



**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 AMENAZAS POR  
REMOCIÓN EN MASA  
PARA EL MUNICIPIO DE LA UNIÓN**

**SUPERVISIÓN A CARGO DE  
HIDROOCCIDENTE**

**Santiago de Cali, Junio de 2010**

## TABLA DE CONTENIDO

<i>INTRODUCCIÓN</i>	<u>4</u>
<b>1. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA</b>	<b>6</b>
<b>1.1. TÉCNICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD</b>	<b>6</b>
1.1.1. Método bivariado	6
<b>1.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES</b>	<b>9</b>
1.2.1. Pendiente (PEND)	10
1.2.2. Curvatura (CURVAR)	10
1.2.3. Orientación de la ladera (ORIENTACIÓN)	13
3.2.4. Usos del Suelo (USO)	13
3.2.5. Geología (GEOL)	16
<b>1.3. ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD</b>	<b>18</b>
<b>2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA</b>	<b>22</b>
<b>2.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES</b>	<b>22</b>
<b>2.2. MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO</b>	<b>23</b>
<b>2.3. DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES EN PROFUNDIDAD</b>	<b>24</b>
<b>2.4. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN</b>	<b>26</b>
<b>2.5. MECANISMOS DE FALLA MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE</b>	<b>26</b>
2.5.1. Falla Planar en Talud Infinito	26
<b>3. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR ESCENARIOS</b>	<b>29</b>
<b>3.1. FUERZA SÍSMICA</b>	<b>29</b>
3.1.1. Escenario 1. Talud parcialmente Saturado sin Sismo	30
3.1.2. Escenario 2. Talud Seco con Sismo	32
3.1.3. Escenario 3. Talud parcialmente Saturado con Sismo	34
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>37</b>
<b>4.1. CONCLUSIONES</b>	<b>37</b>
<b>4.2. RECOMENDACIONES</b>	<b>37</b>
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>39</b>

## CONTENIDO DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos</i>	26
<i>Tabla 3.1. Escenarios de análisis para la estimación de factores de seguridad.</i>	29
<i>Tabla 3.2. Rangos del Factor de Seguridad para definir el nivel de amenaza.</i>	30

## CONTENIDO DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Diagrama de flujo general del método estadístico bivariado (Van Westen, 1996).</i>	8
<i>Figura 1.2 Mapa de pendientes, municipio de La Unión.</i>	11
<i>Figura 1.3 Mapa de curvatura, municipio de La Unión.</i>	12
<i>Figura 1.4 Mapa de orientación, municipio de La Unión.</i>	14
<i>Figura 1.5 Mapa de usos del suelo, municipio de La Unión.</i>	15
<i>Figura 1.6 Mapa de geología, municipio de La Unión.</i>	17
<i>Figura 1.7 Distribución porcentual de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa.</i>	19
<i>Figura 1.8 Mapa de Susceptibilidad del municipio de La Unión.</i>	20
<i>Figura 2.1 Esquema metodológico general. Evaluación de la amenaza por movimientos en masa.</i>	23
<i>Figura 2.2 Localización en planta de secciones en estudio.</i>	24
<i>Figura 2.3 Perfil geológico geotécnico tomado de la sección D-D'.</i>	25
<i>Figura 2.4 Tipos de fallas traslacionales.</i>	27
<i>Figura 3.1 Distribución porcentual de amenaza, escenario 1.</i>	30
<i>Figura 3.2 Mapa de amenaza, escenario 1.</i>	31
<i>Figura 3.3 Distribución porcentual de la amenaza, escenario 2.</i>	32
<i>Figura 3.4 Mapa de amenaza, escenario 2.</i>	33
<i>Figura 3.5 Distribución porcentual de la amenaza, escenario 3.</i>	34
<i>Figura 3.6 Mapa de amenaza, escenario 3.</i>	35

## INTRODUCCIÓN

El presente estudio obedece al Informe final **“Susceptibilidad y Amenazas por Remoción en Masa correspondiente a el Municipio de La Unión”**, realizado por la firma Consultores en Ingeniería y Medio Ambiente – CI Ambiental Ltda., en quien la Universidad del Valle delegó la ejecución de los estudios de geotecnia en cuanto a la exploración del subsuelo y la aplicación de la metodología y los modelos para la determinación de la susceptibilidad y las amenazas de la remoción en masa; contando para ello con la aprobación de la supervisión del Contrato de Consultoría No. 091 de 2009, entre la Universidad del Valle y CI Ambiental Ltda.

Es pertinente mencionar que este estudio hace parte del Estudio de “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 El Cairo, Buga, Riofrío, Dagua, y La Unión (Proyecto MIDAS)”, realizado a través del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente en el marco del Contrato No. 188 CVC-UNIVALLE.



# **1. EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA**

# 1. EVALUACIÓN DE LA 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 (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 movimiento ocurrirá en el caso de presencia de factores causantes y en el caso de ausencia de éstos:

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

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):

