



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

### **PROYECTO:**

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

### **- M I D A S -**

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA  
ELABORACIÓN DE MAPAS DE AMENAZA POR  
MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y  
FLUJOS TORRENCIALES Y EVALUACIÓN DE LA  
VULNERABILIDAD Y ESCENARIOS DE PÉRDIDAS**

**Santiago de Cali, Diciembre de 2009**

## TABLA DE CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1.1 INTRODUCCIÓN</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1.2 TIPOS DE METODOLOGÍA</b>  | <b>4</b>  |
| 1.2.1 Inventario de deslizamientos   | 4         |
| 1.2.2 Evaluación Heurística  | 4         |
| 1.2.3 Evaluación estadística   | 5         |
| 1.2.4 Evaluación Determinística  | 5         |
| <b>1.3 MÉTODO BIVARIADO</b>  | <b>7</b>  |
| 1.3.1 Definición de Variables  | 9         |
| 1.3.1.1 Pendiente (PEND)   | 9         |
| 1.3.1.2 Cuenca Acumulada (ACUENCA)   | 10        |
| 1.3.1.4 Curvatura (CURVAR)   | 10        |
| 1.3.1.5 Geología (GEOL)  | 10        |
| 1.3.1.6 Usos del Suelo (USO)   | 10        |
| 1.3.1.7 Movimientos (MOV)  | 10        |
| <b>1.4 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA</b>  | <b>11</b> |
| 1.4.1 Metodología  | 11        |
| <b>1.5 BIBLIOGRAFIA</b>  | <b>12</b> |
| <br>   |           |
| <b>2. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA DETERMINAR LOS MAPAS DE AMENAZAS POR INUNDACIONES Y FLUJOS TORRENCIALES</b>                         | <b>14</b> |
| <b>2.1 METODOLOGÍA PARA FLUJOS CON CONCENTRACIÓN NORMAL DE SEDIMENTOS (INUNDACIONES)</b>   | <b>15</b> |
| 2.1.1 Niveles de frecuencia del evento   | 15        |
| 2.1.2 Niveles de intensidad o magnitud del evento  | 15        |
| 2.1.3 Determinación de los niveles de amenaza por evento   | 17        |
| <b>2.2 METODOLOGÍA PARA FLUJOS TORRENCIALES</b>  | <b>18</b> |
| 2.2.1 Determinación de los niveles de amenaza por evento   | 19        |
| <br>   |           |
| <b>3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y MODELAMIENTO DE ESCENARIOS DE AFECTACIÓN</b>                   | <b>23</b> |
| <b>3.1 ETAPA 1: IDENTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS</b>  | <b>23</b> |
| <b>3.2 ETAPA 2: EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DETERMINACIÓN DE LOS MODOS Y NIVELES DE AFECTACIÓN DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS.</b> | <b>25</b> |
| <b>3.3 ETAPA 3: MODELACIÓN DE ESCENARIOS DE AFECTACIÓN, CUANTIFICACIÓN DE DAÑOS Y PÉRDIDAS POTENCIALES.</b>                          | <b>29</b> |
| <b>3.4 BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>30</b> |

# **1. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA**

# **1. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA**

## **1.1 INTRODUCCIÓN**

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 determinada; la probabilidad de ocurrencia por otro lado, dependerá también de la recurrencia de los factores desencadenantes tales como lluvia y sismicidad, la cual no es considerada, ya que estos agentes externos son tenidos en cuenta en la evaluación de la amenaza.

De acuerdo con esto, el análisis de la susceptibilidad en los municipios de Buga, El Cairo, Ríofrío, La Unión y Dagua, es una herramienta potencial para la planificación en relación con el uso del suelo y es el producto básico para futuros análisis de amenaza y riesgo.

## **1.2 TIPOS DE METODOLOGÍA**

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.

Soeters y Van Westen (1996) hacen una compilación detallada de las metodologías que se han desarrollado para evaluar amenaza por movimientos en masa y las agrupa de la siguiente manera:

- Inventario de deslizamientos
- Evaluación heurística
- Evaluación estadística
- Evaluación determinística

A continuación se hace un breve recuento de cada una de ellas y las escalas de aplicación de las mismas.

### **1.2.1 Inventario de deslizamientos**

Se basa en fotointerpretación y comprobación de campo. Genera una distribución espacial de Movimientos en masa, no genera factores de seguridad, se puede representar como un mapa de densidad de deslizamientos

### **1.2.2 Evaluación Heurística**

Se basa en la experiencia, teniendo como factores principales los aspectos geomorfológicos y el trabajo de campo de identificación de zonas con presencia de movimientos en masa. Se puede hacer de dos formas:



- a. Análisis geomorfológico (Kienholz, 1977), el cual corresponde a un mapeo geomorfológico directo de los fenómenos de remoción en masa detectados en un área específica.
- b. Combinación cualitativa: asignación de valores ponderados por parte de un grupo de expertos a una serie de variables temáticas.

### **1.2.3 Evaluación estadística**

Se evalúan estadísticamente la combinación de factores que producen o generan movimientos en masa. Se hacen predicciones cuantitativas en áreas de condiciones similares. Este análisis puede ser:

- Bivariado: cada mapa factor se combina con la distribución de movimientos en masa y se calculan pesos ponderados de acuerdo a la densidad de deslizamientos. (Brabb, 1994; Van Westen, 1993; Chung y Fabri, 1993: reglas bayesianas).
- Multivariado: se muestrean todos los factores relevantes en una grilla o en cada unidad morfométrica y a la matriz resultante se le aplica un análisis diferencial, por lo tanto se utiliza en un grado muy bajo la experiencia de los profesionales.

### **1.2.4 Evaluación Determinística**

En esta técnica se utilizan modelos de estabilidad de Taludes para calcular factores de seguridad.

En la Tabla 1.1 se presenta un análisis comparativo de las ventajas y desventajas que presenta cada metodología, con el fin de definir la que más se adapta a las necesidades del proyecto.

En el desarrollo de este proyecto se utilizó el método estadístico bivariado a escala 1:5.000, incluido en los métodos estadísticos 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. Para la evaluación de la amenaza por otro lado, se utilizará el método determinístico basado en factores de seguridad.

**Tabla 1.1** Ventajas y desventajas de las diferentes metodologías para evaluación de susceptibilidad y amenaza

| TIPO DE ANÁLISIS   | VENTAJAS   | DESVENTAJAS   |
|--|--|---|
| <b>INVENTARIO</b><br>Distribución de deslizamientos<br>Actividad de deslizamientos<br>Densidad de deslizamientos | 1. Facilita el uso de herramientas tales como imágenes, fotografías aéreas<br>2. Puede ser usado como herramienta de calibración de mapas de amenazas.                                       | 1. Requiere trabajo exhaustivo de campo en zonas en las cuales no se tiene la resolución adecuada<br>2. No se hace uso de correlaciones matemáticas con otras variables.<br>3. No se manejan las propiedades intrínsecas de los materiales con el fin de evaluar zonas de inestabilidad potencial que no presenten rasgos históricos de antiguos movimientos.   |
| <b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b><br>Bivariado<br>Multivariado   | 1. Se pueden hacer predicciones cuantitativas en áreas libres de deslizamientos con condiciones similares.   | 1. La elección de la unidad base de estudio determina la calidad de los resultados: grilla, unidad geomorfológica, etc.<br>2. No se utiliza la experiencia profesional (multivariado).  |
| <b>ANÁLISIS HEURÍSTICO</b><br>Geomorfológico<br>Combinación de mapas cualitativos                                | 1. Se toma en cuenta la experiencia del grupo de expertos<br>2. Toma en cuenta aspectos geológicos y geomorfológicos   | 1. No se pueden formular reglas de decisión.<br>2. La combinación de mapas se basa en análisis cualitativos<br>3. No se toman en cuenta parámetros de calificación de datos de entrada<br>4. Los datos geotécnicos obtenidos no se toman en cuenta para calificar FS, etc.<br>5. Las predicciones que se hacen son cualitativas<br>6. No se puede evaluar la desviación de los resultados respecto de la realidad |
| <b>ANÁLISIS DETERMINÍSTICO (FS)</b>  | 1. Es el más aplicable en el caso de evaluación de áreas locales en zonas de laderas<br>2. Se pueden hacer predicciones de comportamientos ante cambios en las condiciones de los materiales | 1. Requiere mayor detalle en el muestreo.<br>2. Requiere toma de datos más específica tanto geotécnicos, como geológicos, geomorfológicos, etc.   |

