



**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 DAGUA**

**SUPERVISIÓN A CARGO DE
HIDRO-OCCIDENTE**

Santiago de Cali, Junio de 2010

TABLA DE CONTENIDO

1. EVALUACIÓN DE LA 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)	9
1.2.3. Orientación de la ladera (ORIENTACIÓN)	12
1.2.4. Usos del Suelo (USO)	12
1.2.5. Geología (GEOL)	15
1.3. ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD	17
2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA	22
2.1. ASPECTOS METODOLOGICOS GENERALES	22
2.2. MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO	23
2.3. DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES EN PROFUNDIDAD	24
2.4. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN	26
2.5. MECANISMOS DE FALLA MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE	26
2.5.1. Falla Planar en Talud Infinito	26
3. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR ESCENARIOS	29
3.1. FUERZA SÍSMICA	29
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
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
5. BIBLIOGRAFÍA	40
6. ANEXOS	41
Anexo 1.1: Geotecnia - Registro de exploración del subsuelo (apiques)	42
Anexo 2.1: Geotécnia - Ensayos de laboratorio	50
7. MAPAS	61

CONTENIDO DE TABLAS

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

CONTENIDO DE FIGURAS

<i>Figura 1.1</i> Diagrama de flujo general del método estadístico bivariado (Van Westen, 1996).	7
<i>Figura 1.2</i> Mapa de pendientes, municipio de Dagua.	10
<i>Figura 1.3</i> Mapa de curvatura, municipio de Dagua	11
<i>Figura 1.4</i> Mapa de orientación, municipio de Dagua.	13
<i>Figura 1.5</i> Mapa de usos del suelo, municipio de Dagua.	14
<i>Figura 1.6</i> Mapa de geología, municipio de Dagua.	16
<i>Figura 1.7</i> Mapa de Índice de Susceptibilidad.	19
<i>Figura 1.8</i> Distribución porcentual de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa.	20
<i>Figura 2.1</i> Esquema metodológico general. Evaluación de la amenaza por movimientos en masa.	23
<i>Figura 2.2</i> Localización en planta de secciones en estudio.	24
<i>Figura 2.3</i> Perfil geológico geotécnico tomado de la sección B-B'.	25
<i>Figura 2.4</i> Tipos de fallas traslacionales.	27
<i>Figura 3.1</i> Distribución porcentual de amenaza, escenario 1.	30
<i>Figura 3.2</i> Mapa de amenaza, escenario 1.	31
<i>Figura 3.3</i> Distribución porcentual de la amenaza, escenario 2.	32
<i>Figura 3.4</i> Mapa de amenaza, escenario 2.	33
<i>Figura 3.5</i> Distribución porcentual de la amenaza, escenario 3.	34
<i>Figura 3.6</i> Mapa de amenaza, escenario 3.	35

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

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

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):

Bivariate statistical analysis

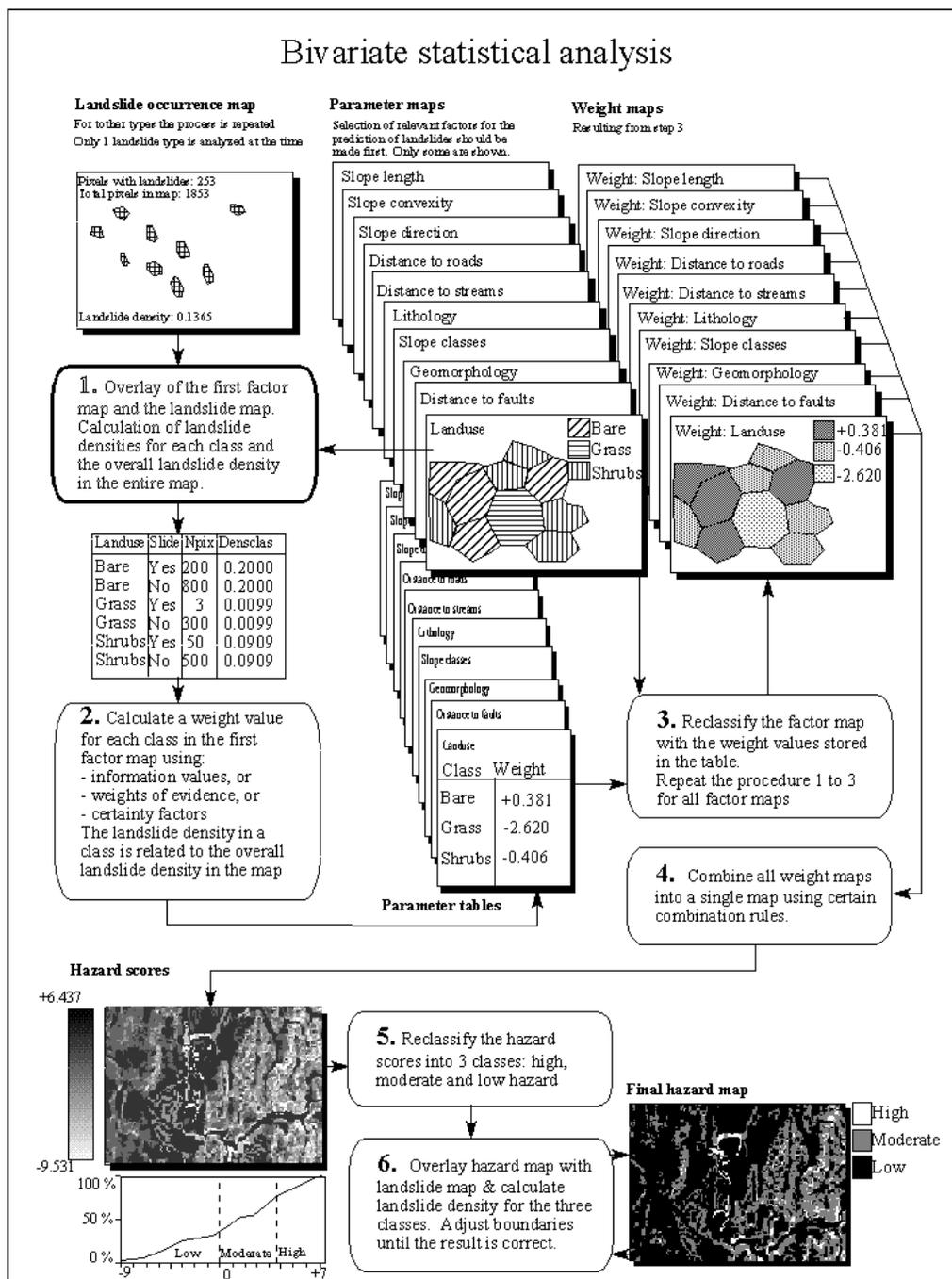


Figura 1.1 Diagrama de flujo general del método estadístico bivariado (Van Westen, 1996).

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

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

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 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.

Las pendientes dentro del área del casco urbano y de la zona de expansión se caracterizan por ser relativamente suaves que oscilan entre 0° a 20°, a diferencia de la zona occidental del municipio donde las pendientes son mayores de 20°.

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 DEM, 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, Ver Figura 1.3.

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. El municipio se caracteriza por ser plano a convexo, lo cual es un factor a favor de la estabilidad del terreno.

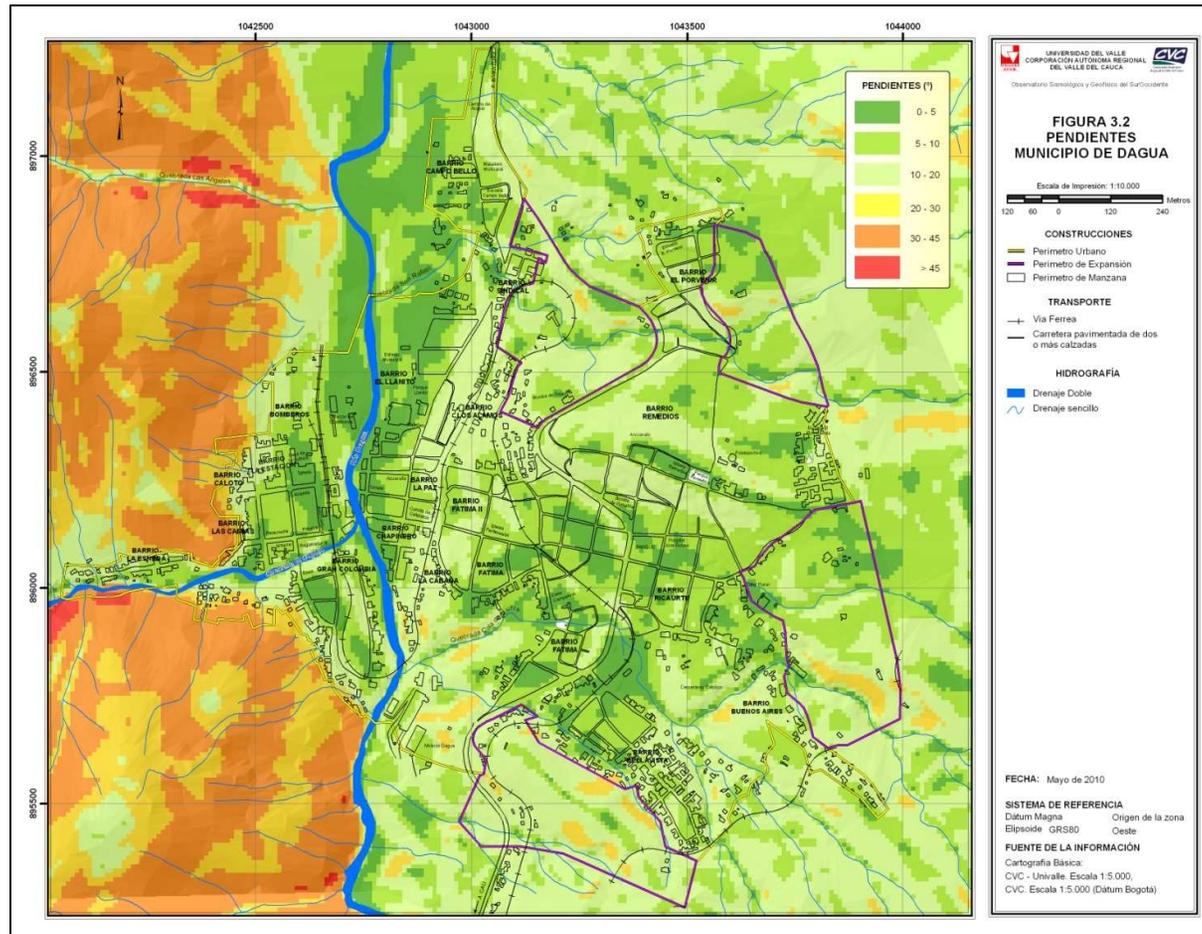


Figura 1.2 Mapa de pendientes, municipio de Dagua.