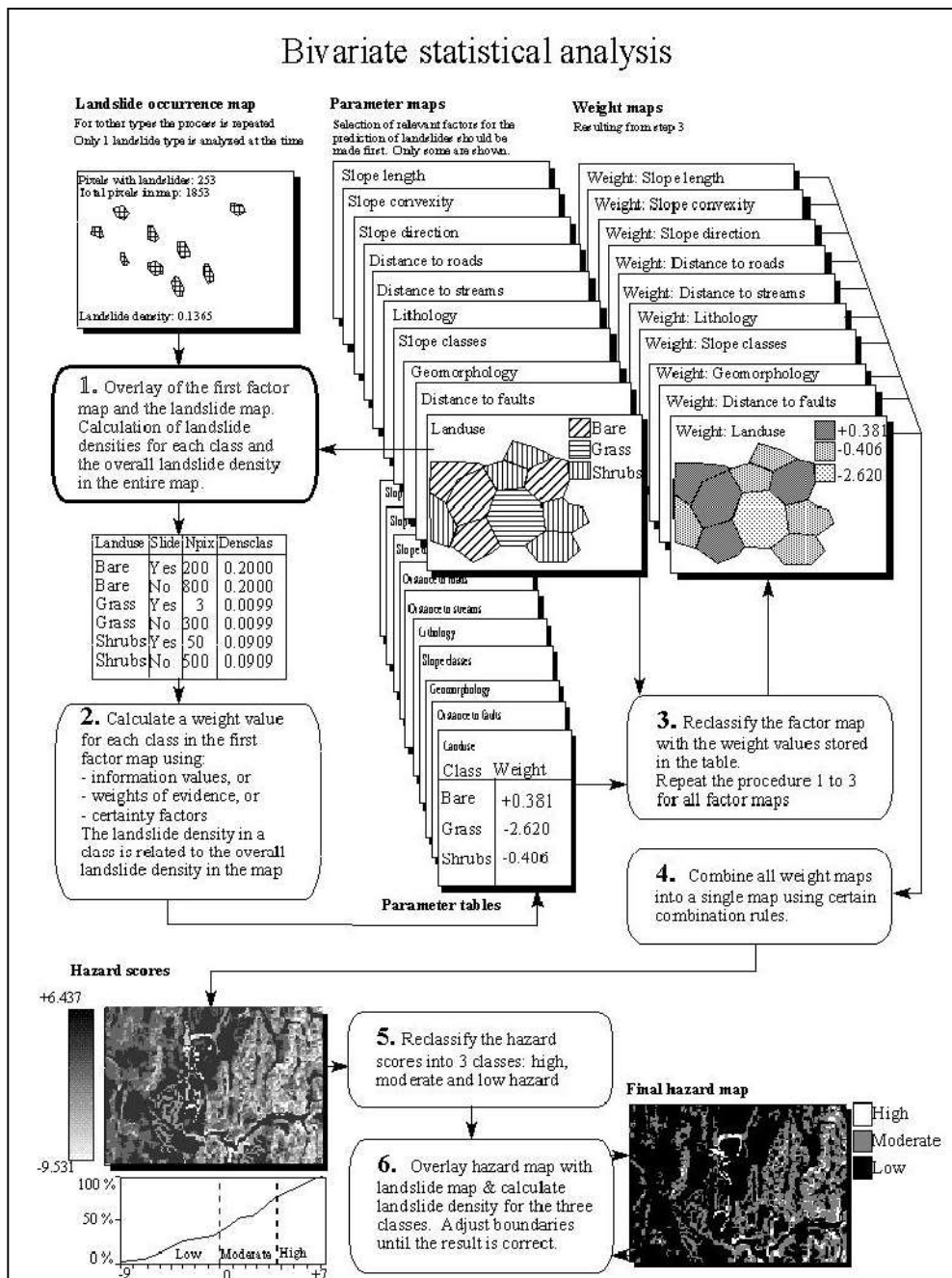


Figura 1.1 Diagrama de flujo general del método estadístico bivariado (Van Westen, 1996).

$$W_j^+ = \frac{\frac{Np_{jx_1}}{Np_{jx_1} + Np_{jx_2}}}{\frac{Np_{jx_3}}{Np_{jx_3} + Np_{jx_4}}} \quad (4)$$

$$W_j^- = \frac{\frac{Np_{jx_2}}{Np_{jx_1} + Np_{jx_2}}}{\frac{Np_{jx_4}}{Np_{jx_3} + Np_{jx_4}}} \quad (5)$$

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

$$LSI = \sum W_f$$

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

### ✓ **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 la zona urbana y de expansión se caracterizan por poseer pendientes muy suaves que se encuentra en su mayoría se encuentran entre los rangos de 0 y 5 grados, y 5 y 15 grados.

#### **1.2.2. Curvatura (CURVAR)**

Indica el grado de Convexidad / Concavidad del terreno. Se determina mediante el radio de curvatura de la celda según un plano vertical. Se define como la tasa de cambio de la pendiente y depende de las derivadas de segundo grado de la altitud. La variable se deriva del MDE, siendo cuantitativa continua, con un rango de valores variable según la zona pero que oscila entre -20 y 20 de unidades de 1/100 metros. El valor 0 en una celda corresponde a una superficie plana formada entre la celda en cuestión y sus ocho celdas vecinas, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda. La variable se genera como una malla regular de puntos flotantes.

La variable se relaciona con los deslizamientos o movimientos en masa en la medida en que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial. En las zonas cóncavas el flujo se concentra hacia la celda, mientras que se dispersa en las convexas. En las primeras es de esperar un aumento de la presión de agua en los poros y una mayor acumulación de formación superficial, elementos que favorecen la aparición de movimientos en masa. Una curvatura cóncava es más efectiva en la captación agua lluvia (Carrara, 1983, Oyagi, 1984, Smith, 1988, Gao, 1993). En algunos estudios se indica que los deslizamientos superficiales ocurren principalmente en convergencias topográficas donde se concentra el flujo, tales como depresiones canalizadas y hondonadas.

Como se puede observar, la zona se caracteriza por presentar una gran cantidad de zonas planas, ver Figura 1.3.

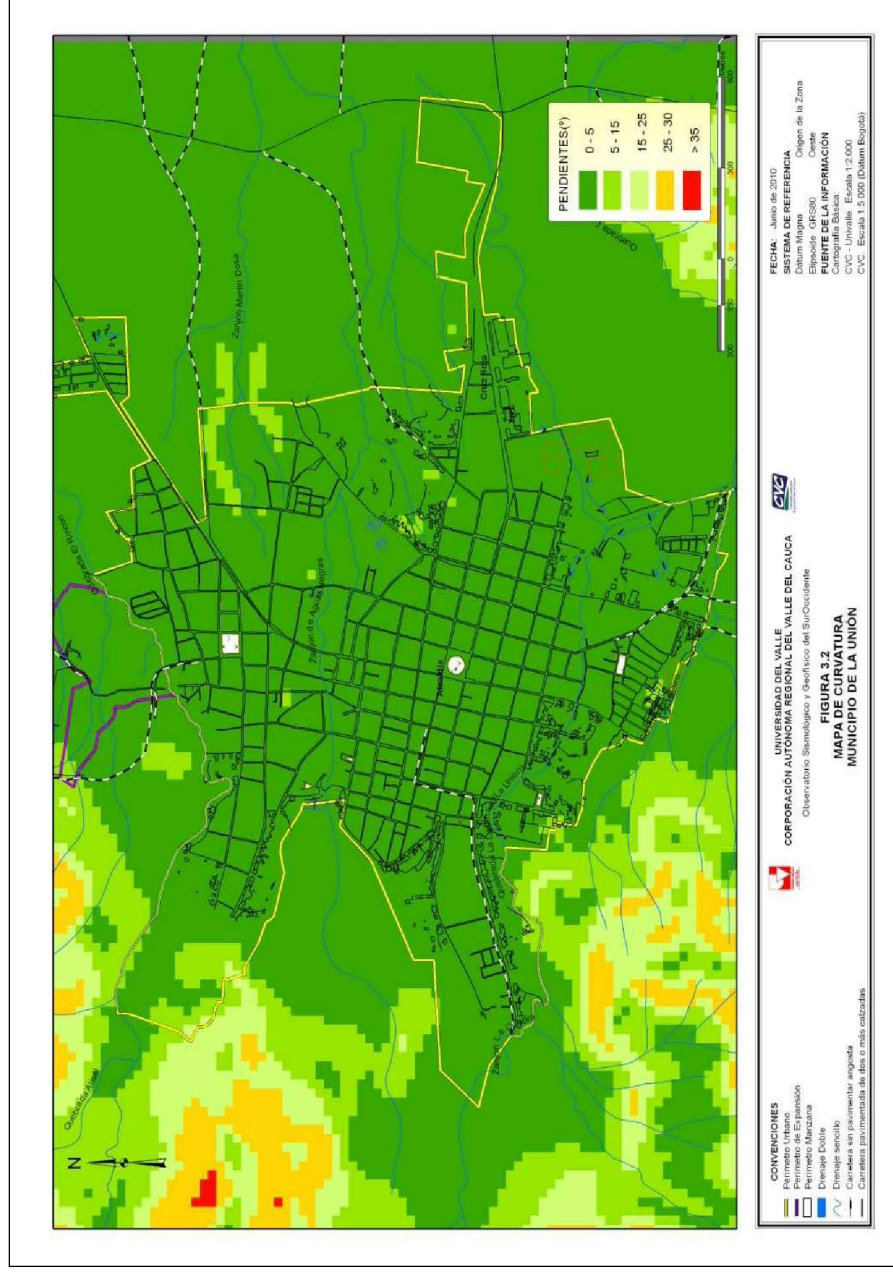


Figura 1.2 Mapa de pendientes, municipio de La Unión.