### 1.3 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.

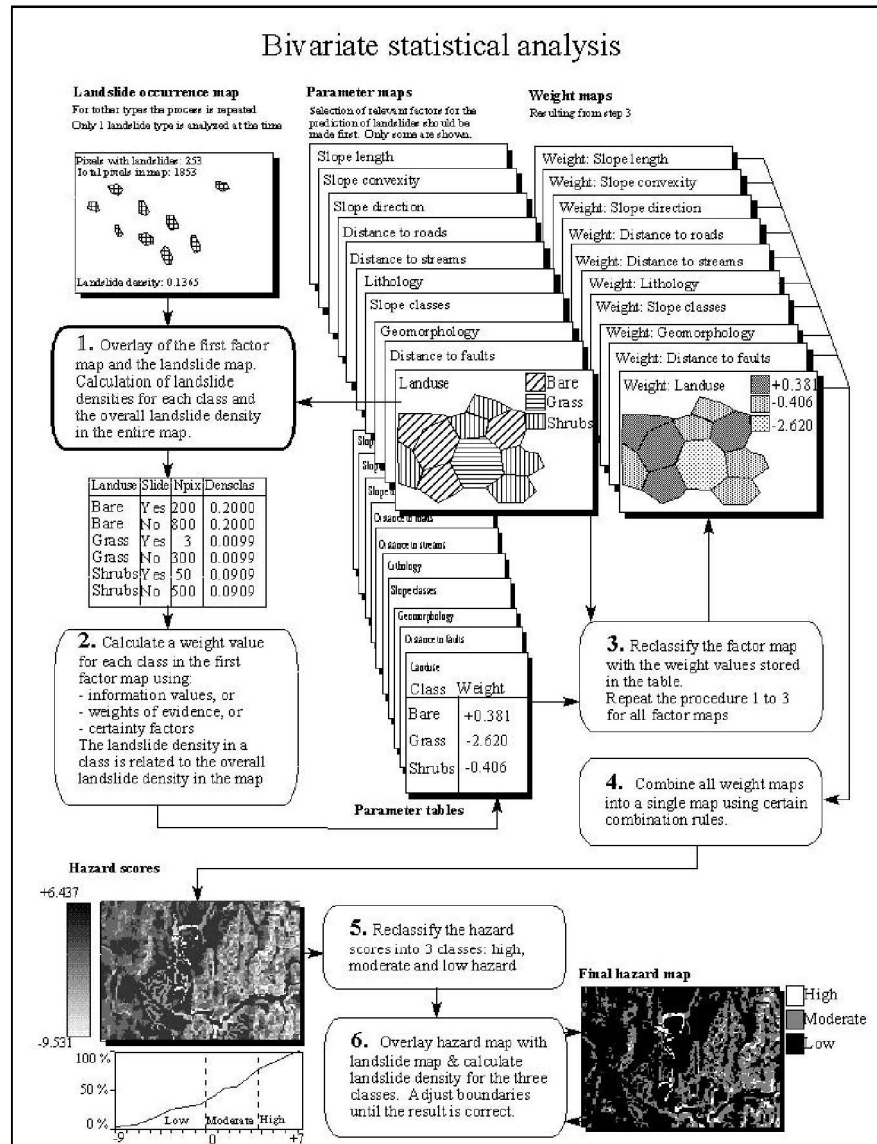


Figura 1.1 Diagrama de flujo general del método estadístico bivariado (Van Westen, 1996).

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:

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

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

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

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

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

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

Donde  $Np_j x_1$  es el número de celdas que representan la presencia del factor causante y los movimientos.  $Np_j x_2$  es el número de celdas que representan la presencia de movimientos y la ausencia de un factor causante.  $Np_j x_3$  es el número de celdas que representa la presencia de un factor causante y la ausencia de deslizamientos.  $Np_j x_4$  es el número de celdas que representan la ausencia de deslizamientos y factores causantes.

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:

$$LSI = \sum Wf_j$$

Donde  $j$  es el número de factores considerados.

### 1.3.1 Definición de Variables

En la investigación de la influencia de los parámetros físicos en los movimientos en masa, se analizará la correlación entre los movimientos y las variables que los representan. En este estudio las variables que se piensan utilizar son: pendiente, cuenca acumulada, curvatura, geología y uso del suelo, 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 (DEM). Las variables temáticas como geología y uso del suelo, son obtenidas a partir de la cartografía elaborada en otras componentes del proyecto. A continuación se realizará una breve descripción de las variables a tener en cuenta en el modelo de susceptibilidad:

✓ Modelo Digital de Elevación (Dem)

Es una representación espacial de las elevaciones del terreno, que muestran de forma simplificada la geometría de la superficie del terreno.

#### 1.3.1.1 Pendiente (PEND)

Variable geométrica continua, obtenida a partir del DEM; 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. Los rangos de pendientes propuestos se ilustran en la Tabla 1.2.

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

| CLASES | RANGO DE PENDIENTE |
|--------|--------------------|
| 1      | 0-5°               |
| 2      | 5°-10°             |
| 3      | 10°-20°            |
| 4      | 20°-30°            |
| 5      | 30°-45°            |
| 6      | 45°-60°            |
| 7      | > 60°              |

#### **1.3.1.2 Cuenca Acumulada (ACUENCA)**

Esta variable es generada como un raster a partir del DEM, acumulando el peso para todas los píxeles que fluyan en cada píxel de altura más baja. Los valores de menor a mayor valor, indican zonas de menor a mayor concentración de flujo, siendo los valores más altos los canales de drenaje. En la Tabla 1.3, se ilustra la categorización de esta variable.

**Tabla 1.3** Categorización de la variable ACUENCA.

| CLASES | DESCRIPCIÓN          |
|--------|----------------------|
| 1      | Divisoria            |
| 2      | Vertientes           |
| 3      | Drenajes secundarios |
| 4      | Corrientes de agua   |

#### **1.3.1.4 Curvatura (CURVAR)**

Variable que muestra la relación concavidad/convexidad del terreno. Este factor puede controlar el comportamiento hídrico y sedimentológico de las laderas, y es generada a partir del DEM; los valores negativos indican que la superficie es cóncava hacia la celda, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores de 0 corresponde a una superficie plana. En la Tabla 1.4 se presentan las categorías de esta variable.

**Tabla 1.4** Categorización de la variable CURVAR.

| CLASES | DESCRIPCIÓN |
|--------|-------------|
| 1      | Muy cóncavo |
| 2      | Cóncavo     |
| 3      | Plano       |
| 4      | Convexo     |
| 5      | Muy convexo |

#### **1.3.1.5 Geología (GEOL)**

Variable cualitativa que se deriva de la cartografía de unidades geológicas superficiales de los diferentes municipios, y representa el tipo de material geológico a nivel superficial. Para este caso se utilizan las unidades litológicas definidas según el mapa geológico.