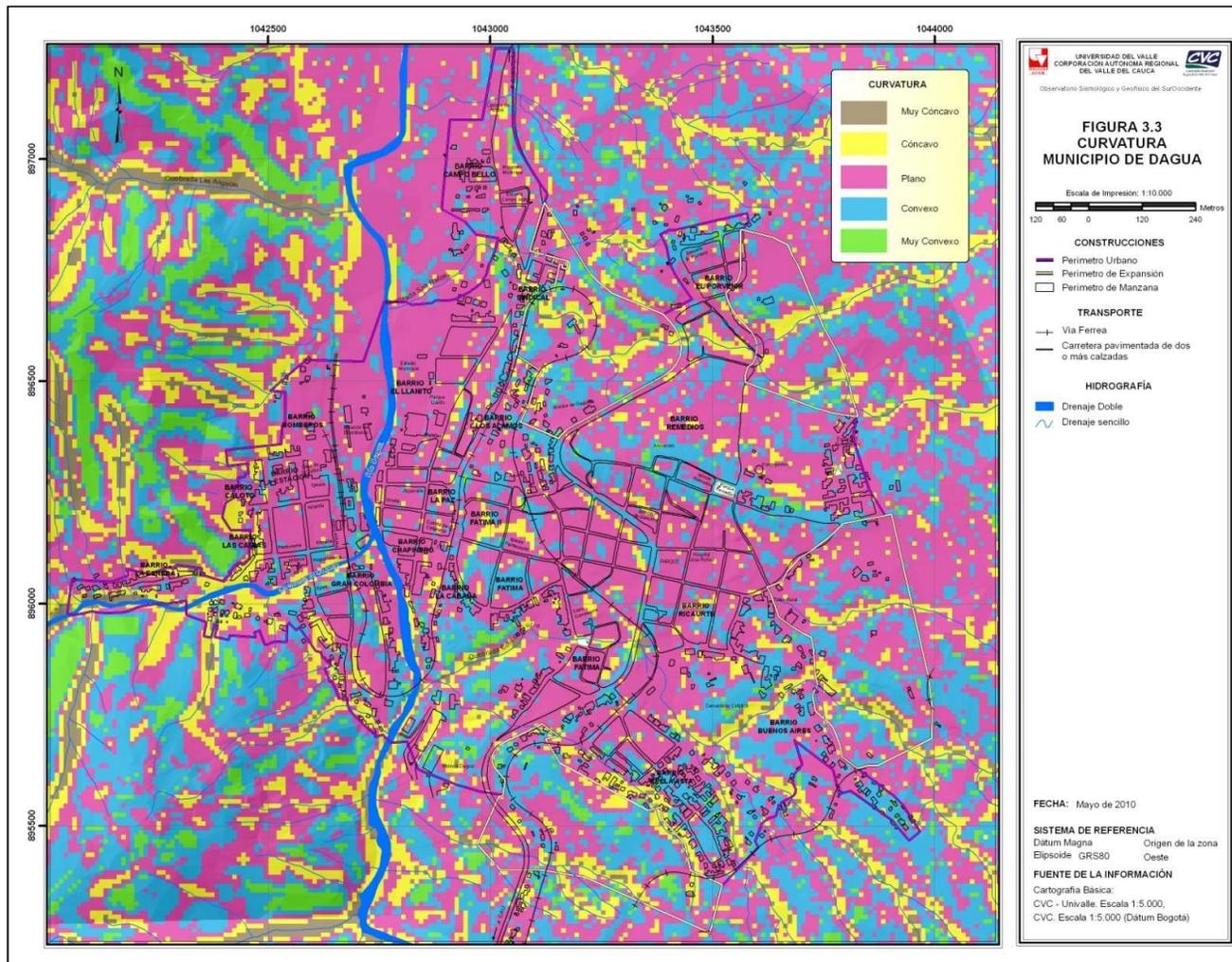


Figura 1.3 Mapa de curvatura, municipio de Dagua

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 Dagua. Nótese que la zona montañosa se caracteriza por la presencia de pastos. En general los problemas de inestabilidad y erosión se detectaron precisamente en la zona de pastos.

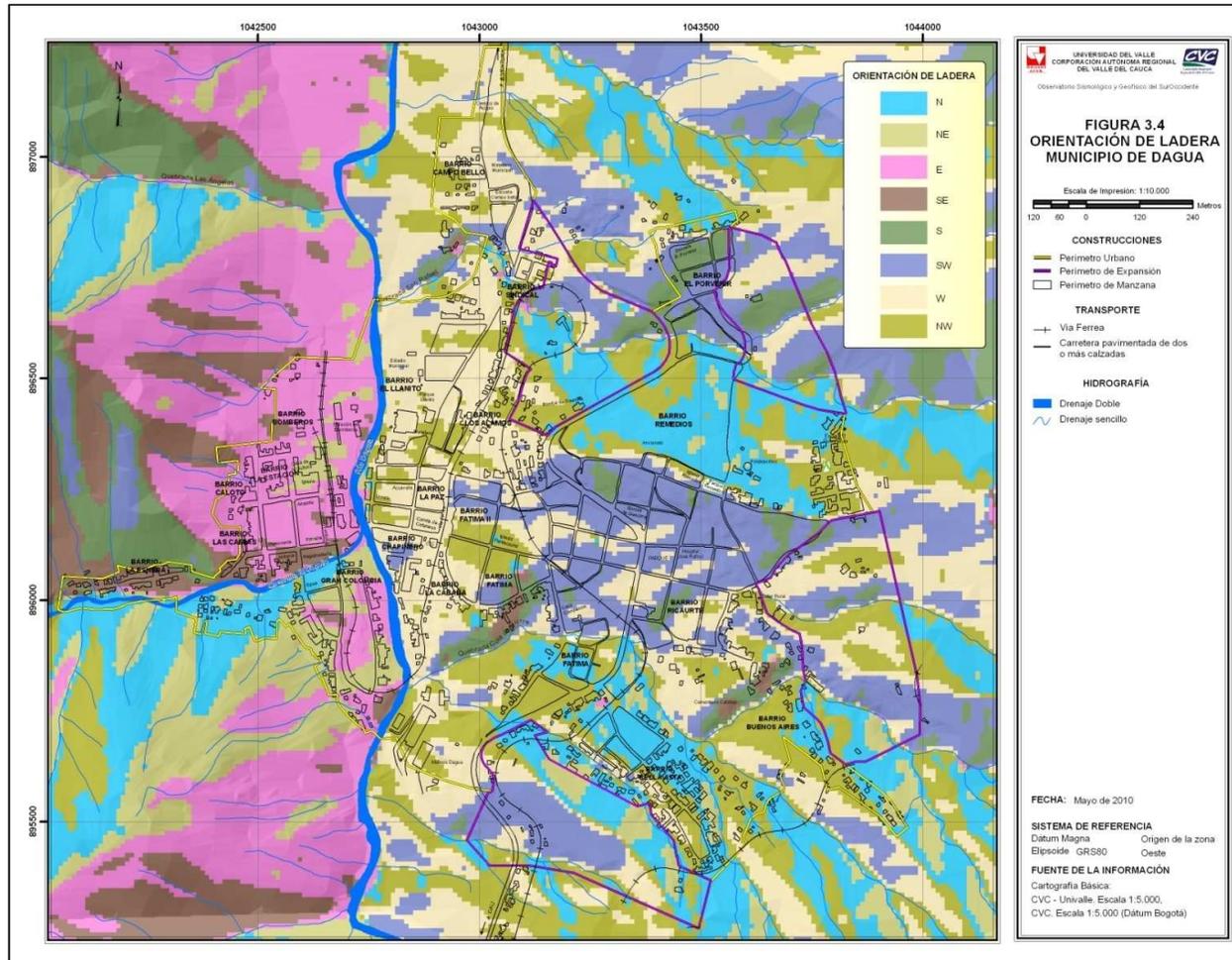


Figura 1.4 Mapa de orientación, municipio de Dagua.

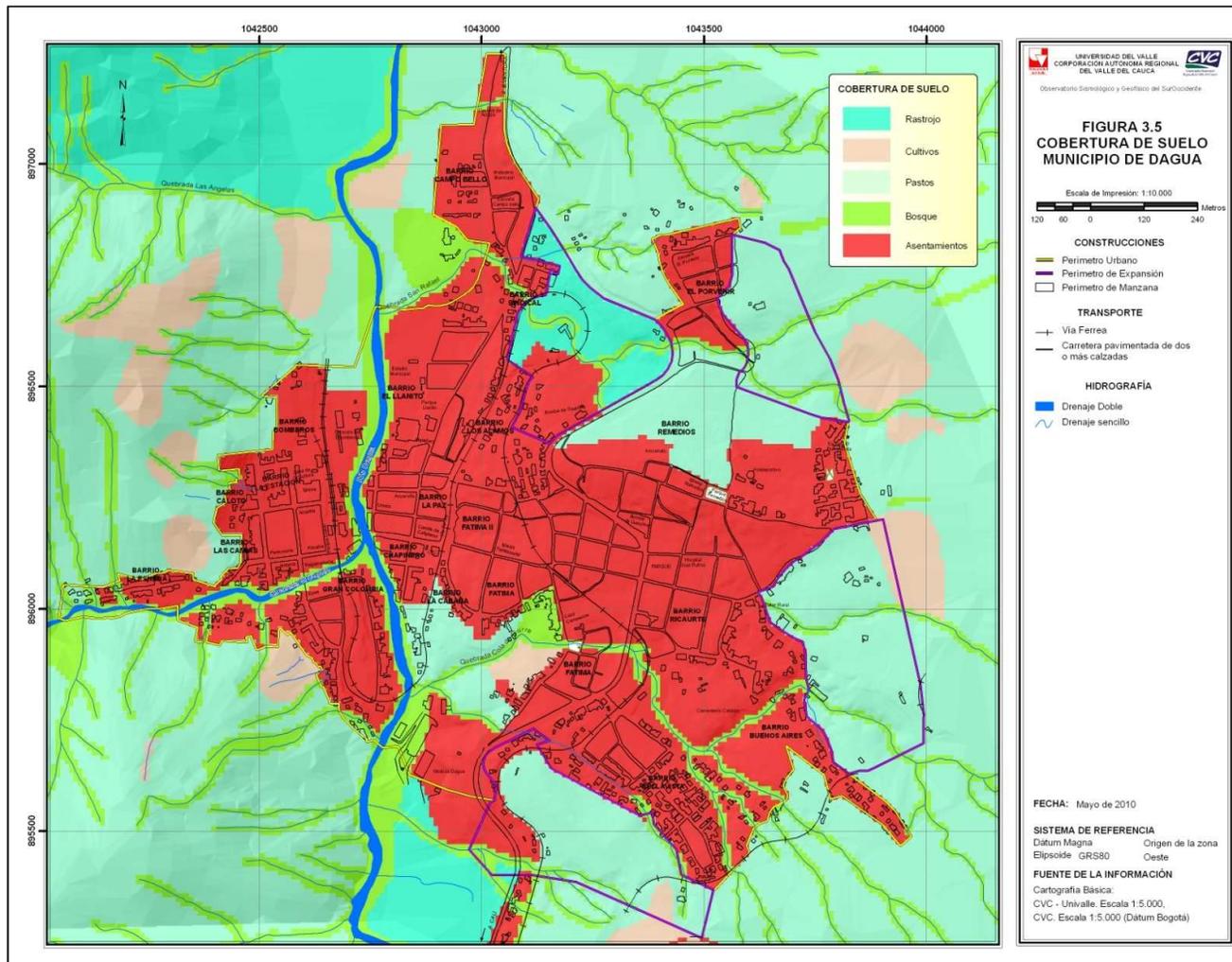


Figura 1.5 Mapa de usos del suelo, municipio de Dagua.