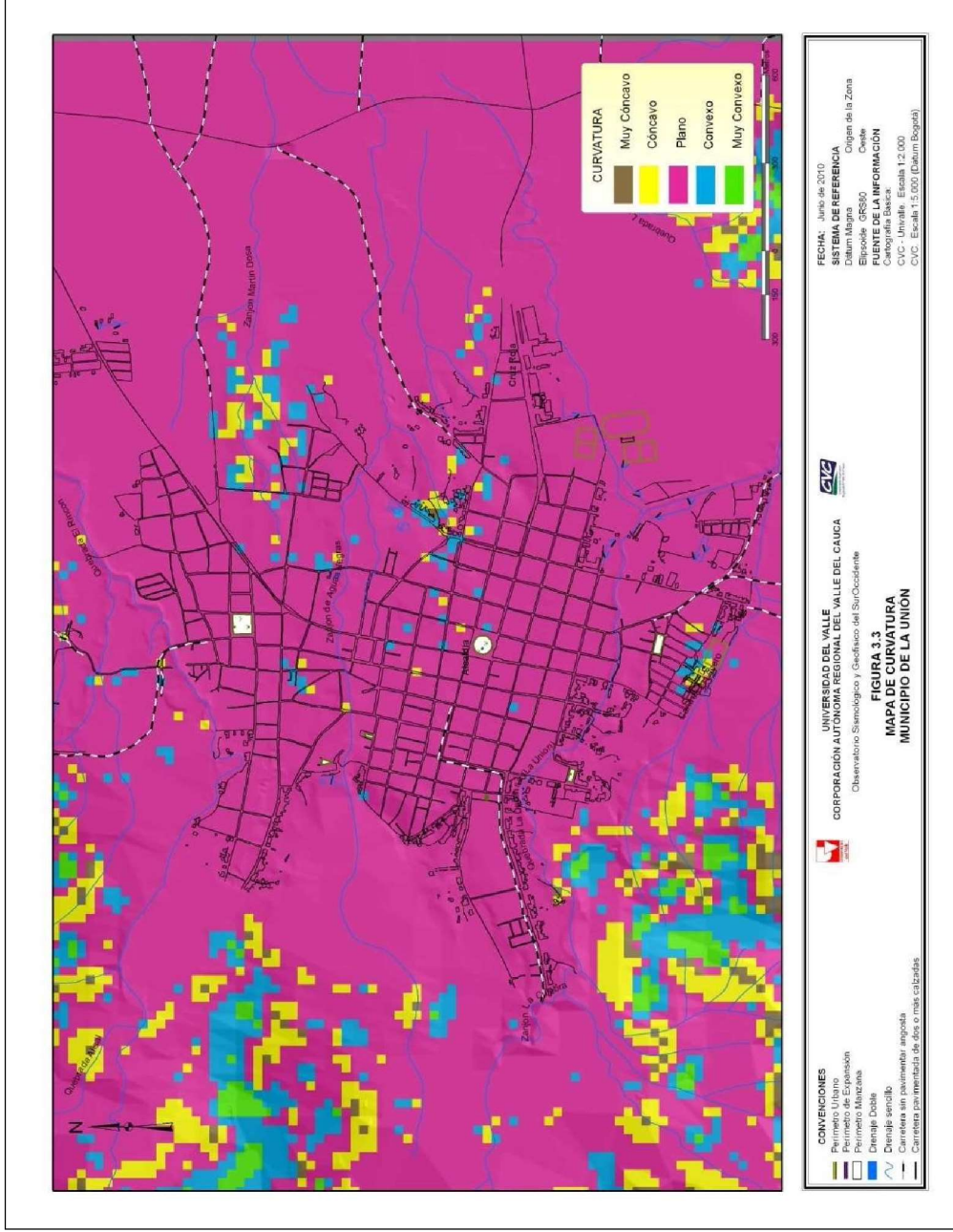


Figura 1.3 Mapa de curvatura, municipio de La Unión.



### **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.

### **3.2.4. 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 La unión. 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.