#### **1.3.1.6 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, el cual dependerá de cada municipio. La cobertura del suelo, influye en la estabilidad de depósitos, suelos y macizos rocosos.

#### **1.3.1.7 Movimientos (MOV)**

Variable que representa la distribución espacial de los movimientos en masa en los diferentes municipios, y se utiliza como variable de agrupamiento para el análisis estadístico, de tal manera que se puedan establecer relaciones estadísticas con cada una de las variables.

Finalmente, la evaluación de la susceptibilidad se realizará 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). Una vez obtenidos todos los factores  $Wf$ , se suman las variables para obtener el índice LSI según la siguiente expresión:

$$LSI = WfPend + WfAcuenca + WfCurvar + WfGeol + WfUsos$$

## **1.4 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA**

La zonificación de amenazas de un territorio bien sea por fenómenos de remoción en masa o flujos torrenciales, es una de las herramientas necesarias para la administración racional de la ocupación de áreas socio-económicamente aprovechables. Permite la toma de decisiones tendiente al mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad, a cargo de entes territoriales ya que es un insumo para el ordenamiento territorial, la planeación del desarrollo y la gestión de riesgos, entre otros. Es fundamental para determinar bien sea el emplazamiento de vivienda, usos comerciales, industriales, institucionales, recreación, infraestructura, conservación entre otros.

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, 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 como: base cartográfica reciente del sector, cobertura y usos del suelo, geología (unidades geológicas superficiales, estratigrafía, geología estructural) geomorfología, clima, hidrología, hidráulica, hidrogeología (niveles piezométricos y su variación en el tiempo), parámetros geomecánicos de materiales e intensidad y probabilidad de ocurrencia de factores detonantes tales como lluvias y sismos.

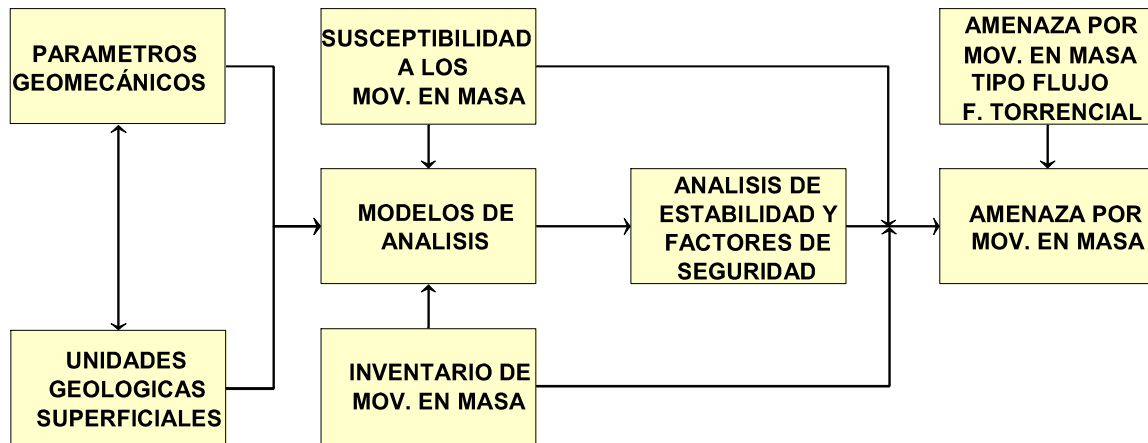
Este capítulo describe aspectos generales de la metodología que se va a utilizar para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, los escenarios de amenaza planteados y el contenido general de los productos cartográficos resultantes.

### **1.4.1 Metodología**

Los movimientos en masa identificados en el área de estudio, durante la fase de geología de campo, integra dos tipos principales de procesos: por una parte, los movimientos en masa, entre los que se destacan los deslizamientos translacionales y rotacionales, cárcavas de erosión comunes en las zonas montañosas aledañas a los municipios y por otro lado, los flujos fluvio-torrenciales asociados con algunas quebradas y ríos de montaña.

Para el primer grupo, la evaluación de la amenaza tiene en cuenta, de una parte, la predisposición o susceptibilidad de las laderas del área de estudio a desarrollar este tipo de procesos, evaluada mediante la herramienta SIG, tal como se describió en la sección anterior y, por otra parte, los factores de seguridad obtenidos a partir de los análisis de estabilidad efectuados según la distribución espacial del mecanismo de falla predominante.

Para las zonas con predominio de movimientos en masa de tipo traslacional y reptación, los factores de seguridad se estiman mediante el uso del modelo de talud infinito (falla planar). Este modelo se programará en plataforma ArcGIS, permitiendo así evaluar el factor de seguridad para superficies de falla paralelas a la superficie del terreno (el tamaño del pixel a utilizar dependerá básicamente de la escala de la base cartográfica utilizada). El efecto de los agentes externos tales como lluvia y sismo se evaluarán a partir de los resultados del régimen de lluvia del sector, así como de la sismicidad de la zona. En la Figura 1.2, se ilustra un resumen de las diferentes actividades involucradas en la generación del mapa de amenaza.



*Figura 1.2 Esquema metodológico para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa*

Se pueden presentar adicionalmente, mecanismos de falla más complejos que el traslacional, y cuya complejidad matemática no es posible de programar en plataforma ARGIS. Para este caso, se utilizará un software de reconocimiento internacional, que permita simular diferentes mecanismos de falla (rotacional, compuesta, etc.). Al igual que el caso anterior se realizarán los análisis de estabilidad teniendo en cuenta el efecto de agentes externos: lluvia y sismo. Una vez se inicie la generación de los mapas de amenaza se procederá a entrar a detallar los diferentes modelos numéricos utilizados.

## 1.5 BIBLIOGRAFIA

- Brabb, 1994; - Pag. 4
- Chung y Fabri, 1993 - Pag. 4
- 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.
- Kienholz, 1977 – Pag. 3



- 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.
- Soeters y Van Westen (1996) – pag. 2
- Van Westen, 1993; - Pag. 4
- Van Westen, 1996 - Pag. 6

## **2. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA DETERMINAR LOS MAPAS DE AMENAZAS POR INUNDACIONES Y FLUJOS TORRENCIALES**

## 2. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA DETERMINAR LOS MAPAS DE AMENAZAS POR INUNDACIONES Y FLUJOS TORRENCIALES

La metodología propuesta en el presente estudio se fundamenta en varios de los criterios utilizados en las metodologías presentadas y la experiencia del grupo de investigación HIDROMAR en esta área de las amenazas aplicadas en el río Cauca, teniendo en cuenta los diferentes acuerdos reglamentados por la CVC para protección del río Cauca y sus tributarios (alineamientos de diques riberaños, determinación de la franja protectora del río Cauca, periodos de retorno de diseño para cultivos, infraestructuras y centros poblados y por supuesto acorde a los planes y esquemas de ordenamiento territorial y planes de prevención, atención de desastres, y emergencias y contingencias de las inundaciones y flujos torrenciales).

### 2.1 METODOLOGÍA PARA FLUJOS CON CONCENTRACIÓN NORMAL DE SEDIMENTOS (INUNDACIONES)

#### 2.1.1 Niveles de frecuencia del evento

A cada escenario seleccionado de mapas de inundación se le debe asignar un nivel de frecuencia en términos cualitativos: frecuencia alta, media, moderada, baja, etc.