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 los suelos residuales de la formación Espinal.

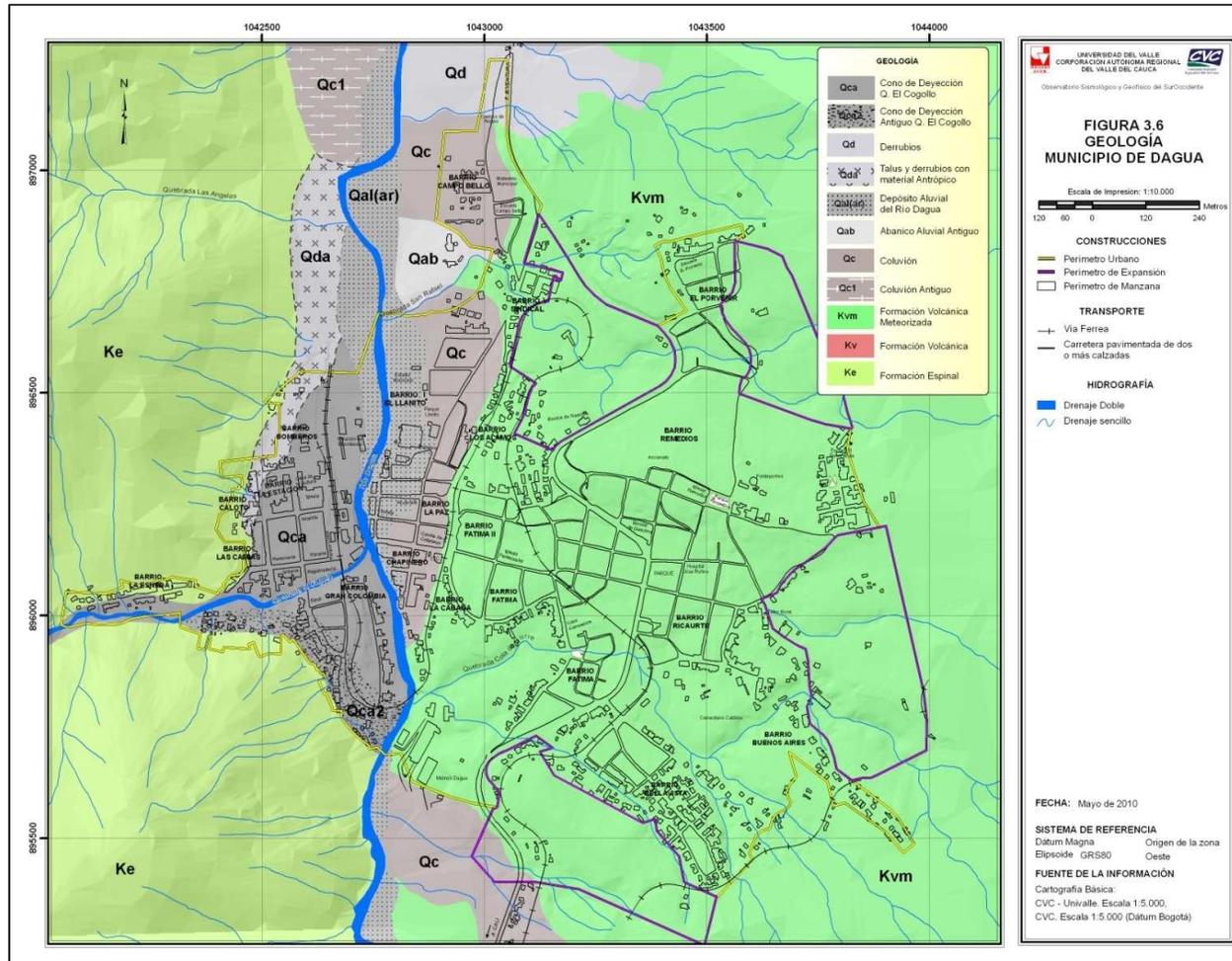


Figura 1.6 Mapa de geología, municipio de Dagua.

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 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 Mapa 1.1: Índice de Susceptibilidad para el municipio de Dagua.

✓ **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 a la zona occidental de laderas escarpadas en donde se pueden visualizar actuales nichos y procesos de erosión, como se puede observar en la Figura 1.7. Finalmente, en la Figura 1.8, se presenta la distribución de la susceptibilidad en el área de estudio. Nótese que la susceptibilidad alta abarca una gran proporción dentro de la zona de estudio (40%).

✓ **SUSCEPTIBILIDAD MEDIA:** Las zonas de susceptibilidad media están relacionadas con pendientes topográficas bajas del casco urbano. Nótese que las zonas de susceptibilidad media se caracterizan por presentar pendientes relativamente suaves, y en todos los casos inferiores a 25 grados, además corresponde a la zona con suelos residuales de la formación volcánica. Además abarca la mayor parte de la zona de estudio (45%).

¹ <http://webhelp.esri.com>

✓ **SUSCEPTIBILIDAD BAJA:** Zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad. Corresponde al sector muy plano con asentamientos y pastos, en la ribera del río Dagua.

Figura 1.7 Mapa de Índice de Susceptibilidad.



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 pasiva, infraestructura, conservación entre otros. Además permite restringir y condicionar el uso del suelo, en zonas de amenaza alta, de manera que se eviten futuros riesgos.

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.

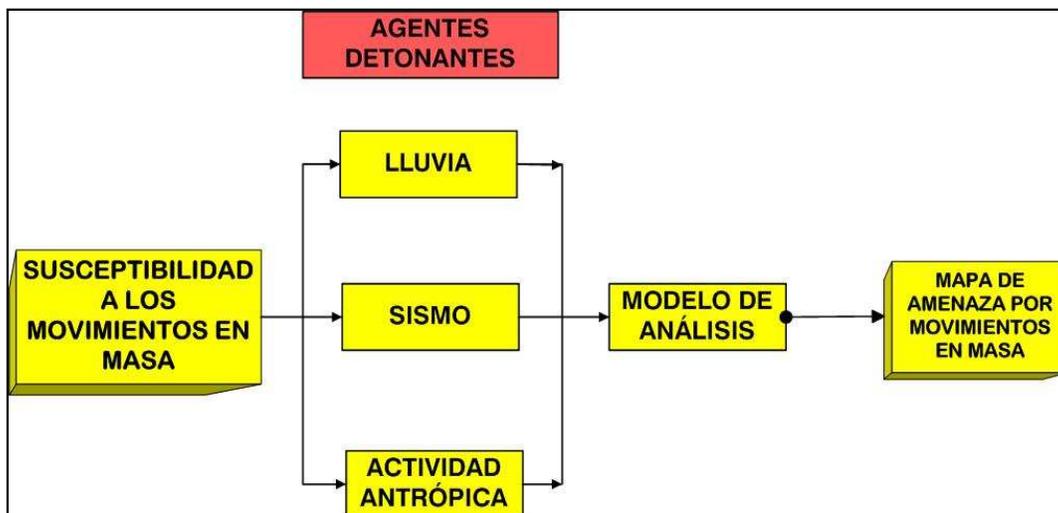


Figura 2.1 Esquema metodológico general. Evaluación de la amenaza por movimientos en masa.

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

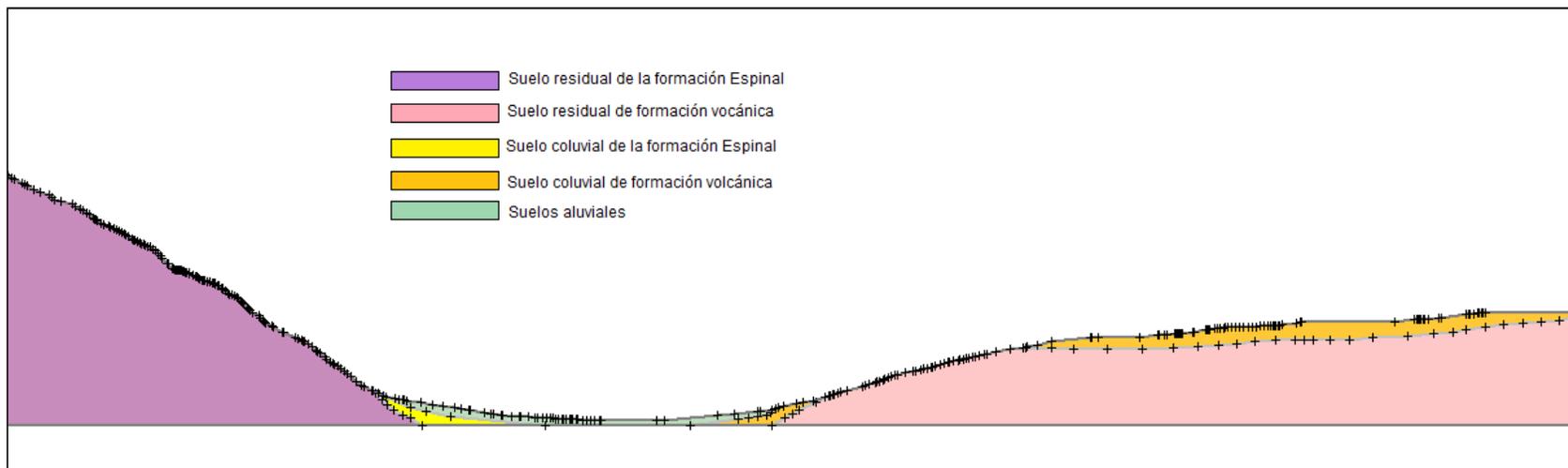


Figura 2.3 Perfil geológico geotécnico tomado de la sección B-B'.