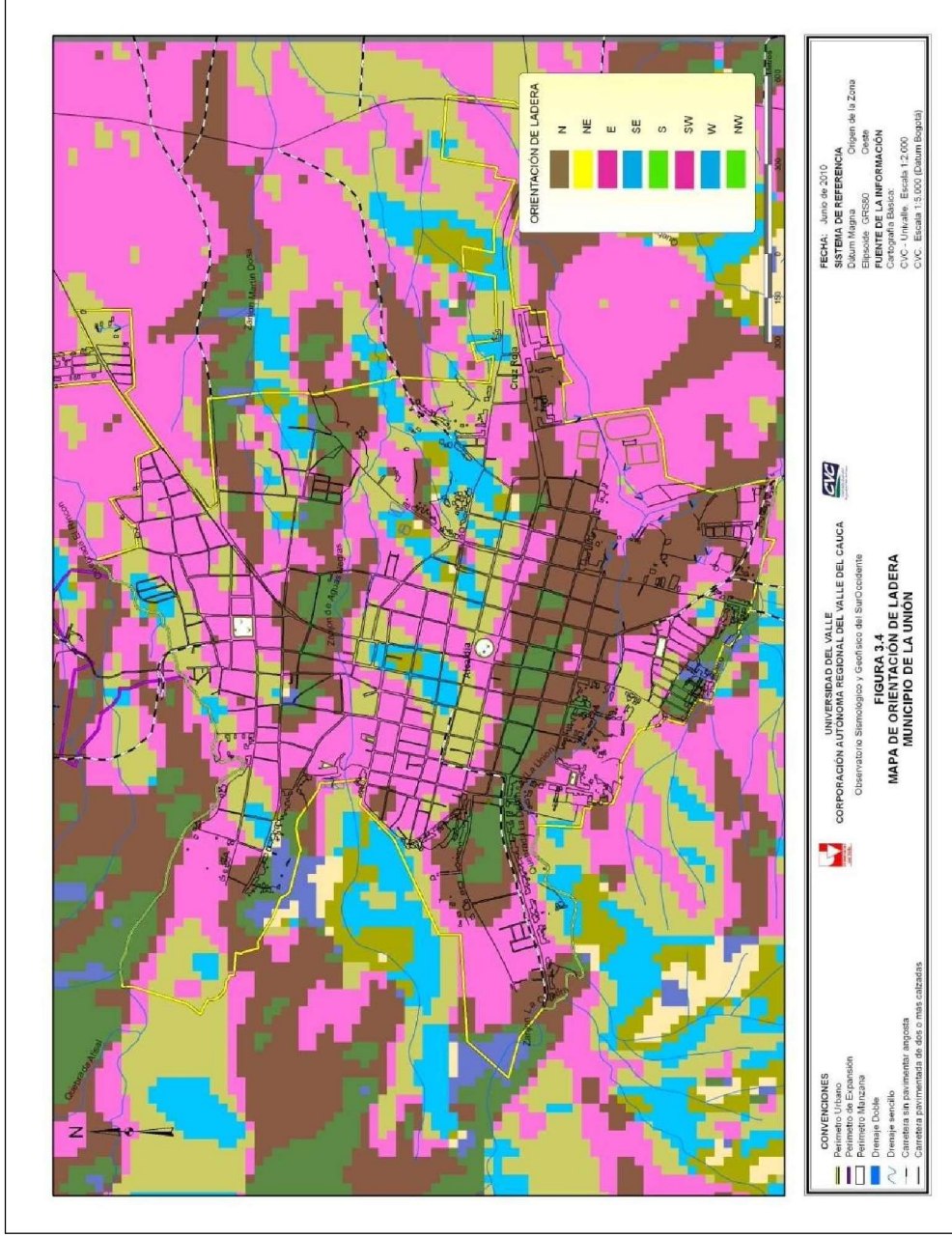


Figura 1.4 Mapa de orientación, municipio de La Unión.

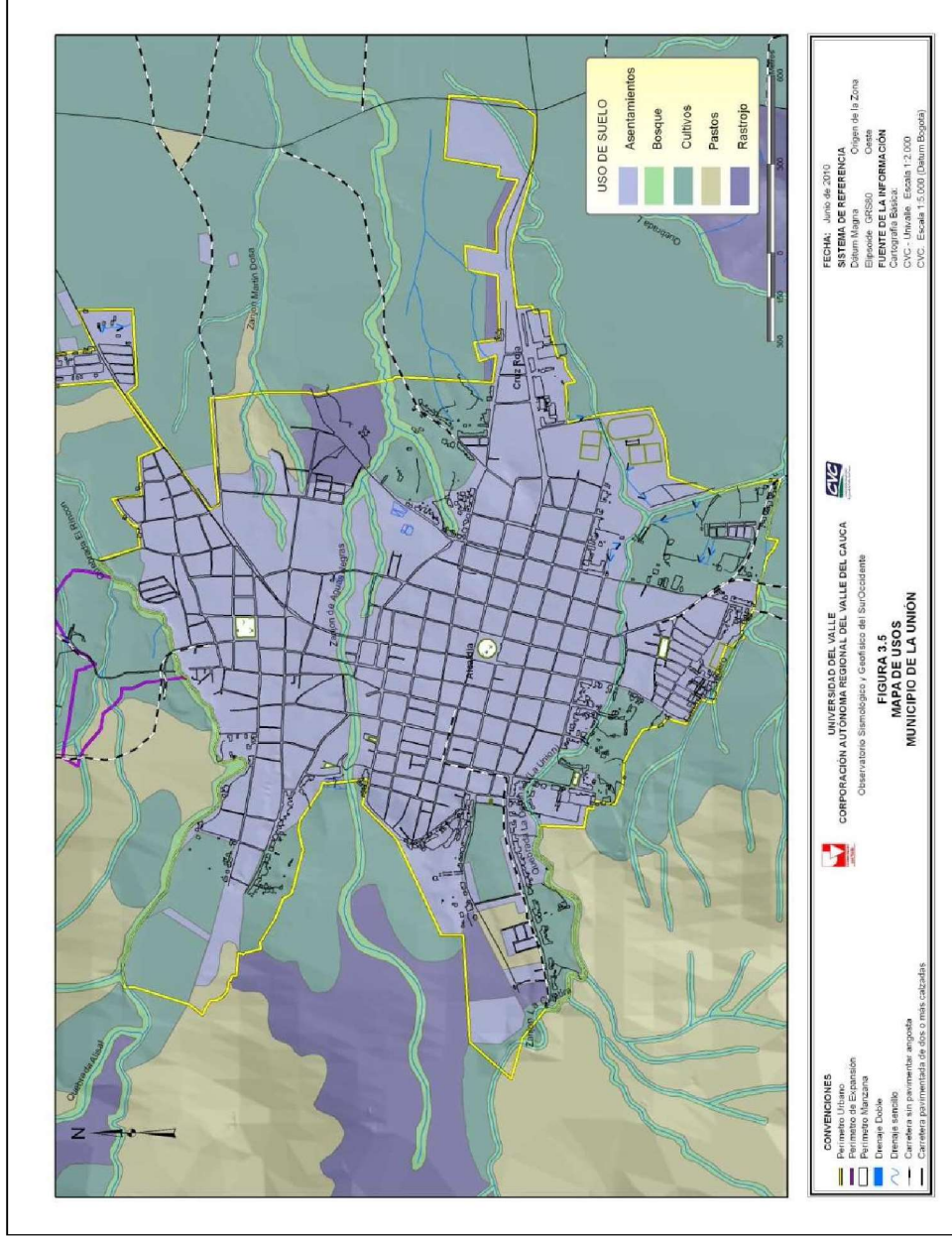


Figura 1.5 Mapa de usos del suelo, municipio de La Unión.

### **3.2.5. Geología (GEOL)**

Variable cualitativa que se deriva de la cartografía de unidades geológicas, y representa el tipo de material geológico a nivel superficial, ver Figura 1.6.





### 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:

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

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)<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 Figura 1.8 Mapa de Susceptibilidad):

✓ **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. Como se puede observar en la Figura 1.8 el municipio no es altamente susceptible a movimientos de remoción en masa.

✓ **SUSCEPTIBILIDAD MEDIA:** Las zonas de susceptibilidad media están relacionadas con pendientes topográficas suaves y por la buena cobertura vegetal, en el municipio no se presenta esta susceptibilidad.

✓ **SUSCEPTIBILIDAD BAJA:** Zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad. Se relaciona con terrenos de pendientes muy suaves, urbanizados y con buena cobertura vegetal. El municipio por no presentar condiciones actuales geomorfológicamente inestables activas se encuentra en su totalidad en susceptibilidad baja (100%) (ver Figura 1.7).

---

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



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

Finalmente en la Figura 1.8 y Mapa 1.1, se ilustra el mapa de susceptibilidad de la zona, donde se observa que la susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa es baja. Este fenómeno es explicable si tenemos en cuenta que durante el inventario de deslizamientos no se detectaron fenómenos de remoción en masa en la zona de estudio. Es importante aclarar que el hecho de que la susceptibilidad sea baja, esto no implica que la amenaza sea baja, ya que lo que se hace en la próxima sección es someter las laderas a agentes externos tales como los sismos y lluvias intensas y prolongadas.