Los umbrales de periodos de retorno o recurrencia recomendados se presentan en la Tabla 2.1. Los umbrales de los periodos seleccionados corresponden inicialmente a 2 veces el periodo de retorno de los diseños de los drenajes urbanos (10 años), el segundo umbral corresponde aproximadamente a los diseños que la normativa colombiana debe garantizar en las obras de infraestructura vial y de cultivos (30 años) y el tercer umbral corresponde a la norma que estipula que cualquier comunidad aledaña a un cauce debe tener garantizada su integridad para un periodo de retorno de 100 años.

*Tabla 2.1* Nivel de frecuencia

| FRECUENCIA                           | NIVEL DE FRECUENCIA DE LA INUNDACIÓN |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $Tr \leq 10$ años                    | Alta                                 |
| $10 \text{ años} < Tr \leq 30$ años  | Media                                |
| $30 \text{ años} < Tr \leq 100$ años | Baja                                 |

#### 2.1.2 Niveles de intensidad o magnitud del evento

A cada escenario seleccionado de mapa de inundación se le debe realizar una clasificación cualitativa de acuerdo a su intensidad o magnitud.

Las características hidráulicas a tener en cuenta para determinar la intensidad y magnitud son la profundidad (H), la velocidad (V) y el producto de la profundidad por la velocidad (H\*V).

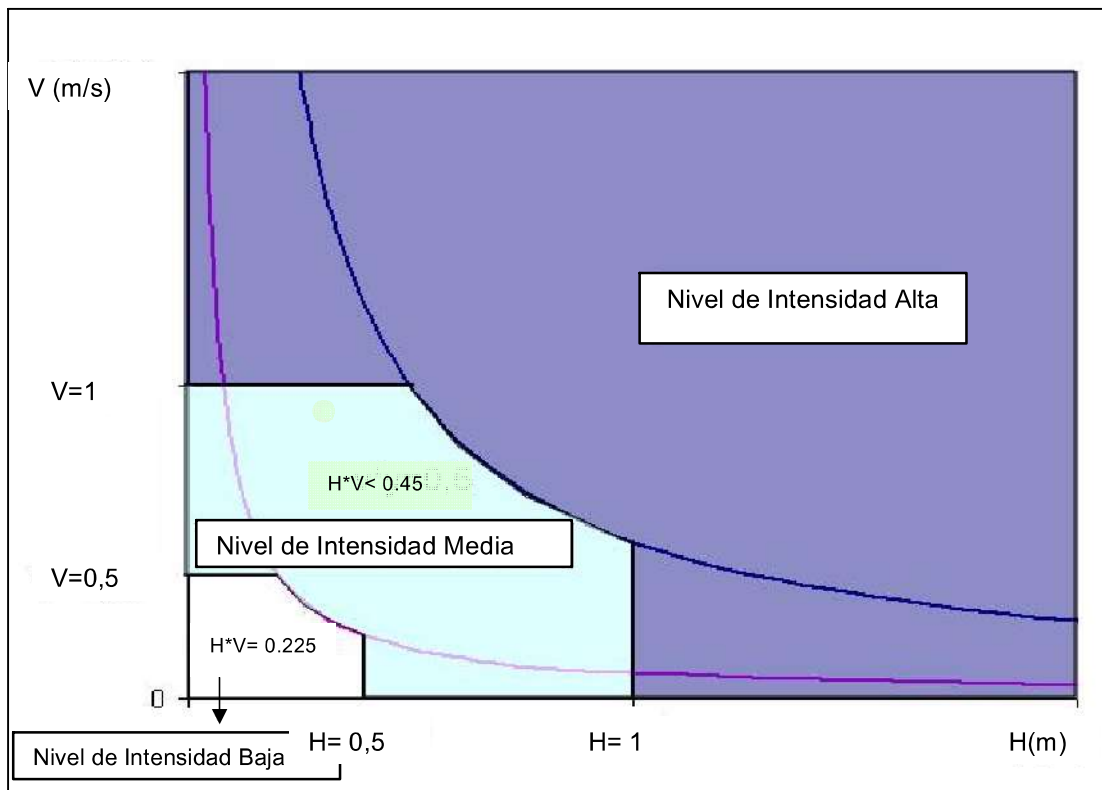
Los umbrales de intensidad o magnitud recomendados se presentan en la Tabla 2.2. El primer umbral determinado corresponde al nivel observado a partir del cual las comunidades desalojan sus viviendas (0.45 m) y el segundo umbral corresponde al criterio en el cual una

persona corre riesgo por su vida (0.90 m). En lo que respecta a las velocidades los umbrales corresponden a 0.50 m/s y 0.80 m/s respectivamente. Los umbrales del producto de la profundidad por la velocidad corresponden a 0.225 m<sup>2</sup>/s y 0.45 m<sup>2</sup>/s. Los umbrales definitivos de intensidad o magnitud se toman de acuerdo al rango de niveles, rango de velocidades y a los rangos de la multiplicación de la profundidad por la velocidad.

**Tabla 2.2** Nivel de intensidad o magnitud

| Intensidad o magnitud de la inundación profundidad (H) (m) velocidad (V) (m/s) profundidad por velocidad del flujo (H*V (m <sup>2</sup> /s)) | Nivel de intensidad o magnitud de la inundación |
|--|---|
| $H \geq 0.90$ ó $V \geq 0.80$ ó $H*V \geq 0.45$  | Alta  |
| $0.45 \leq H < 0.90$ ó $0.50 \leq V < 0.80$ ó $0.225 \leq H*V < 0.45$  | Media   |
| $H < 0.45$ y $V < 0.50$ y $H*V < 0.225$  | Baja  |

Los niveles de intensidad expresados en la Tabla 2.3 se presentan en la Figura 2.1.



**Figura 2.1** Niveles de intensidad.

**Tabla 2.3** Matriz de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud

| Nivel de intensidad                | Nivel de amenaza   |                            |                            |       |
|------------------------------------|--|----------------------------|----------------------------|-------|
|                                    | Alta<br>$H \geq 0.90 \text{ m}$ ó $V \geq 0.80 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$   | Alta                       | Alta                       | Alta  |
|                                    | Media<br>$0.45 \text{ m} \leq H < 0.90 \text{ m}$ ó $0.50 \text{ m/s} \leq V < 0.80 \text{ m/s}$ ó $0.225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$ | Alta                       | Media                      | Media |
|                                    | Baja<br>$H < 0.45 \text{ m}$ y $V < 0.50 \text{ m/s}$ y $H*V < 0.225 \text{ m}^2/\text{s}$   | Media                      | Baja                       | Baja  |
| <b>Frecuencia de la inundación</b> | Alta<br>$Tr \leq 10$   | Media<br>$10 < Tr \leq 30$ | Baja<br>$30 < Tr \leq 100$ |       |

### 2.1.3 Determinación de los niveles de amenaza por evento

Determinado los umbrales y niveles de frecuencia e intensidad se procede a clasificar los mapas de inundación en diferentes niveles cualitativos de amenaza (alta, significativa, media, moderada alta, moderada, moderada baja, baja, etc.).

Los niveles de amenaza que se recomiendan son alta, media y baja, los cuales dependen de los niveles de frecuencia o recurrencia y de los niveles de intensidad de la amenaza, expresada con los tres rangos de profundidades de agua recomendados, como se observa en las Tablas 2.4 y 2.5.