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, ver 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 Volcánica	20.1	1.06	1.45
Suelo coluvial de la formación Volcánica	44.5	0.12	1.91
Suelo coluvial de la formación Espinal	18	0.2	1.50
Suelo residual de la formación Espinal	35	0.3	2.00
Llanura aluvial del rio Dagua	22.8	0.2	1.84
Abanico aluvial de la quebrada El Cogollo	41.6	1.6	1.36

2.5. MECANISMOS DE FALLA MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE

Dentro de la zona de estudio se identificó básicamente que el mecanismo de falla predominante en las laderas del municipio de Dagua es de tipo de falla 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 dos metros. 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.

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

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

Parcialmente saturado y sismo

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

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.

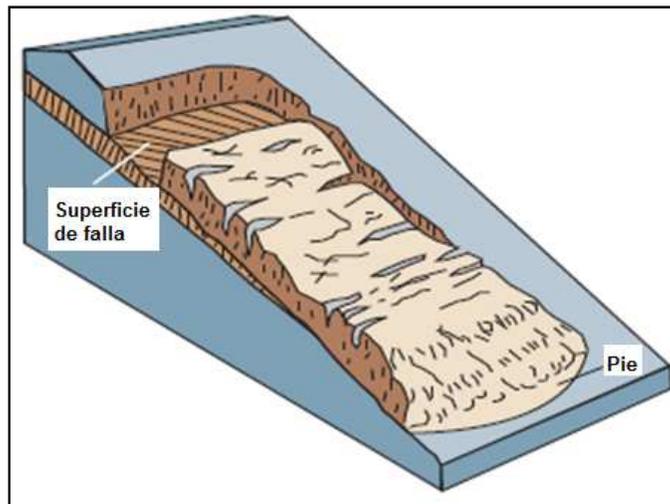


Figura 2.4 Tipos de fallas traslacionales.

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 – DPAE., 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 mecanismo de falla dominante es de tipo traslacional, lo cual implicó que el análisis sobre toda la zona de estudio se realizara 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. Bajo este escenario, se encuentra que el casco urbano y la zona de expansión no se verán afectados, a excepción de la zona occidental que se caracteriza por tener cerros montañosos escarpados con diferentes estados de erosión; en dicha zona se concentra el área de amenaza alta correspondiente al 9% del total de la amenaza que en gran parte corresponde a amenaza baja (83%) (Figura 3.2 y Mapa 5.1 “Mapa de amenaza en escenario 1”). Finalmente la distribución del nivel de amenaza dentro de la zona de estudio, se presenta en la Figura 3.1, destacándose el hecho que tanto el perímetro urbano como la zona de expansión se encuentran en un nivel de amenaza baja por fenómenos de remoción en masa.



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. Como consecuencia del sismo las laderas occidentales y parte del nororiente del municipio se verían afectadas (ver Figura 3.4 y Mapa 5.2 Amenaza escenario 2), siendo la primera la más afectada e implicando amenaza alta en los barrios: Bomberos, Caloto y Las Camias; cabe anotar que un pequeño porcentaje del área correspondiente a amenaza alta, se encuentra dentro de la zona expansión y el casco urbano.

Como se puede observar en la Figura 3.3, aunque el mayor porcentaje de la amenaza es baja (57%), también se tiene un gran porcentaje de amenaza alta correspondiente al 30%.



Figura 3.3 Distribución porcentual de la amenaza, escenario 2.

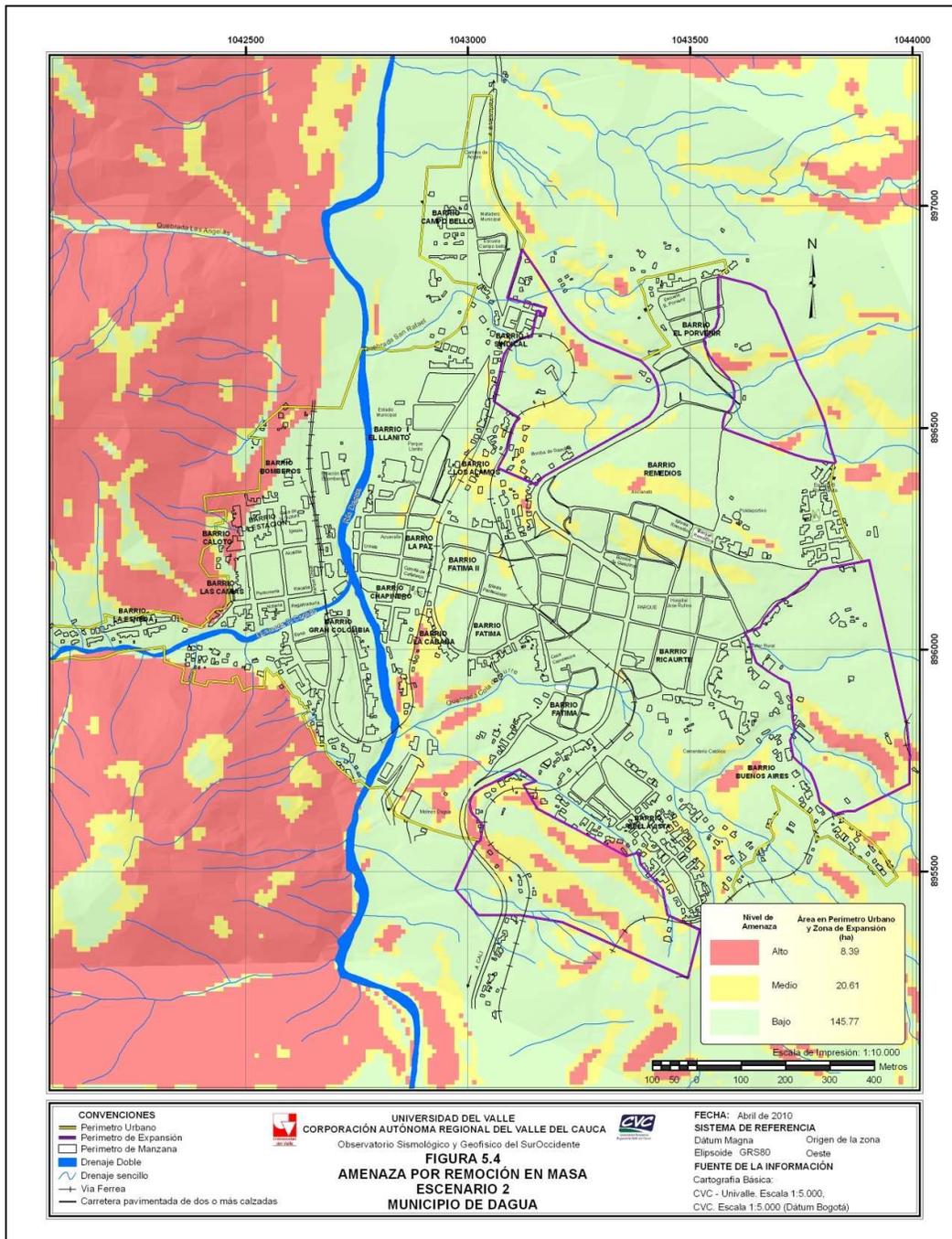


Figura 3.4 Mapa de amenaza, escenario 2.

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 que generarán un aumento del nivel freático.

Así como en los escenarios anteriores, la zona más afectada será la correspondiente a las laderas occidentales del área de estudio. Además, hacia la parte suroriental y nororiental también se ven los efectos de la acción de los dos agentes simultáneamente (lluvia y sismo) pasando de amenaza baja a amenaza media y alta (Figura 3.6 y Ver Mapa 3.3 “Mapa de amenaza en escenario 3”).

Es importante destacar que aunque el mayor porcentaje del área de estudio está ubicado en zona de amenaza baja (54%), existe un gran porcentaje de amenaza alta y media que afectan el casco urbano y la zona de expansión (Figura 3.5).



Figura 3.5 Distribución porcentual de la amenaza, escenario 3.

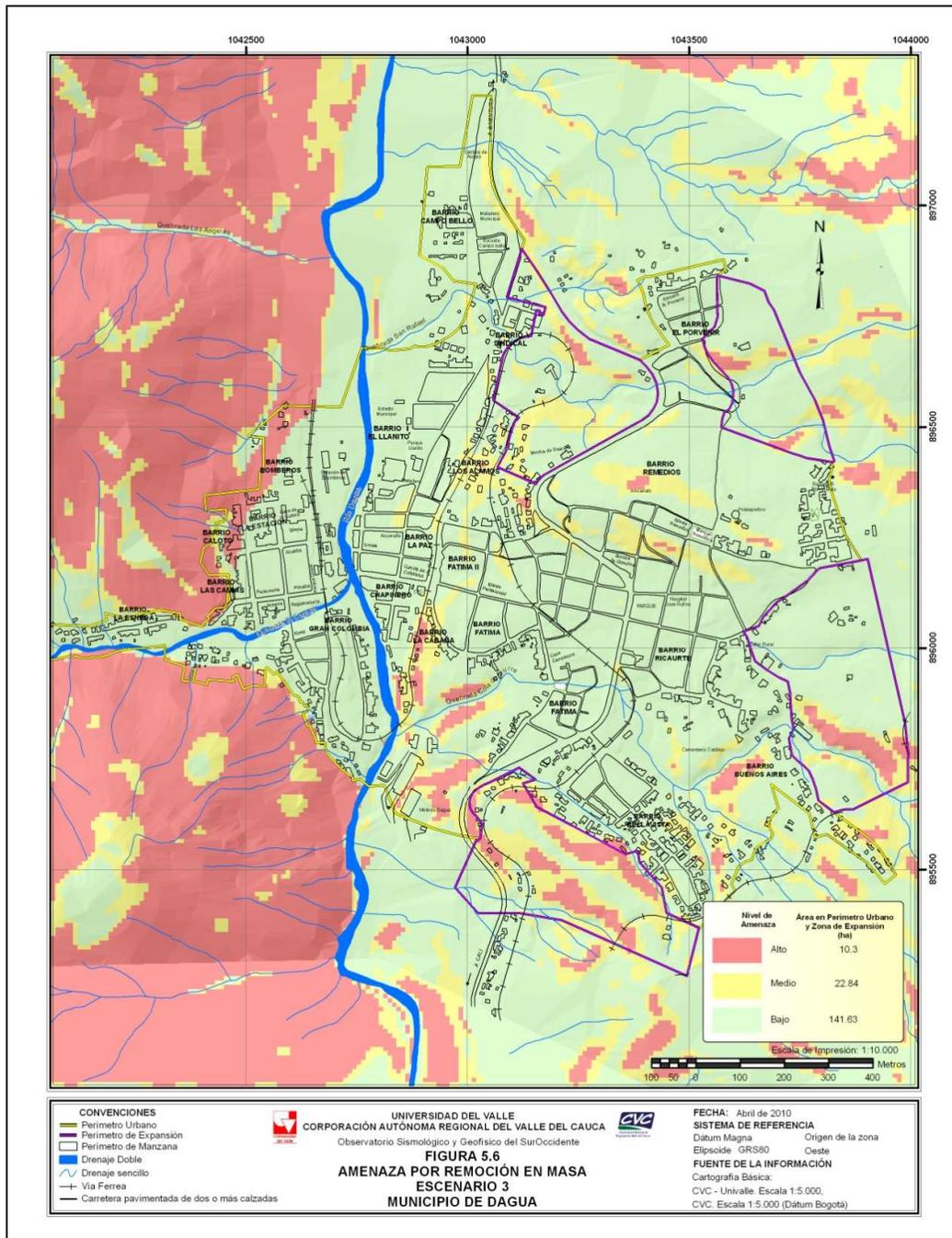


Figura 3.6 Mapa de amenaza, escenario 3.