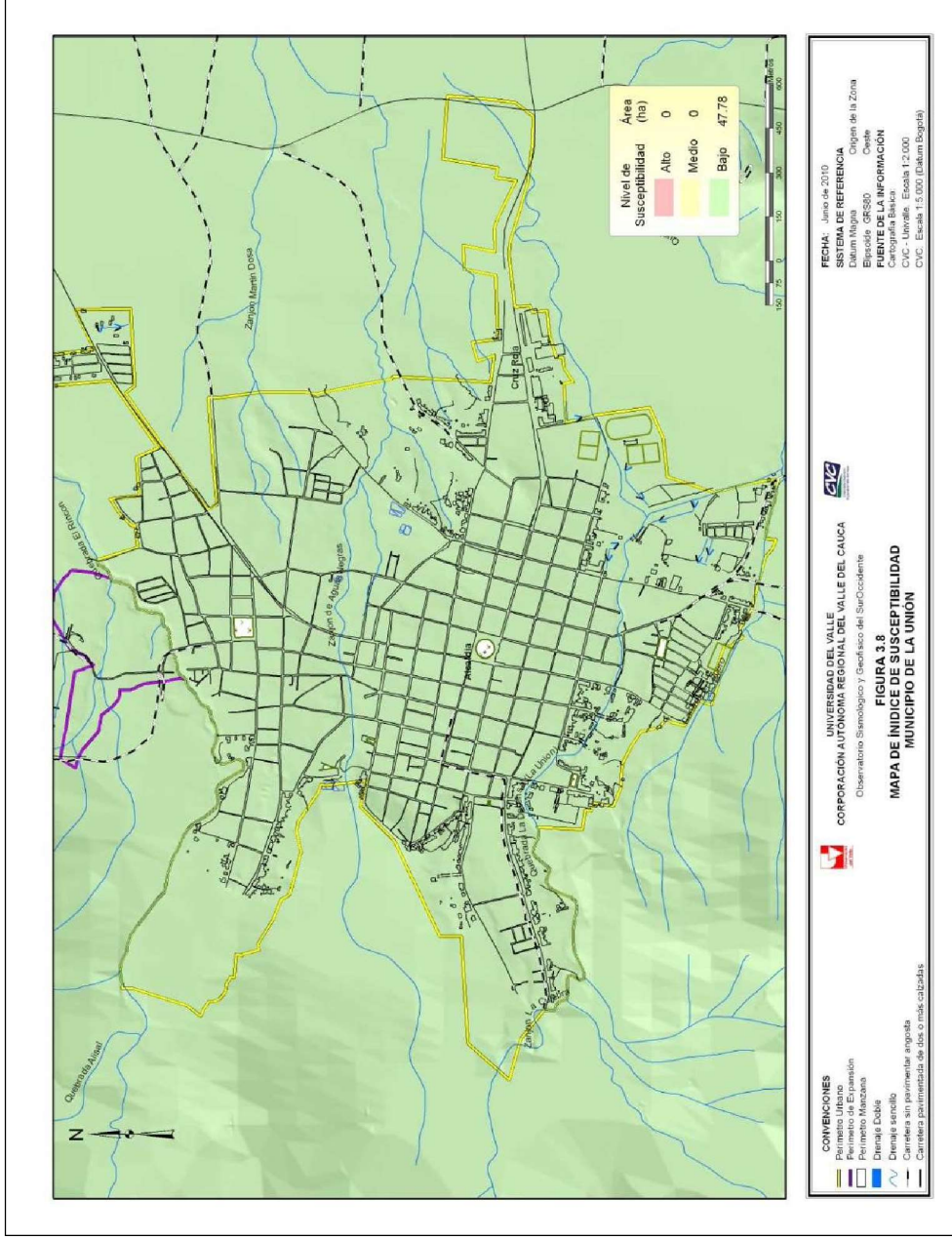


Figura 1.8 Mapa de Susceptibilidad del municipio de La Unión.



## **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 técnico 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.

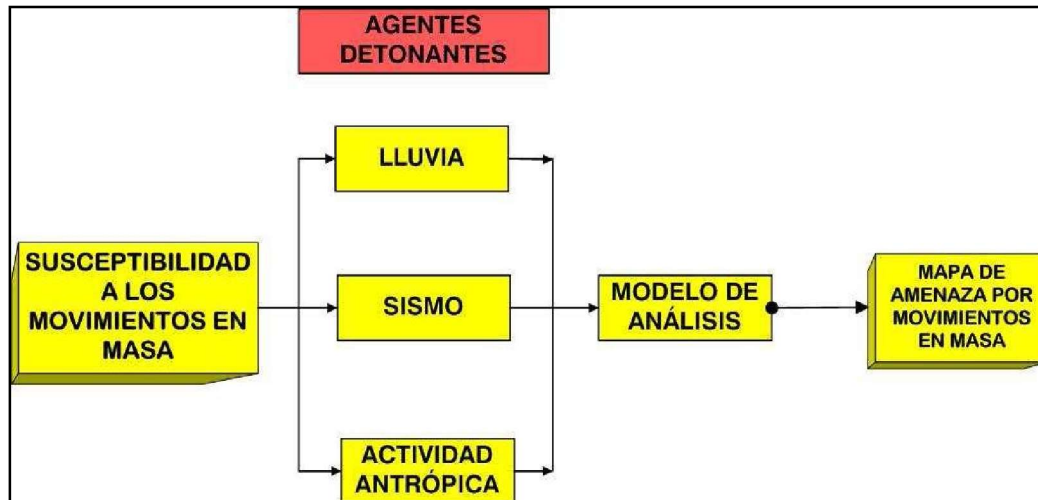
La amenaza por movimientos en masa de una ladera, entendida como un evento natural, humano o combinado, potencialmente destructivo de vidas, bienes, economía y/o cultura de una comunidad (INGEOMINAS, 2006), involucra en su evaluación, el conocimiento claro del tipo de movimiento en masa amenazante activo 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.