**Tabla 2.4** Niveles de amenaza

| Profundidad (m) o velocidad (m/s) o profundidad por velocidad (m <sup>2</sup> /s)   | Nivel de intensidad o magnitud | Periodo de retorno (años) | Nivel de frecuencia | Nivel de amenaza |
|---|--------------------------------|---------------------------|---------------------|------------------|
| $H \geq 0.90 \text{ m} \text{ ó } V \geq 0.80 \text{ m/s} \text{ ó } H*V \geq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$  | Alta                           | $Tr \leq 10$              | Alta                | Alta             |
| $H \geq 0.90 \text{ m} \text{ ó } V \geq 0.80 \text{ m/s} \text{ ó } H*V \geq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$  | Alta                           | $10 < Tr \leq 30$         | Media               | Alta             |
| $H \geq 0.90 \text{ m} \text{ ó } V \geq 0.80 \text{ m/s} \text{ ó } H*V \geq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$  | Alta                           | $30 < Tr \leq 100$        | Baja                | Alta             |
| $0.45 \text{ m} \leq H < 0.90 \text{ m} \text{ ó } 0.50 \text{ m/s} \leq V < 0.80 \text{ m/s} \text{ ó } 0.225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$ | Media                          | $Tr \leq 10$              | Alta                | Alta             |
| $0.45 \text{ m} \leq H < 0.90 \text{ m} \text{ ó } 0.50 \text{ m/s} \leq V < 0.80 \text{ m/s} \text{ ó } 0.225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$ | Media                          | $10 < Tr \leq 30$         | Media               | Media            |
| $0.45 \text{ m} \leq H < 0.90 \text{ m} \text{ ó } 0.50 \text{ m/s} \leq V < 0.80 \text{ m/s} \text{ ó } 0.225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$ | Media                          | $30 < Tr \leq 100$        | Baja                | Media            |
| $H < 0.45 \text{ m} \text{ y } V < 0.50 \text{ m/s} \text{ y } H*V < 0.225 \text{ m}^2/\text{s}$  | Baja                           | $Tr \leq 10$              | Alta                | Media            |
| $H < 0.45 \text{ m} \text{ y } V < 0.50 \text{ m/s} \text{ y } H*V < 0.225 \text{ m}^2/\text{s}$  | Baja                           | $10 < Tr \leq 30$         | Media               | Baja             |
| $H < 0.45 \text{ m} \text{ y } V < 0.50 \text{ m/s} \text{ y } H*V < 0.225 \text{ m}^2/\text{s}$  | Baja                           | $30 < Tr \leq 100$        | Baja                | Baja             |

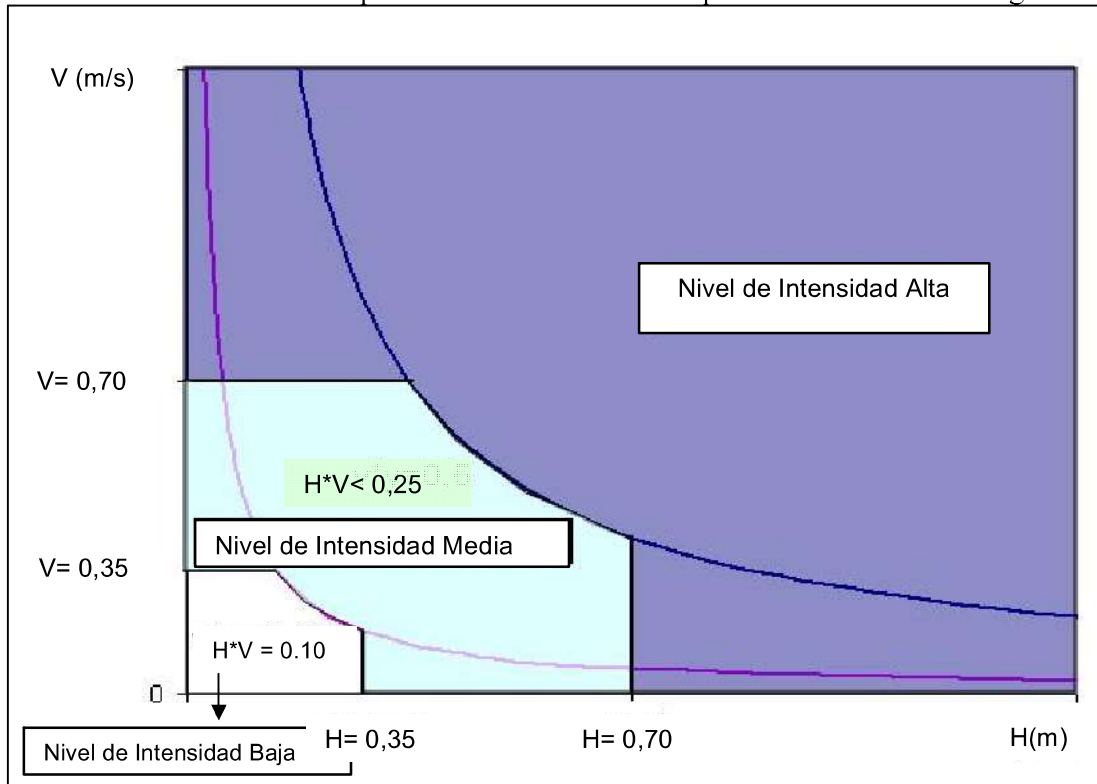
## 2.2 METODOLOGÍA PARA FLUJOS TORRENCIALES

Los umbrales de intensidad o magnitud recomendados para flujos torrenciales se presentan en la Tabla 2.5. El primer umbral determinado corresponde al nivel observado a partir del cual las comunidades desalojan sus viviendas (0.25 m) y el segundo umbral corresponde al criterio en el cual una persona corre riesgo por su vida (0.50 m). En lo que respecta a las velocidades los umbrales corresponden a 0.25 m/s y 0.50 m/s respectivamente. Los umbrales del producto de la profundidad por la velocidad corresponden a 0.10 m<sup>2</sup>/s y 0.25 m<sup>2</sup>/s. Los umbrales definitivos de intensidad o magnitud se toman de acuerdo al rango de niveles, rango de velocidades y a los rangos de la multiplicación de la profundidad por la velocidad.

**Tabla 2.5** Nivel intensidad o magnitud

| Intensidad o magnitud de la inundación profundidad (H) (m) velocidad (V) (m/s) profundidad por velocidad del flujo (H*V (m <sup>2</sup> /s)) | Nivel de intensidad o magnitud de la inundación |
|--|---|
| $H \geq 0.50 \text{ ó } V \geq 0.50 \text{ ó } H*V \geq 0.25$  | Alta  |
| $0.25 \leq H < 0.50 \text{ ó } 0.25 \leq V < 0.50 \text{ ó } 0.10 \leq H*V < 0.25$   | Media   |
| $H < 0.25 \text{ y } V < 0.25 \text{ y } H*V < 0.10$   | Baja  |

Los niveles de intensidad expresados en la Tabla 2.5 se pueden observar en la Figura 2.2.



*Figura 2.2 Nivel de intensidad de las inundaciones por flujos torrenciales según grupo Hidromar-Univalle.*

### 2.2.1 Determinación de los niveles de amenaza por evento

Determinado los umbrales y niveles de frecuencia e intensidad se procede a clasificar los mapas de inundación en diferentes niveles cualitativos de amenaza (alta, media, moderada alta, moderada, moderada baja, baja, etc.).

Los niveles de amenaza que se recomiendan son alta, media y baja, niveles que dependen de los niveles de frecuencia o recurrencia y de los niveles de intensidad de la amenaza, expresada con los tres rangos de profundidades de agua recomendados, como se observa en las Tablas 2.6 y 2.7.