Teniendo en cuenta los resultados de los anteriores escenarios, se destacan 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, como puede ser el caso de los barrios: El Llanito y Chapinero.

AMENAZA MEDIA: Estos sectores se caracterizan por presentar pendientes intermedias, y se encuentran bien distribuidos en toda la zona de estudio, incluyendo el casco urbano y la zona de expansión. Estos sectores se caracterizan adicionalmente, por presentar una buena cobertura vegetal. Este tipo de amenaza está presente en algunas zonas dentro del casco urbano correspondiente a los barrios: Los Álamos y Remedios, un sector del barrio Cabañas y gran parte de la zona de expansión de la zona sur del municipio.

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 es 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. Para Dagua, la zona de amenaza alta corresponde en gran parte al occidente del municipio, afectando la parte alta de los barrios: Bomberos, Caloto y Las Camias, además dentro del casco urbano los barrios en amenaza alta son: La Cabaña y Bella Vista. Por otro lado, en la parte aledaña del municipio los nichos y cárcavas existentes se encuentran dentro de amenaza alta.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

✓ La zona occidental del municipio de Dagua es altamente susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa, y como se observó en campo el mecanismo de falla dominante es el planar, con consecuencias desfavorables en especial hacia la zona occidental de cerros montañosos escarpados, en donde la presencia de algún agente o ambos agentes detonantes, se ve reflejado en la inestabilidad del terreno y como consecuencia amenaza alta en toda esta zona. Dada la fuerte pendiente del terreno, se recomienda restringir el uso del suelo.

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.

6. ANEXOS

Anexo 1.1: Geotecnia - Registro de exploración del subsuelo (apiques)

AP1

Coordenadas: N 897046

E 1042862

AP1	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	MATERIAL ORGANICO CON PRESENCIA DE RAICILLAS	
0.2		
0.4	LIMO ARENO ARCILLOSO DE COLOR AMARILLO CON OXIDACIONES DE UNA CONSISTENCIA MEDIA	
0.6		
0.8		
1.0	LIMO ARENO ARCILLOSO DE COLOR AMARILLO CON OXIDACIONES DE UNA CONSISTENCIA MEDIA	
1.2		
1.4		
1.6		
1.8		

AP2

Coordenadas: N 896360

E 1042688

AP2	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	MATERIAL ORGANICO	
0.2		
0.4	ARCILLA COLOR CAFÉ CLARO CON OXIDACIONES, DE UNA CONSISTENCIA MEDIA	
0.6		
0.8		
1.0		
1.2		
1.4	ARCILLA COLOR HABANO DE CONSISTENCIA MEDIA	
1.6		
1.8		

AP3

Coordenadas: N 895822

E 1042772

AP3	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	MATERIAL ORGANICO CON PRESENCIA DE RAICILLAS	
0.2		
0.4	LIMO ARCILLO ARENOSO COLOR HABANO DE CONSISTENCIA MEDIA	
0.6		
0.8		
1.0		
1.2	LIMO ARENO ARCILLOSO COLOR CAFÉ DE CONSISTENCIA MEDIA	
1.4		
1.6		
1.8		
2.0		

AP4

Coordenadas: N 895873

E 1042456

AP4	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	LIMO ARENOSO COLOR AMARILLO, PRESENTA GRAVAS ANGULARES DE 2 CM	
0.2		
0.4	LIMO ARCILLO ARENOSO DE COLOR CAFÉ CON TONOS AMARIOS DE CONSISTENCIA FIRME	
0.6		
0.8		
1.0		
1.2		
1.4	LIMO ARCILLO ARENOSO DE COLOR AMARILLO DE UNA CONSISTENCIA FIRME	
1.6		
1.8		
2.0		
2.2		

AP5

Coordenadas: N 897228

E 1043255

AP5	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	ARENA DE GRANO MEDIO, COLOR AMARILLO	
0.2		
0.4		
0.6	LIMO ARCILLO ARENOSO DE COLOR BLANCO CON TONOS ROJOS DE CONSISTENCIA MEDIA	
0.8		
1.0		
1.2		
1.4		
1.6	LIMO ARCILLOSO DE COLOR ROJO, DE UNA CONSISTENCIA FIRME	
1.8		
2.0		
2.2		

AP6

Coordenadas: N 896658

E 1043184

AP6	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	MATERIAL ORGANICO CON PRESENCIA DE RAICILLAS	
0.2		
0.4		
0.6	LIMO ARENO ARCILLOSO DE COLOR AMARILLO DE UNA CONSISTENCIA	
0.8		
1.0		
1.2		
1.4		
1.6	GRAVAS DE 3-5 CM EN MATRIZ LIMO ARENO ARCILLOSA COLOR GRIS DE HUMEDAD MUY BAJA CONSISTENCIA MEDIA	
1.8		

AP7

Coordenadas: N 896550

E 1043429

AP7	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	LIMO ORGANICO CON PRESENCIA DE RAICILLAS	
0.2	LIMO ARENOSO COLOR CAFÉ DE CONSISTENCIA MEDIA	
0.4	ARENA COLOR AMARILLO DE GRANO MEDIO	
0.6		
0.8		
1.0		
1.2		
1.4		
1.6		

AP8

Coordenadas: N 896456

E 1043551

AP8	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	MATERIAL ORGANICO	
0.2	LIMO ARENOSO COLOR AMARILLO DE GRANO MEDIO	
0.4	LIMO ARCILLO ARENOSO COLOR CAFÉ CON GRAVAS ANGULARES DE ENTRE 2-3 CM DE CONSISTENCIA MEDIA	
0.6		
0.8		
1.0		
1.2		
1.4		
1.6		
1.8		
2.0		

AP9

Coordenadas: N 896122

E 1043714

AP9	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8	MATERIAL ORGANICO CON PRESENCIA DE RAICILLAS	
	LIMO ARCILLO ARENOSO COLOR AMARILLO DE CONSISTENCIA MEDIA	

AP10

Coordenadas: N 896850

E 1043460

AP10	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8	MATERIAL ORGANICO CON PRESENCIA DE RAICILLAS	
	LIMO ARENOSO COLOR AMARILLO, DE GRANO MEDIO	
	LIMO ARENO ARCILLOSO DE COLOR CAFÉ CON OXIDACIONES DE UNA CONSISTENCIA MEDIA	

AP11

Coordenadas: N 895427

E 1043720

AP11	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	MATERIAL ORGANICO CON PRESENCIA DE RAICILLAS	
0.2		
0.4	LIMO ARENO ARCILLOSO COLOR CAFÉ CON GRAVAS REDONDEADAS DE 3-4 CM	
0.6		
0.8		
1.0		
1.2		
1.4	LIMO ARENO ARCILLOSO COLOR CAFÉ DE CONSISTENCIA MEDIA	
1.6		
1.8		

AP12

Coordenadas: N 895469

E 1043303

AP12	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	MATERIAL ORGANICO CON RAICILLAS	
0.2		
0.4	ARENA COLOR AMARILLO CON TONOS NEGROS DE HUMEDAD BAJA	
0.6		
0.8		
1.0	LIMO ARENO ARCILLOSO COLOR AMARILLO	
1.2		
1.4		
1.6	LIMO ARCILLO ARENOSO COLOR CAFÉ DE CONSISTENCIA MEDIA	
1.8		
2.0		

AP13

Coordenadas: N 895228

E 1043847

AP13	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	MATERIAL ORGANICO	
0.2	ARCILLA LIMOSA COLOR GRIS DE CONSISTENCIA MEDIA Y HUMEDAD BAJA	
1.0	LIMO ARCILLOSO COLOR CAFÉ CON OXIDACIONES DE UNA CONSISTENCIA MEDIA	
1.8		

AP14

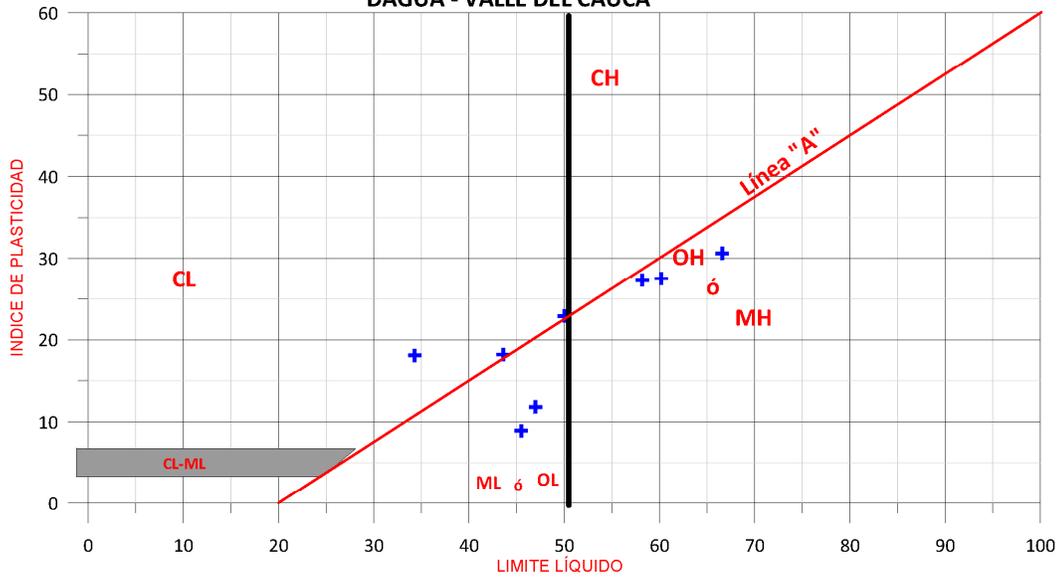
Coordenadas: N 895427

E 1043135

AP14	CARACTERÍSTICAS	MUESTRA
0.0	LIMO ARENOSO COLOR AMARILLO DE UNA HUMEDAD MUY BAJA	
0.8	LIMO ARCILLO ARENOSO DE COLOR BLANCO CON TONOS ROSADOS DE UNA CONSISTENCIA MEDIA	
1.4	LIMO ARCILLOSO DE COLOR DE CONSISTENCIA MEDIA	
1.8		