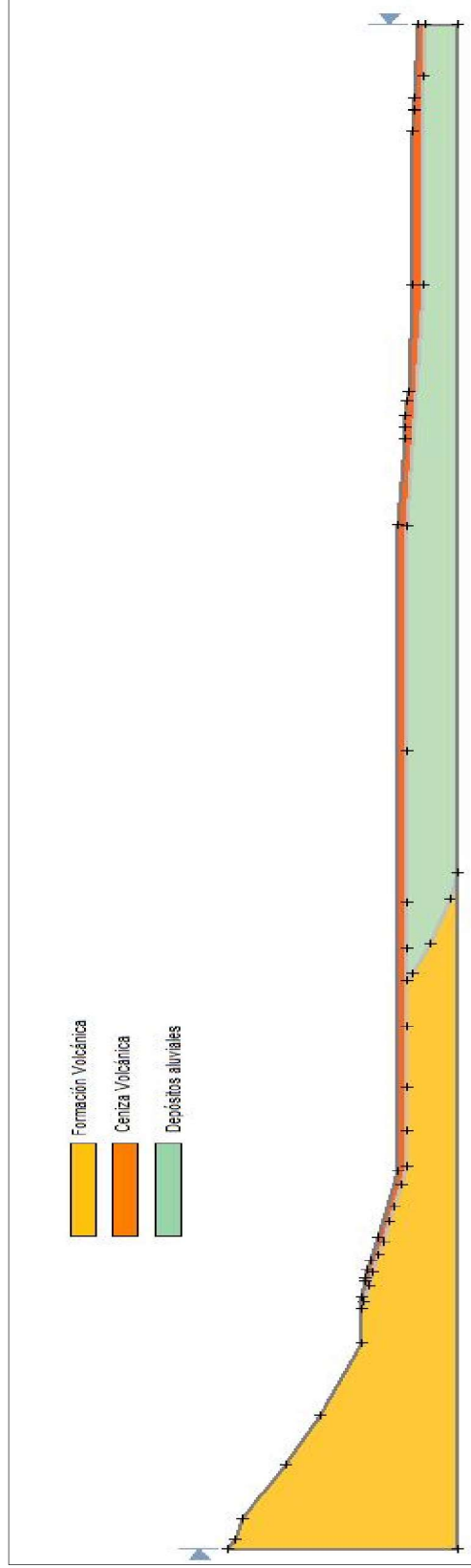


*Figura 2.1 Esquema metodológico general. Evaluación de la amenaza por movimientos en masa.*

## 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 cinco 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' y SECCIÓN E-E', consideradas las secciones más críticas durante la fase de campo. La ubicación de estas secciones se ilustra en la Figura 2.2





*Figura 2.3 Perfil geológico geotécnico tomado de la sección D-D:*

## 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. Para ello, se utilizaron los resultados de los ensayos de corte y valores típicos obtenidos en sectores cercanos a la zona de estudio. Finalmente, en la Tabla 2.1 se presentan los parámetros de resistencia asignados a las diferentes unidades geológicas superficiales.

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

DESCRIPCIÓN	$\phi'$ (°)	$c'$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
Formación Volcánica	38	0.2
Depósitos aluviales	28	20
Formación Espinal	35	20
Formación Zarzal	30	30

## 2.5. MECANISMOS DE FALLA MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE

Dentro de la zona de estudio se identificó básicamente que el mecanismo de falla, aunque no se presente predominantemente en el casco urbano, es del tipo traslacional. A continuación se presentan las bases teóricas del mecanismo identificado, 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

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

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

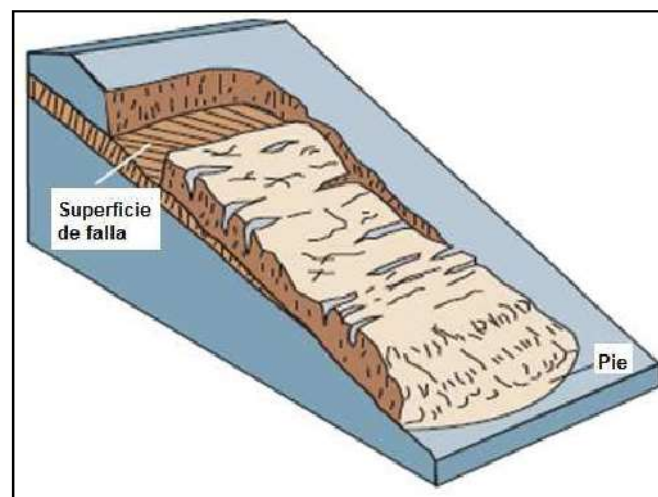
La anterior expresión fue programada en ARcGis, para talud saturado, talud parcialmente saturado y sismo. Los resultados de dichos análisis se presentan en las secciones subsecuentes, y serán plasmados en el mapa de amenaza.

Estas fallas por lo general consisten en movimientos importantes del cuerpo del talud sobre superficies planas bien definidas, asociadas a la presencia de estratos poco resistentes localizados a poca profundidad del talud. Éstos pueden ocurrir lenta o rápidamente.

La superficie de falla se desarrolla en forma paralela al estrato débil y se remata en sus extremos con superficies curvas que llegan al exterior formando agrietamientos (ver figura 2.4). Con mucha frecuencia, la debilidad del estrato está ligada a elevadas presiones de poro en el agua contenida en las arcillas o a fenómenos de elevación de presión de agua en estratos de arena (acuíferos). En este sentido, las fallas pueden estar ligadas también al calendario de las temporadas de lluvias de la región.

Las fallas del material en bloque, muchas veces están asociadas a discontinuidades y fracturas de los materiales que forman un corte o una ladera natural, siempre en añadidura al efecto del estrato débil subyacente.

Los deslizamientos planares en macizos rocosos consisten en el deslizamiento como una unidad o unidades talud abajo a lo largo de una o más superficies planas. También se puede generar una falla de cuña a lo largo de la intersección de dos planos consistente de uno o varios bloques de pequeño a gran tamaño.



*Figura 2.4 Tipos de fallas traslacionales.*

### **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 Sismo resistente 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, emitida por la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias – DPAAE., 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 el único mecanismo de falla en el municipio aunque no dominante en el casco urbano es el de falla planar. Lo anterior implicó que los análisis realizados fueran por 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. Como se puede observar en la Figura 3.1 el casco urbano y la zona de expansión del municipio, dada esta condición no se verán afectados por movimientos en masa, aunque se destaca que hacia la parte occidental en una zona montañosa de pendientes de 20-30% y mayores de 30%, y alejada de la zona de estudio se presenta amenaza alta que como se desprende de la Figura 3.2 correspondiente al 12.6%. (Mapa 3.1 y Figura 3.2 Mapa de amenaza en escenario 1).



