar grandes movimientos en masa de tipo traslacional. Un aspecto que es importante destacar es que el municipio se encuentra cimentado en la parte superior de una meseta alargada, que se asemeja a un tronco de pirámide, que en el evento de un sismo tendrá amplificaciones importantes que afectarán tanto la estabilidad de las laderas como las estructuras aledañas a los taludes. Este efecto es de suma importancia y no fue analizado por encontrarse fuera de los alcances del estudio.