Anexo 2.1: Geotécnia - Ensayos de laboratorio

**CARTA DE PLASTICIDAD PARA LA CLASIFICACIÓN
EN LABORATORIOS DE SUELOS FINOS
DAGUA - VALLE DEL CAUCA**



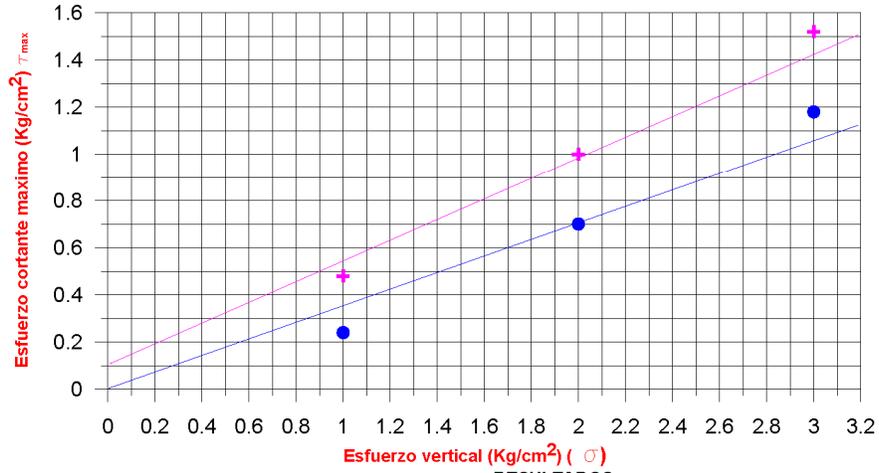
NOMBRES TÍPICOS

ML: Limos orgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillas con ligera plasticidad.
 CL: Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con gravas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras.
 OL: Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
 MH: Limos inorgánicos, suelos limoso a arenoso finos micáceos o con diatomeas, limos elásticos.
 CH: Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas grasas.
 OH: Arcillas orgánicas de plasticidad medi a alta.

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

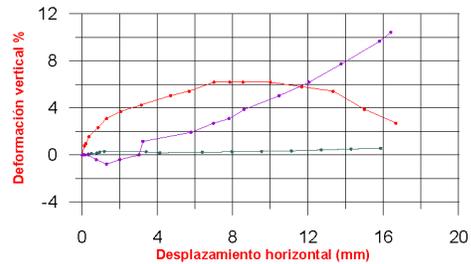
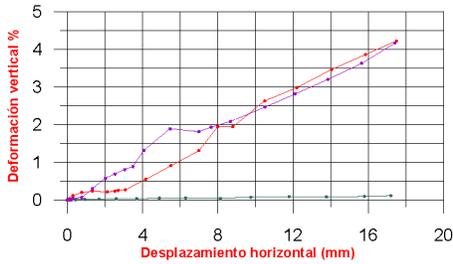
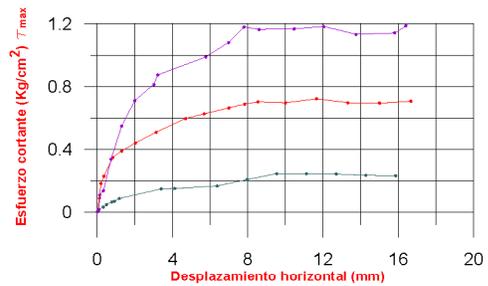
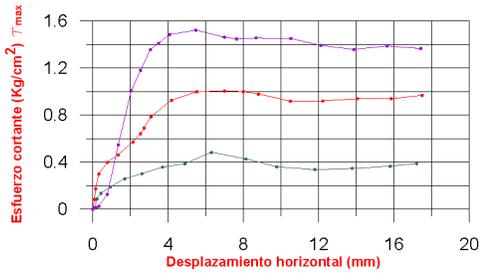
PROYECTO: VALLE DEL CAUCA
Prof(m): 11.00-12.00

SONDEO: 1
SITIO: DAGUA



punto 1 ———
 punto 2 ———
 punto 3 ———
CONDICIÓN PICO

RESULTADOS
 ϕ' pico = 27.40°, c' pico = 0.10 Kg/cm²
 ϕ' residual = 22.80°, c' residual = 0.00 Kg/cm²

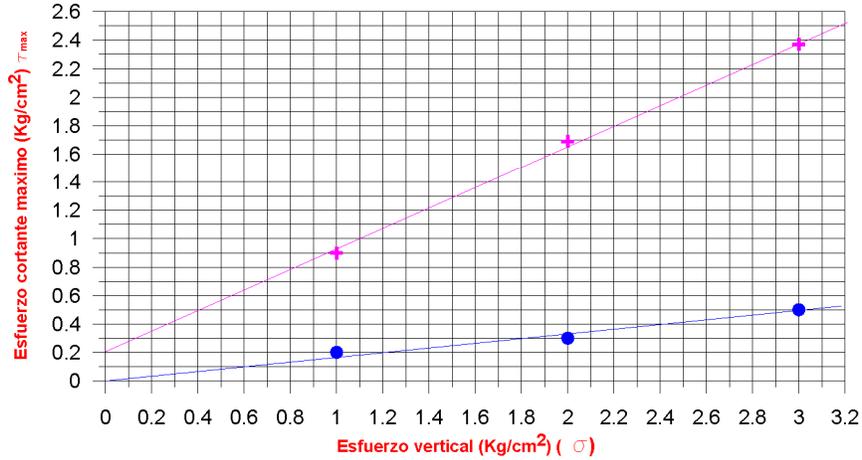


CI AMBIENTAL

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

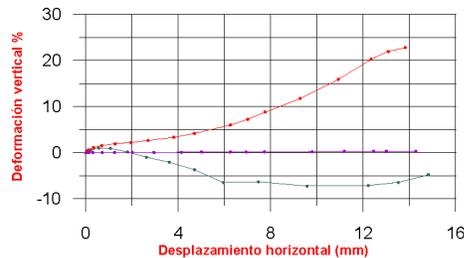
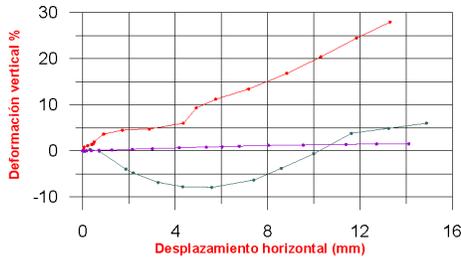
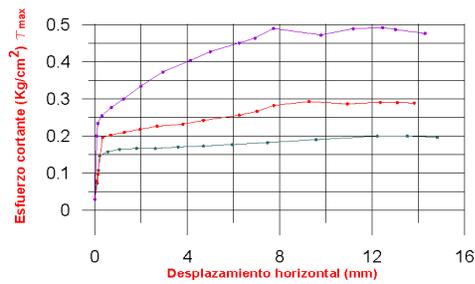
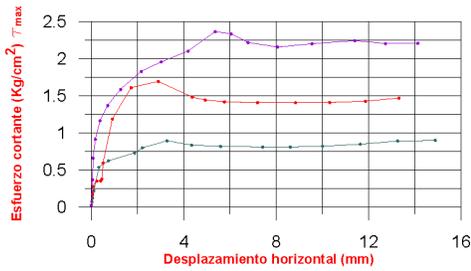
PROYECTO: VALLE DEL CAUCA
Prof(m): 10.50-12.00

SONDEO: 2
SITIO: DAGUA



CONDICIÓN PICO

RESULTADOS
 $\phi'_{pico} = 39.8^\circ$, $c'_{pico} = 0.20 \text{ Kg/cm}^2$
 $\phi'_{residual} = 12.56^\circ$, $c'_{residual} = 0.00 \text{ Kg/cm}^2$

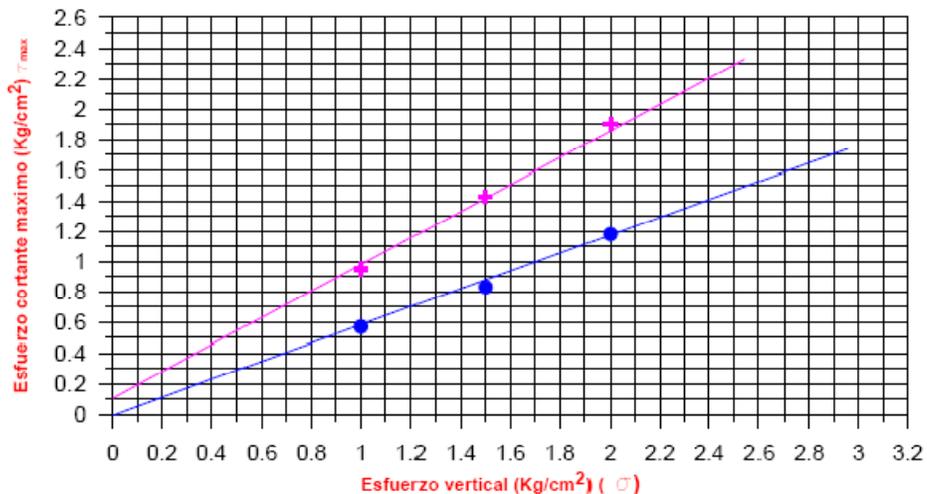


CI AMBIENTAL

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

PROYECTO: VALLE DEL CAUCA
Prof(m): 3.00-4.50

SONDEO: 2
SITIO: DAGUA

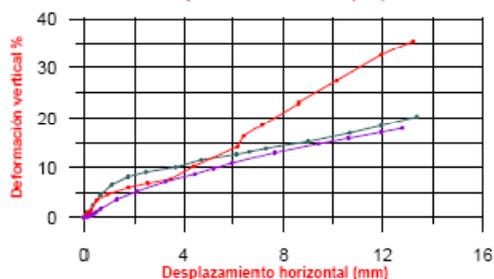
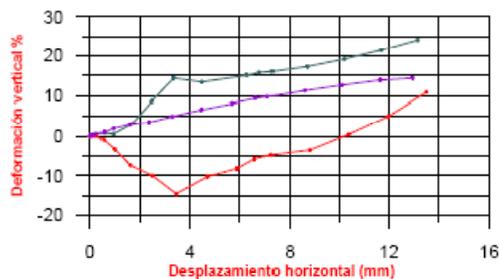
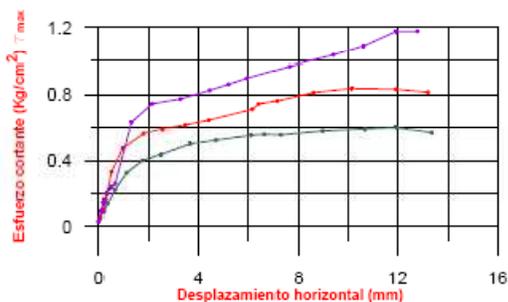
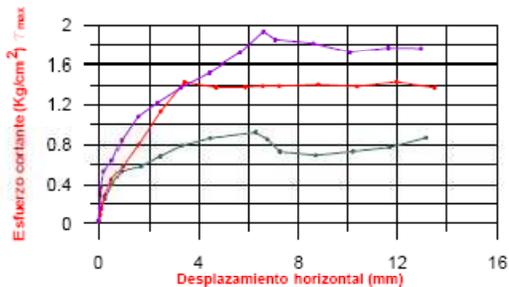


punto 1 ———
punto 2 - - - - -
punto 3 - - - - -

CONDICIÓN PICO

RESULTADOS
 $\phi'_{pico} = 44.5^\circ$, $c'_{pico} = 0.12 \text{ Kg/cm}^2$
 $\phi'_{residual} = 32.3^\circ$, $c'_{residual} = 0.00 \text{ Kg/cm}^2$