**Figura 3.1** Distribución porcentual de amenaza, escenario 1.

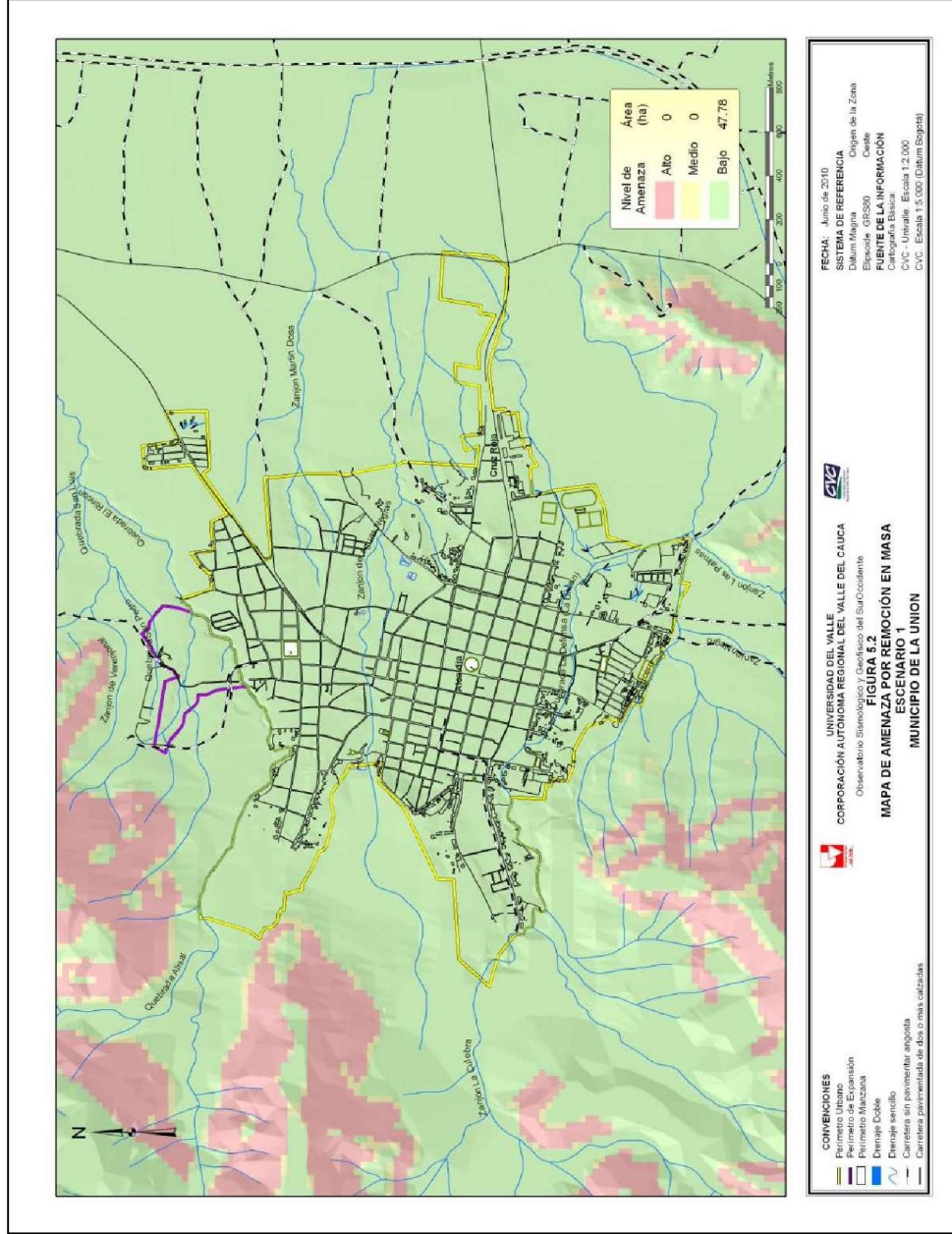


Figura 3.2 Mapa de amenaza, escenario 1.

### 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 de un sismo, dadas estas condiciones, las zonas afectadas no involucran el casco urbano ni la zona de expansión del municipio, sin embargo cabe resaltar que hacia la parte noroccidental, existe una zona de amenaza alta muy cercana al casco urbano aunque no genere amenaza sobre éste como tal (ver Figuras 3.3 y 3.4) (Mapa 3.2 y Figura 3.4 Mapa de amenaza en escenario 2”).



*Figura 3.3 Distribución porcentual de la amenaza, escenario 2.*

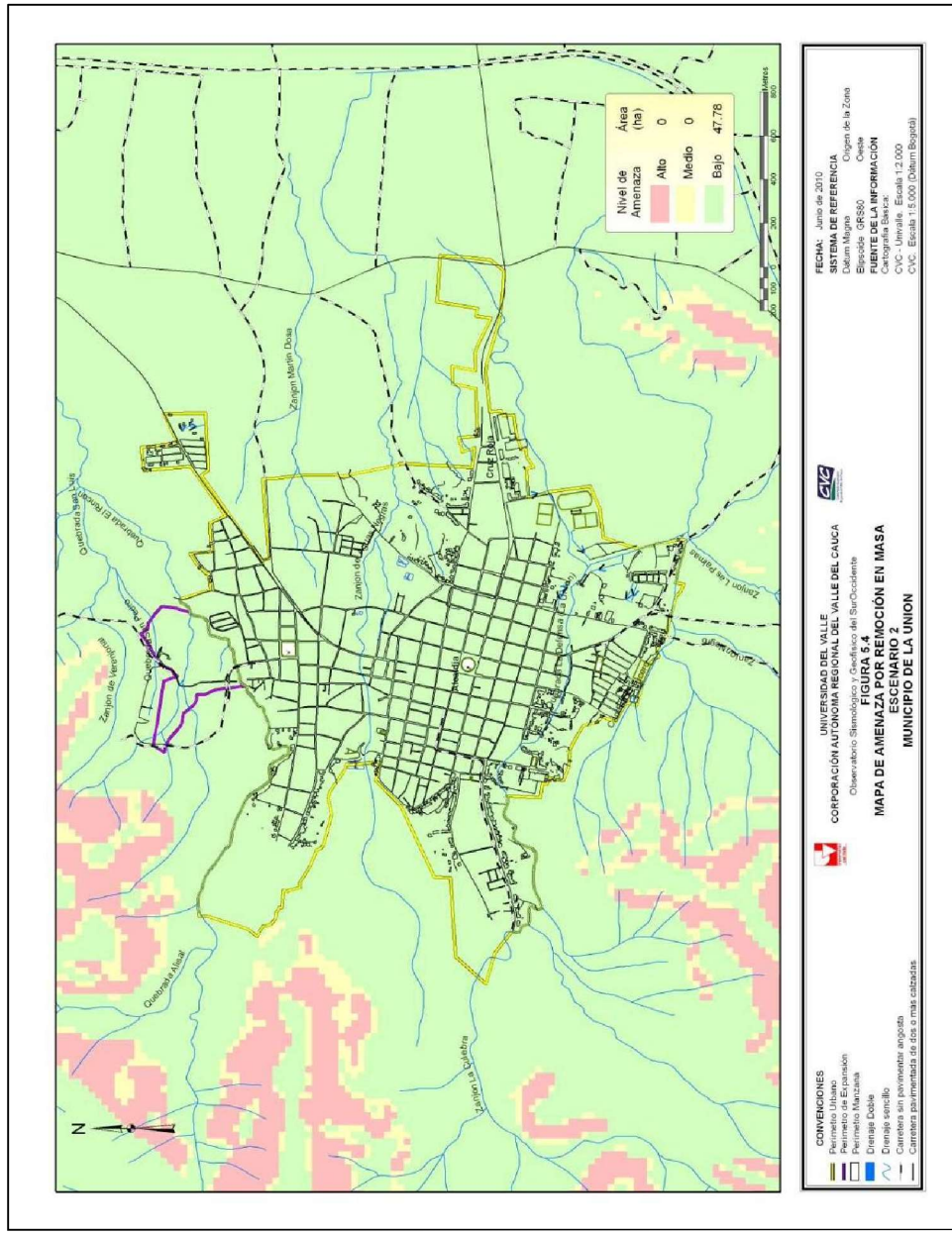


Figura 3.4 Mapa de amenaza, escenario 2.