**Tabla 2.6** Matriz de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud para flujos torrenciales

| Nivel de Intensidad         | Nivel de Amenaza  |                            |                            |       |
|-----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|-------|
|                             | Alta<br>$H \geq 0.50 \text{ m}$ ó $V \geq 0.50 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$  | Alta                       | Alta                       | Alta  |
|                             | Media<br>$0.25 \text{ m} \leq H < 0.50 \text{ m}$ ó $0.25 \text{ m/s} \leq V < 0.50 \text{ m/s}$ ó $0.10 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$ | Alta                       | Media                      | Media |
|                             | Baja<br>$H < 0.25 \text{ m}$ y $V < 0.25 \text{ m/s}$ y $H*V < 0.10 \text{ m}^2/\text{s}$   | Media                      | Baja                       | Baja  |
| Frecuencia de la Inundación | Alta<br>$Tr \leq 10$  | Media<br>$10 < Tr \leq 30$ | Baja<br>$30 < Tr \leq 100$ |       |

En el sistema de información geográfica (SIG) de la zona de estudio se llevan los resultados obtenidos de la modelación hidráulica para los diferentes escenarios simulados. Con base en las profundidades de agua en las áreas inundadas y teniendo en cuenta la intensidad de la inundación se generan los mapas de amenaza. A cada frecuencia de inundación corresponde un mapa de amenaza. En cada mapa se identifican las áreas inundadas y el nivel de amenaza al cual se encuentran sometidas.



**Tabla 2.7** Niveles de amenaza

| <b>Profundidad (m) o profundidad por Velocidad (m<sup>2</sup>/s)</b>   | <b>Nivel de intensidad o Magnitud</b> | <b>Periodo de retorno (años)</b> | <b>Nivel de frecuencia</b> | <b>Nivel de amenaza</b> |
|--|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| $H \geq 0.50 \text{ m}$ ó $V \geq 0.50 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$   | Alta                                  | $Tr \leq 10$                     | Alta                       | Alta                    |
| $H \geq 0.50 \text{ m}$ ó $V \geq 0.50 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$   | Alta                                  | $10 < Tr \leq 30$                | Media                      | Alta                    |
| $H \geq 0.50 \text{ m}$ ó $V \geq 0.50 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$   | Alta                                  | $30 < Tr \leq 100$               | Baja                       | Alta                    |
| $0.25 \text{ m} \leq H < 0.50 \text{ m}$ ó $0.25 \text{ m/s} \leq V < 0.50 \text{ m/s}$ ó $0.10 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$ | Media                                 | $Tr \leq 10$                     | Alta                       | Alta                    |
| $0.25 \text{ m} \leq H < 0.50 \text{ m}$ ó $0.25 \text{ m/s} \leq V < 0.50 \text{ m/s}$ ó $0.10 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$ | Media                                 | $10 < Tr \leq 30$                | Media                      | Media                   |
| $0.25 \text{ m} \leq H < 0.50 \text{ m}$ ó $0.25 \text{ m/s} \leq V < 0.50 \text{ m/s}$ ó $0.10 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$ | Media                                 | $30 < Tr \leq 100$               | Baja                       | Media                   |
| $H < 0.25 \text{ m}$ y $V < 0.25 \text{ m/s}$ y $H*V < 0.10 \text{ m}^2/\text{s}$  | Baja                                  | $Tr \leq 10$                     | Alta                       | Media                   |
| $H < 0.25 \text{ m}$ y $V < 0.25 \text{ m/s}$ y $H*V < 0.10 \text{ m}^2/\text{s}$  | Baja                                  | $10 < Tr \leq 30$                | Media                      | Baja                    |
| $H < 0.25 \text{ m}$ y $V < 0.25 \text{ m/s}$ y $H*V < 0.10 \text{ m}^2/\text{s}$  | Baja                                  | $30 < Tr \leq 100$               | Baja                       | Baja                    |

Teniendo los resultados de los mapas de amenaza para cada escenario, tanto para los eventos de inundaciones como para los flujos torrenciales, se construye un mapa final que representa la envolvente crítica (superposición de los resultados de los tres escenarios para cada uno de los periodos de retorno, tomando para cada espacio del territorio el máximo nivel de amenaza) de los resultados pixel por pixel del territorio de los diferentes escenarios considerados, construyendo un único mapa denominado mapa de amenaza global que servirá de base para la planificación territorial de la zona de estudio de cada uno de los fenómenos evaluados.

### **3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y MODELAMIENTO DE ESCENARIOS DE AFECTACIÓN**

### **3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y MODELAMIENTO DE ESCENARIOS DE AFECTACIÓN**

La base metodológica para el estudio de la vulnerabilidad y la afectación, se fundamenta en la “guía metodológica para la evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa, inundaciones y avenidas torrenciales” (CVC & INGEOMINAS 2001), la cual se sustenta en las etapas señaladas a continuación.

#### **3.1 ETAPA 1: IDENTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS**

El análisis de los diferentes elementos expuestos que se encuentran dentro del área de influencia del fenómeno, es una etapa fundamental en la medida en que permite establecer su resistencia a sufrir algún tipo de daño en el momento en que el evento se materialice sobre ellos.

Una vez obtenidos los resultados correspondientes a la evaluación del fenómeno en términos de procesos generadores de daño e intensidad, la identificación de dichos elementos consistirá en señalar aquellos que se encuentran expuestos y clasificarlos según su naturaleza, bien sea en elementos corporales o elementos estructurales.

Una vez llevado a cabo la identificación y clasificación de los distintos elementos expuestos, se procede a la caracterización de los mismos. Este proceso se lleva a cabo a través de la evaluación de una serie de indicadores socioeconómicos y físicos asociados a los elementos, para identificar la condición de vulnerabilidad de la comunidad, tales como densidad de población, densidad y tipo de construcciones, estado estructural de las edificaciones, entre otras.

Para llevar a cabo este análisis es importante tener claro las fuentes de información que puedan suministrarnos la información pertinente; entre ellas tenemos instituciones civiles como las oficinas de catastro municipal, las oficinas de planeación municipal y departamental, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el Sistema de Identificación de Potenciales Beneficiarios de Programas Sociales (SISBEN) y por supuesto el trabajo de campo organizado puede llegar a ser una fuente fidedigna de información socioeconómica.

La Tabla 3.1 representa los diferentes elementos expuestos tanto corporales como estructurales, los indicadores para su caracterización y la forma de visualización de la información.

**Tabla 3.1.** Elementos expuestos, caracterización de indicadores y visualización de la información.

| <i>ELEMENTOS EXPUESTOS</i>    | <i>CARACTERIZACIÓN DE INDICADORES/UNIDAD DE ANÁLISIS</i> | <i>VISUALIZACIÓN</i>   |
|-------------------------------|--|------------------------|
| HABITANTES                    | Densidad de habitantes                                   | Geográfica/Estadística |
|                               | Distribución socioeconómica de la población              | Geográfica/Estadística |
| CONSTRUCCIONES<br>(viviendas) | Densidad de construcciones                               | Geográfica             |
|                               | Tipo de construcciones (I,II y III)                      | Geográfica             |
|                               | Edad de construcciones por unidad de análisis            | Geográfica             |
|                               | Estado de edificaciones por unidad de análisis           | Geográfica             |
|                               | Avalúo catastral   | Geográfica             |

*Actividades a desarrollar:*

Para llevar a cabo este objetivo se tienen programadas una serie de actividades en campo y oficina que consta de las siguientes tareas:

1. Reconocimiento preliminar en campo de las zonas de estudio y recopilación de información primaria: esta labor consiste básicamente en realizar una salida de reconocimiento en campo para cada uno de los municipios de interés, identificando aquellas zonas que según estudios anteriores son consideradas como amenazadas por el tipo de fenómeno específico que se presenta y levantando información que pueda ser útil para efectos de vulnerabilidad. Complementario a esta labor se realizarán visitas a instituciones de orden público y/o privado como entidades oficiales, oficinas de catastro municipal, oficinas de planeación municipal, oficinas del SISBEN, estaciones de bomberos, defensa civil entre otras, con el objetivo de recopilar información pertinente para evaluar el nivel de afectación corporal y estructural según el tipo de amenaza.
2. Encuesta: para complementar la información obtenida, se realizará una encuesta socioeconómica por viviendas para caracterizar la población objetivo (Ver anexo I).
3. Organización de la información: una vez recopilada toda la información necesaria de orden físico y socioeconómico, se procederá a organizarla y estructurarla por elemento expuesto bien sea estructural o corporal, de manera tal que, mediante el mapa de zonificación de la amenaza se recoja aquello que se necesita y se depure aquello que no.
4. Identificación, caracterización y localización de elementos expuestos: posterior a la organización de la información, se procederá a identificar y caracterizar en terreno cada uno de los elementos que se encuentran expuestos ante una determinada amenaza, tanto personas como viviendas, con el objetivo de elaborar una base de datos, georreferenciar y elaborar así un mapa de localización elementos expuestos para cada municipio.

### **3.2 ETAPA 2: EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DETERMINACIÓN DE LOS MODOS Y NIVELES DE AFECTACIÓN DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS.**

Posterior al análisis de los elementos expuestos, viene la etapa de evaluación de la vulnerabilidad y los distintos modos y niveles en los que pueden verse afectados dichos elementos, los cuales pueden expresarse en forma cualitativa y cuantitativa. Esta etapa nos brinda una idea de la intensidad del daño provocado por un fenómeno sobre un elemento o grupo de elementos expuestos al mismo y facilita su evaluación y posterior análisis en el sistema de información geográfica. Para establecer estos modos y niveles de afectación es preciso revisar los eventos precedentes, de manera tal que permitan caracterizar la interacción entre el fenómeno y el elemento.

*Actividades a desarrollar:*

Para desarrollar esta etapa se proponen las siguientes actividades:

- 1) Relacionar el grado de la amenaza con el modo de daño que puedan sufrir los elementos expuestos: Esta labor intenta esclarecer de la manera más acertada posible cómo interactúa el fenómeno con el elemento expuesto. Para ello, en primera instancia, se identifican una serie de parámetros medibles, según el tipo de fenómeno presente, propias de cada elemento expuesto, tal como se refleja en las Tablas 3.2 y 3.3.

Tabla 3.2. Vulnerabilidad Física

| PARÁMETRO                    | TIPO | VARIABLE                                 | PESO |    |    | DESCRIPCIÓN  | PESO |       |      |
|------------------------------|------|--|------|----|----|--|------|-------|------|
|                              |      |  | FRM  | AT | I  |  | FRM  | AT    | I    |
| Material de construcción     | I    | Rústico                                  | 10   | 10 | 9  | Vulnerabilidad alta para madera burda, desechos, zinc, cartón, esterilla, guadua                               | 0,25 | 0,35  | 0,35 |
|                              | II   | Mampostería                              | 7    | 5  | 4  | Vulnerabilidad moderada para adobe, ladrillo, piedra, roca pulida, cantos                                      |      |       |      |
|                              | III  | Concreto                                 | 5    | 2  | 1  | Vulnerabilidad baja para armado, en masa, ordinario  |      |       |      |
| Techos                       | I    | Paja, palma ó similar                    | 10   | 10 | 9  | Vulnerabilidad alta  |      |       |      |
|                              | II   | Teja de barro, asbesto , Lamina metálica | 8    | 7  | 6  | Vulnerabilidad moderada  | 0,1  | 0,05  | 0    |
|                              | III  | Cemento-concreto                         | 5    | 2  | 1  | Vulnerabilidad baja  |      |       |      |
| Estado de la vivienda        | I    | Mal estado                               | 10   | 10 | 9  | Vulnerabilidad alta para Avanzado estado de afectación de los elementos portantes, inclinación y agrietamiento |      |       |      |
|                              | II   | Regular estado                           | 8    | 6  | 5  | Vulnerabilidad moderada por ligero envejecimiento de los elementos portantes con leves fisuras                 | 0,15 | 0,25  | 0,25 |
|                              | III  | Buen Estado                              | 5    | 2  | 1  | Vulnerabilidad baja para Los elementos portantes no presentan fisuras, ni agrietamiento                        |      |       |      |
| Distancia a la amenaza       | I    | Muy cerca                                | 10   | 10 | 10 | Vulnerabilidad Alta para los tres tipos de amenaza   |      |       |      |
|                              | II   | Relativamente Cerca                      | 8    | 6  | 6  | Vulnerabilidad baja para los tres tipos de amenaza   | 0,5  | 0,175 | 0,20 |
|                              | III  | Alejado                                  | 5    | 2  | 2  | Vulnerabilidad alta para los tres tipos de amenaza   |      |       |      |
| Altura respecto a la amenaza | I    | Sobre nivel de banca llena               | 0    | 3  | 3  | Vulnerabilidad baja para h> 1m   |      |       |      |
|                              | II   | Al nivel de banca llena                  | 0    | 8  | 8  | Vulnerabilidad media para 0<h< 1m  | 0    | 0,175 | 0,20 |
|                              | III  | Bajo el nivel de banca llena             | 0    | 10 | 10 | Vulnerabilidad baja h<0m   |      |       |      |

FRM: Fenómenos de Remoción en Masa; I: Inundaciones; AT: Avenidas torrenciales

**PESO PAR/FENÓMENO:** peso asignado por expertos a cada parámetro dentro del componente de vulnerabilidad física por tipo de fenómeno

**PESO VAR/FENÓMENO:** peso asignado por expertos, a las variables de cada parámetro por tipo de fenómeno

**Tabla 3.3.** Vulnerabilidad Poblacional

**PESO PAR:** Peso asignado por los expertos, a cada parámetro dentro del componente de vulnerabilidad de población

**PESO VAR:** Peso asignado por los expertos, a las variables de cada parámetro

- 2) Evaluación de la vulnerabilidad total: Una vez se hayan identificado y categorizado los distintos parámetros, se procede a integrar los indicadores de vulnerabilidad para cada uno de los elementos expuestos y obtener, de esta forma un índice que represente la vulnerabilidad global; para lograr esta meta se integran los indicadores de