CONDICIÓN RESIDUAL

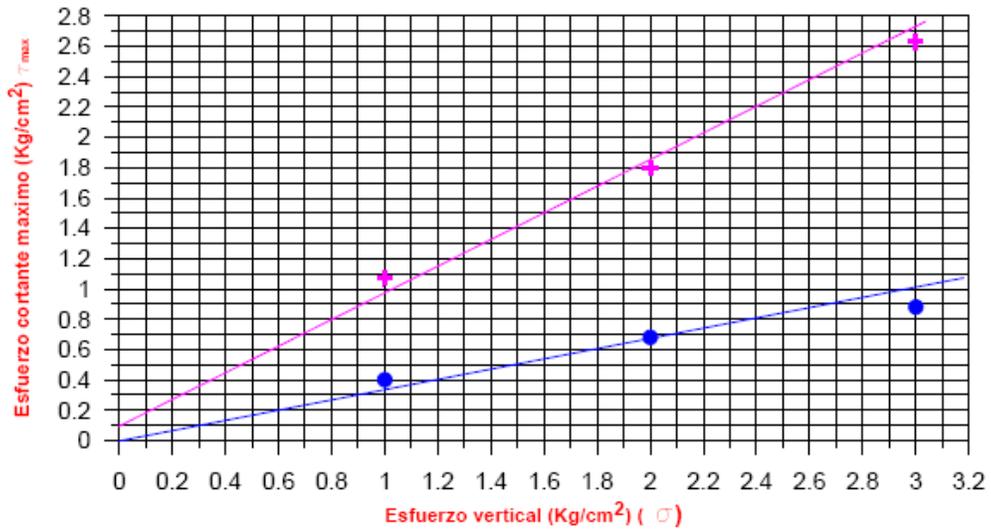


CI AMBIENTAL

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

PROYECTO: VALLE DEL CAUCA
Prof(m): 9.00-10.50

SONDEO: 2
SITIO: DAGUA



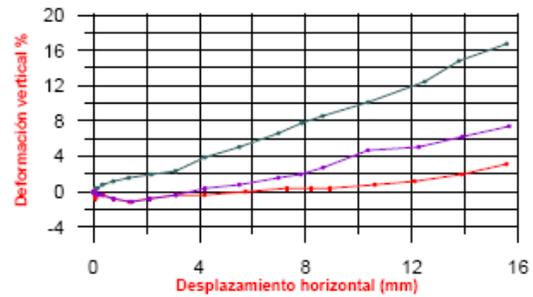
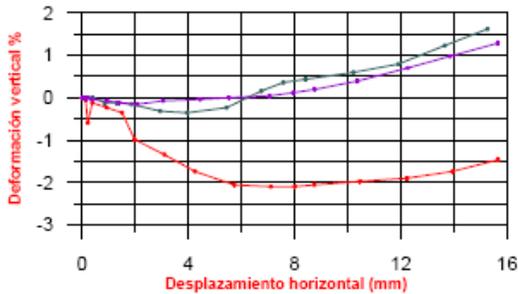
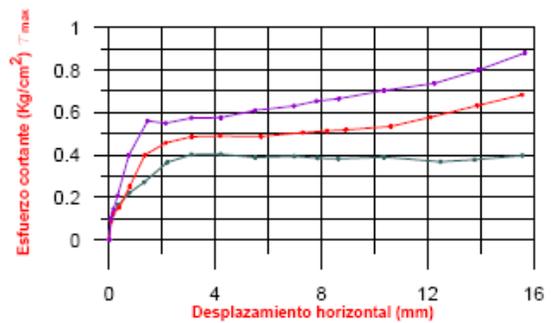
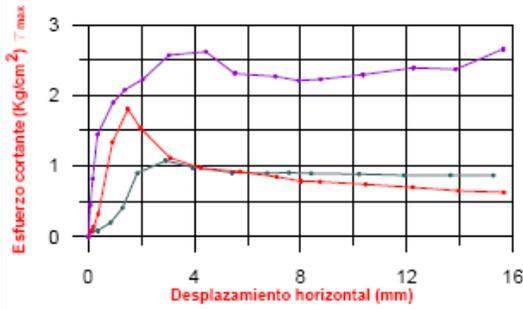
CONDICIÓN PICO

RESULTADOS

$\phi^{\text{pico}} = 44.8^\circ$, $c^{\text{pico}} = 0.10 \text{ Kg/cm}^2$

$\phi^{\text{residual}} = 20.5^\circ$, $c^{\text{residual}} = 0.00 \text{ Kg/cm}^2$

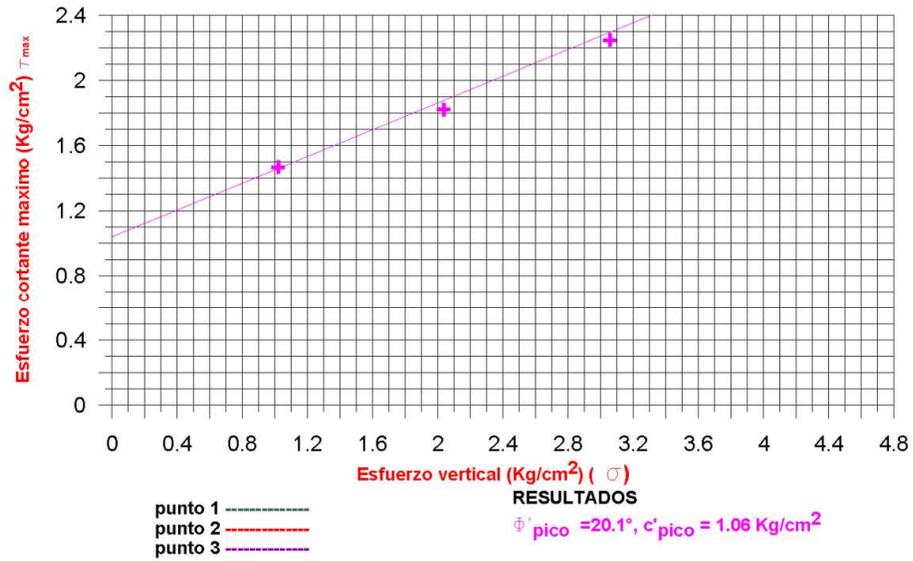
CONDICIÓN RESIDUAL



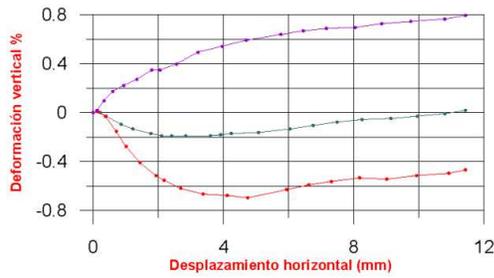
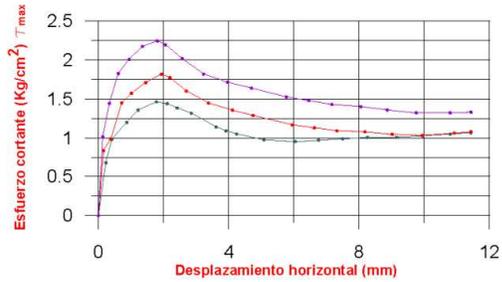
CI AMBIENTAL

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

PROYECTO: DAGUA **SONDEO:** S3 **MUESTRA:** **Prof(m):** 4.50-5.00
SITIO: SECTR ORIENTAL BARRIO RICAURTE **Fecha:** Diciembre de 2009



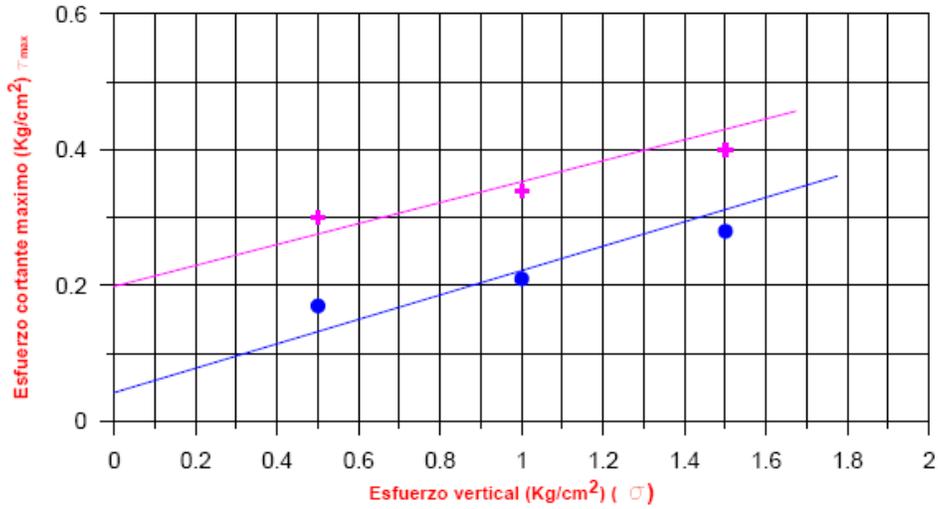
CONDICIÓN PICO



ENSAYO DE CORTE DIRECTO

PROYECTO: VALLE DEL CAUCA
Prof(m): 0.00-1.80

APIQUE: 5
SITIO: DAGUA



punto 1
punto 2
punto 3

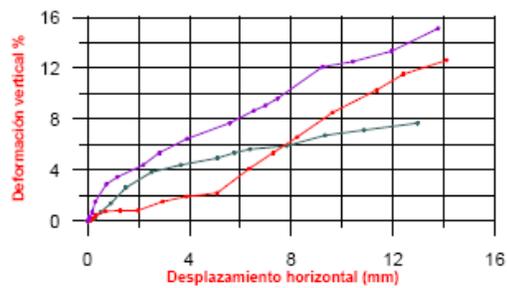
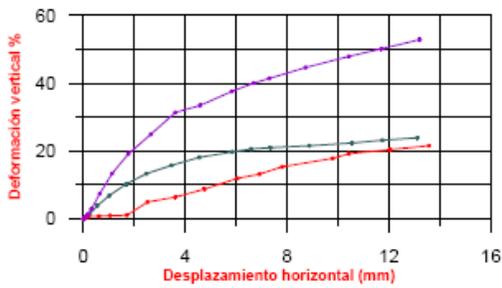
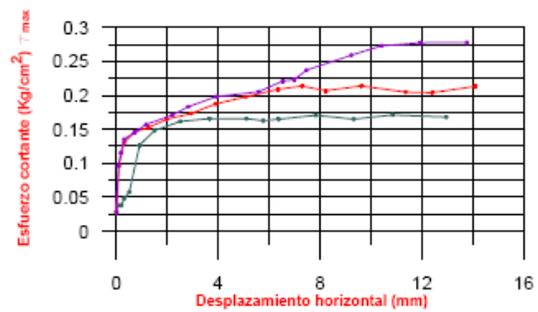
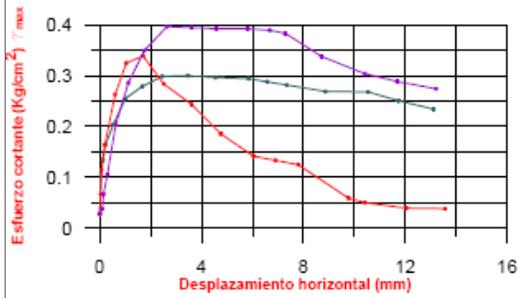
CONDICIÓN PICO