### 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. Del Mapa 3.3 y la Figura 3.6 Mapa de amenaza en escenario 3, se deduce que el municipio se encuentra dentro de un área de amenaza baja a movimientos en masa (74.6%) mientras que sus alrededores, que corresponden a zonas con pendientes mayores a 20%, se encuentran en amenaza alta, sin generar daños sobre el casco urbano ni la zona de expansión (ver Figura 3.5). Una conclusión importante de los anteriores resultados es que se deben adelantar estudios de detalle escala 1:500, si se piensan realizar proyectos urbanísticos en las zonas montañosas, donde se ubiquen claramente las medidas de mitigación necesarias para disminuir la amenaza. Se recomiendan que dichos estudios tengan en cuenta los siguientes aspectos:

- Topografía de detalle 1:500
- Geología de detalle
- Hidrología
- Plan de exploración y ensayos de laboratorio, haciendo especial énfasis en los ensayos de corte directo y triaxiales.
- Análisis de estabilidad con las medidas de mitigación.
- Diseño de las medidas de mitigación.
- Recomendaciones de procesos constructivos.
- Costos de las medidas de mitigación

Finalmente se recomienda que el desarrollo urbanístico del municipio se extienda hacia las zonas planas, teniendo en cuenta las restricciones que darán los mapas de amenaza por inundación y avalanchas torrenciales.



Figura 3.5 Distribución porcentual de la amenaza, escenario 3.



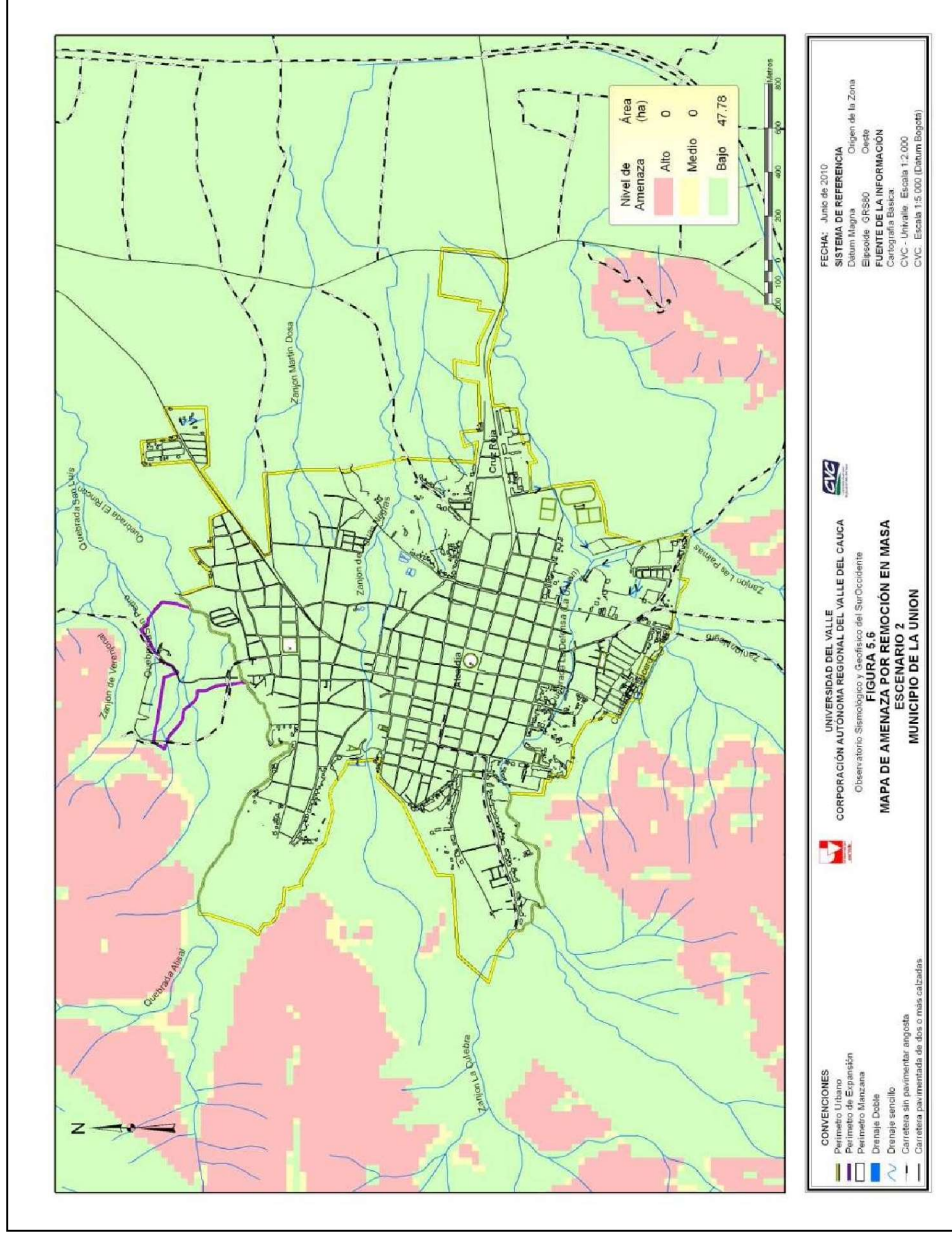


Figura 3.6 Mapa de amenaza, escenario 3.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**



## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. CONCLUSIONES**

✓ Actualmente y como se observo en el trabajo de campo, el municipio no presenta fenómenos de remoción en masa, por lo cual la susceptibilidad para toda la zona de estudio es baja, sin embargo cuando se realiza el análisis por amenaza para cada uno de los escenarios, se determino que existe una amenaza alta y media ante deslizamientos, esto debido a que para realizar dicho análisis se tienen en cuenta los efectos sobre las laderas de agentes externos tales como los sismos y lluvias intensas. Sin embargo dichas zonas no afectan el municipio ni la zona de expansión.

✓ El casco urbano y la zona de expansión, se encuentran dentro de amenaza baja dada cualquiera de las condiciones extremas supuestas, esto gracias a las suaves pendientes y a las buenas condiciones del suelo.

### **4.2. RECOMENDACIONES**

✓ Se recomienda que las zonas de expansión se ubiquen en la parte plana del municipio, es decir hacia el nororiente del mismo, pues ésta es una zona apta y que se encuentra libre de amenaza ante movimientos en masa, para lo anterior se debe tener en cuenta además los mapas de amenaza por inundación y avalanchas torrenciales.

✓ En el evento dado de adelantar proyectos urbanísticos hacia la parte montañosa, se recomienda adelantar estudios de detalle escala 1:500, donde se ubiquen claramente las medidas de mitigación necesarias para disminuir la amenaza.

## **5. BIBLIOGRAFÍA**

## **5. 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.