| PARÁMETRO                      | TIPO | VARIABLE              | PESO VAR | DESCRIPCIÓN  | PESO PAR |
|--------------------------------|------|-----------------------|----------|--|----------|
| Sexo del jefe de hogar         | I    | Mujer                 | 10       | Se propone una mayor vulnerabilidad cuando el jefe es mujer                              | 0,2      |
|                                | II   | Hombre                | 8        | Se propone una menor vulnerabilidad cuando el jefe es hombre                             |          |
| Edad del jefe de hogar         | I    | < 18 años             | 10       | Se Propone alta vulnerabilidad cuando el jefe es menor de edad                           | 0,2      |
|                                | II   | 18-55 años            | 6        | se propone baja vulnerabilidad cuando el jefe es adulto                                  |          |
|                                | III  | > 55 años             | 8        | Se propone moderada vulnerabilidad cuando el jefe es adulto mayor                        |          |
| Dependencia infantil           | I    | 1/1                   | 2        | Se propone baja vulnerabilidad cuando hay un adulto por cada niño                        | 0,2      |
|                                | II   | 1/2                   | 6        | Se propone moderada vulnerabilidad cuando hay un adulto por cada dos niños               |          |
|                                | III  | 1 / 3 en adelante     | 8        | Se propone alta vulnerabilidad cuando hay un adulto por cada tres niños ó más            |          |
| Nivel de hacinamiento          | I    | 1                     | 2        | Se propone baja vulnerabilidad cuando un hogar comparte una olla común                   | 0,2      |
|                                | II   | 2                     | 6        | Se propone moderada vulnerabilidad cuando dos hogares comparten una olla común           |          |
|                                | III  | 3                     | 8        | Se propone alta vulnerabilidad cuando tres ó más hogares comparten una olla común        |          |
| Escolaridad del jefe del hogar | I    | Técnico-Universitario | 4        | Se propone baja vulnerabilidad para jefes técnicos-universitarios y mas                  | 0,2      |
|                                | II   | Bachiller             | 8        | Se propone vulnerabilidad moderada para jefes de hogar que han terminado el bachillerato |          |
|                                | III  | Primaria              | 10       | Se Propone Vulnerabilidad alta para jefes con nivel de educación primaria y menos        |          |

vulnerabilidad con base en un procedimiento de normalización y posteriormente una combinación lineal de la misma con base en coeficientes de ponderación.

La normalización se hace necesaria para tener una dimensión proporcional de las vulnerabilidades con respecto a la otra, mientras que la combinación lineal con base en coeficientes de ponderación permite su integración sistemática. Matemáticamente la combinación lineal de los indicadores de vulnerabilidades se representa mediante la siguiente ecuación:

$$V_{total} = C_1 V_{est} + C_2 V_{pob}$$

Donde  $C_1$  y  $C_2$  son los coeficientes de ponderación para cada vulnerabilidad normalizada;

y donde  $V_{est}$  y  $V_{pob}$  son los componentes de vulnerabilidad para la estructuras y la población. Matemáticamente la vulnerabilidad para cada componente se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^n (\text{Peso}_{variable} * \text{Peso}_{parámetro})$$

La selección de la magnitud de dichos coeficientes se llevó a cabo mediante un método heurístico con base en el criterio profesional del grupo. En este caso se escogieron los coeficientes 7 para el componente de vulnerabilidad estructural y 3 para el indicador de vulnerabilidad poblacional demográfica.

Al final se adopta una escala numérica que indica los grados de vulnerabilidad, lo cual nos permitirá realizar la zonificación de la misma, de la siguiente manera (Tabla 3.4).

**Tabla 3.4** Escala numérica-Grados de Vulnerabilidad

| Grado de vulnerabilidad | Rango  |
|-------------------------|--------|
| Baja (I)                | 0-30   |
| Media (II)              | 30-60  |
| Alta (III)              | 60-100 |

- 3) Determinación de los niveles y modos de afectación: Esta labor nos permitirá evaluar los modos de daño o grados de afectación esperados, para los elementos expuestos según el nivel o grado de la amenaza dada. Se proponen tres opciones para categorizar dichos modos de daño, a saber: mediante un panel de expertos, revisión de historicidad de eventos y revisión de estudios preexistentes. La Tabla 3.5 muestra el cruce de variables entre el grado de vulnerabilidad y el grado de amenaza obtenido, mientras que la Tabla 3.6 refleja el modo de daño esperado para cada elemento según el resultado:



**Tabla 3.5** Relación Vulnerabilidad y Grado de Amenaza

|                  |     | Grado de vulnerabilidad |     |     | Modo de daño ó Afectación |
|------------------|-----|-------------------------|-----|-----|---------------------------|
|                  |     | I                       | II  | III |                           |
| Grado de Amenaza | I   | I                       | I   | II  |                           |
|                  | II  | I                       | II  | III |                           |
|                  | III | II                      | III | III |                           |

**Tabla 3.6.** Modo de daño o afectación

| ELEMENTOS EXPUESTOS        | INDICADOR | MODO DE DAÑO Ó AFECTACIÓN                                      |
|----------------------------|-----------|--|
| HABITANTES                 | I         | Heridas leves sin secuelas                                     |
|                            | II        | Heridas importantes (fracturas, invalides)                     |
|                            | III       | Pérdida de la vida   |
| CONSTRUCCIONES (viviendas) | I         | Daños ligeros no estructurales (estabilidad no afectada)       |
|                            | II        | Daños importantes Fisura y agrietamiento                       |
|                            | III       | Daños graves, destrucción parcial y/o total de las estructuras |

### **3.3 ETAPA 3: MODELACIÓN DE ESCENARIOS DE AFECTACIÓN, CUANTIFICACIÓN DE DAÑOS Y PÉRDIDAS POTENCIALES.**

En esta etapa se recoge la información necesaria para modelar los escenarios de afectación y cuantificar los daños y pérdidas esperadas para un fenómeno ya caracterizado. Debido a la complejidad de los fenómenos de remoción en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, y la dinámica que presentan los elementos corporales expuestos en función del espacio-tiempo, existe una variedad de posibilidades de manifestación del daño. En este sentido se adoptará la propuesta de complementar el análisis mediante la concepción de escenarios de afectación, ya explicados en el marco teórico, lo que nos permitirá aproximarnos al daño específico en función del número y/ó porcentaje de personas damnificadas y costo aproximado de las viviendas damnificadas. Para generar dicho modelo se efectuará el cruce de información correspondiente al modo de daño con la densidad de personas en la vivienda por escenario (diurno y nocturno), tal como se muestra en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7.** Relación entre modo de daño y densidad de población/escenario

|              |       | DENSIDAD DE POBLACIÓN/ESCENARIO |       |       |
|--------------|-------|---------------------------------|-------|-------|
|              |       | ALTA                            | MEDIA | BAJA  |
| MODO DE DAÑO | ALTO  | ALTO                            | ALTO  | MEDIO |
|              | MEDIO | ALTO                            | MEDIO | BAJO  |
|              | BAJO  | MEDIO                           | BAJO  | BAJO  |
|              |       | ESCENARIO DE AFECTACIÓN         |       |       |

La modelación de de los escenarios de afectación y la cuantificación de daños y pérdidas, se realizará mediante una consulta en el SIG, la cual se compone de la siguiente información:

- a) Número de personas que se encuentran en la construcción durante el día (6:00am-6:00pm).
- b) Número de personas que se encuentran en la construcción durante la noche (6:00pm-6:00am).

Una vez obtenido los escenarios de afectación diurno y nocturno, se procederá a calcula el número aproximado de personas y viviendas afectadas y determinar en términos económicos el costo catastral aproximado de las viviendas afectadas.

### 3.4 BIBLIOGRAFÍA

- CVC & INGEOMINAS; “Guía metodológica para la evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa, inundaciones y avenidas torrenciales” 2001
- FOREC; “Zonificación de Amenazas”
- HIMAT. “Plan Nacional de prevención y control de Inundaciones”; 1988
- OSSO; “Estudio de Vulnerabilidad Física en Tumaco”;
- ROBLES, Vargas Javier; “Metodologías para Elaboración de Mapas de Riesgos Geológicos y Zonificación Geotécnica”. 1991.
- RUBIANO, Diana Marcela; “Aspectos Metodológicos para la Evaluación de Amenaza y Riesgos por Deslizamientos de Tierra”; 1993.
- UNICAUCA; “Estudio de Vulnerabilidad social en Tumaco”.