RESULTADOS

ϕ' pico = 14.8°, c' pico = 0.20 Kg/cm^2

ϕ' residual = 9.5°, c' residual = 0.06 Kg/cm^2

CONDICIÓN RESIDUAL

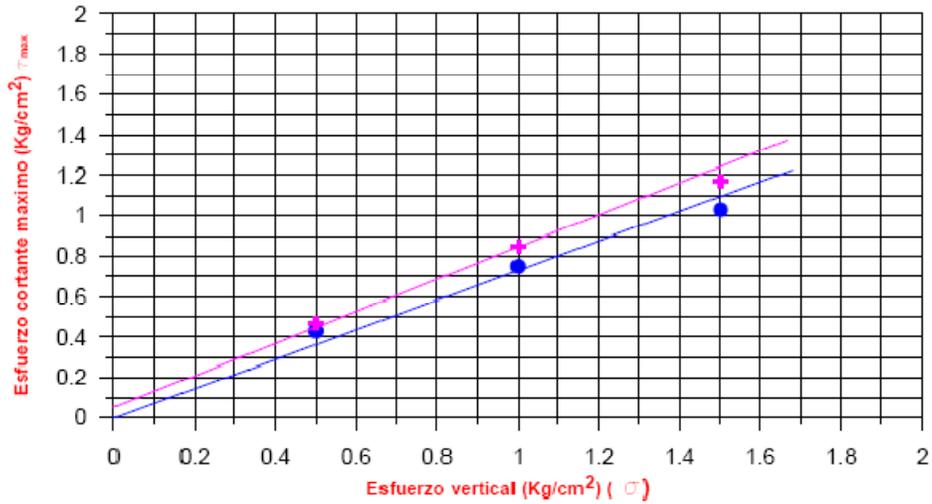


CI AMBIENTAL

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

PROYECTO: VALLE DEL CAUCA
Prof(m): 0.00-2.90

APIQUE: 9
SITIO: DAGUA



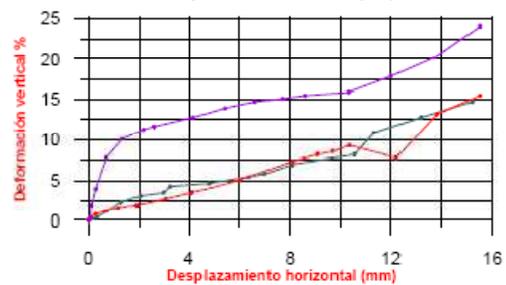
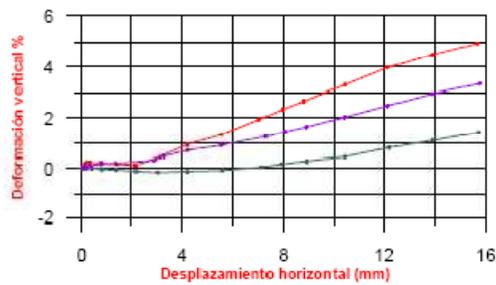
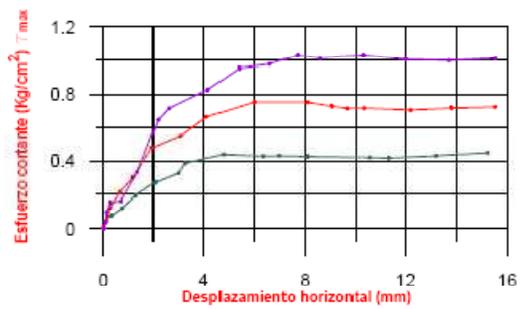
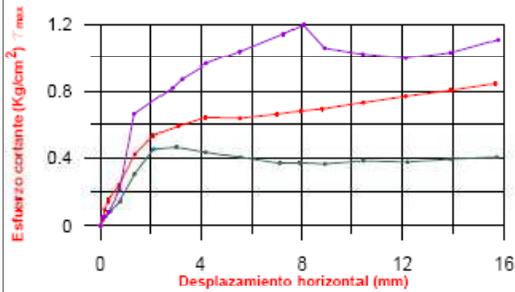
punto 1 ———
punto 2 ———
punto 3 ———

CONDICIÓN PICO

RESULTADOS

$\phi^{\text{pico}} = 41.6^\circ$, $c^{\text{pico}} = 0.07 \text{ Kg/cm}^2$
 $\phi^{\text{residual}} = 39.5^\circ$, $c^{\text{residual}} = 0.00 \text{ Kg/cm}^2$

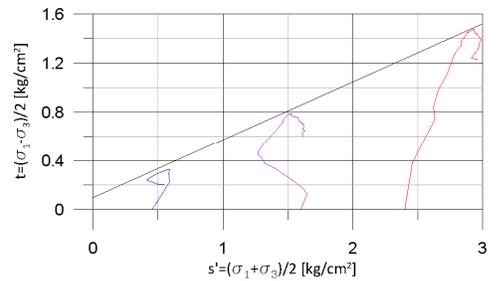
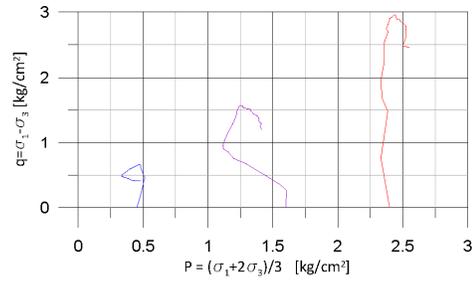
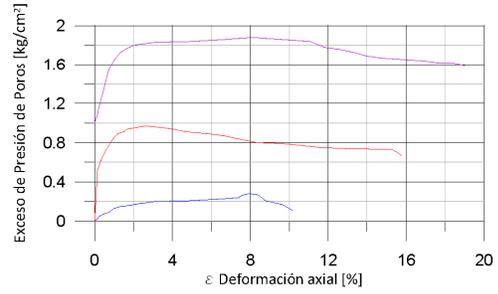
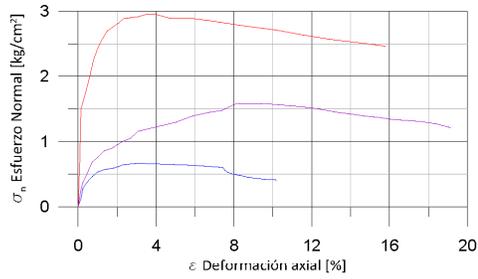
CONDICIÓN RESIDUAL



CI AMBIENTAL

ENSAYO TRIAXIAL

PROYECTO: DAGUA **SONDEO:** S2 **MUESTRA:** 1 **Prof(m):** 3,00-4,50
SITIO: BARRIO FATIMA - FATIMA II **Fecha:** Diciembre de 2009

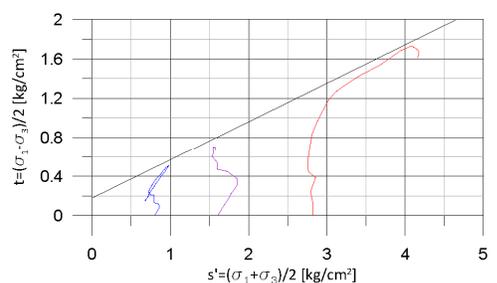
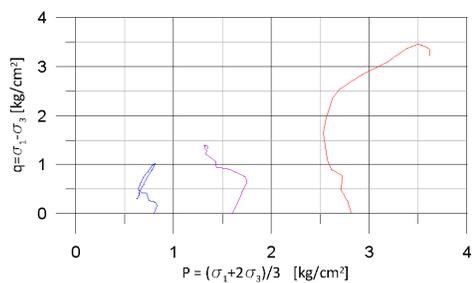
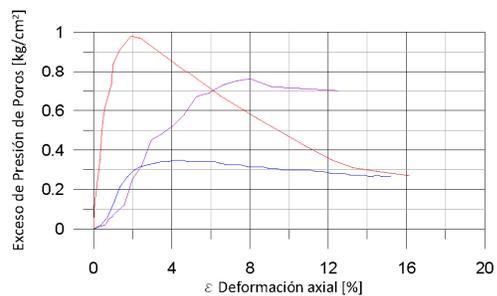
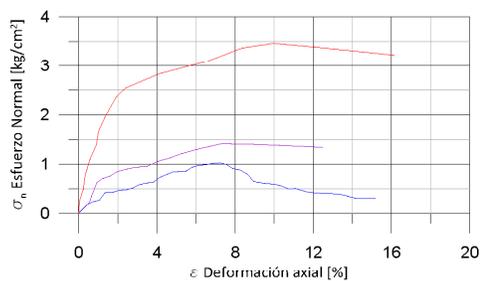


$\phi = 26.60^\circ$
 $c' = 0.10 \text{kg/cm}^2$

ENSAYO TRIAXIAL

PROYECTO: DAGUA **SONDEO:** S2
SITIO: BARRIO FATIMA - FATIMA II

MUESTRA: 1 **Prof(m):** 3,00-4,50
Fecha: Diciembre de 2009



$\phi = 21.08^\circ$
 $c' = 0.20 \text{ kg/cm}^2$

7. MAPAS

En caso de impresión de los mapas o sus figuras, se recomienda utilizar las imágenes dispuestas en la carpeta del Cd de nombre Mapas y Figuras.

Mapa 1.1. Mapa de Susceptibilidad

Mapa 3.1. Mapa de amenaza por Remoción en Masa. Escenario 1

Mapa 3.2 Mapa de Amenaza por Remoción en Masa. Escenario 2

Mapa 3.3 Mapa de Amenaza por Remoción en Masa. Escenario 3