

3

METODO PARA IDENTIFICAR, EVALUAR Y ZONIFICAR LOS GRADOS DE AMENAZA PARA LOS MOVIMIENTOS DE MASA E INUNDACIONES

Para este método se ha considerado solamente la amenaza por movimientos de masa e inundaciones, debido a que son los eventos que más han afectado la ciudad y otros asentamientos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

3.1. Definiciones

- **Amenaza:** es la probabilidad de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad en un sitio específico y durante un periodo de tiempo determinado.

Amenaza por movimientos de masa: es el desplazamiento de un volumen de material in situ, transportado o antrópico (suelo, roca, depósitos, llenos artificiales, etc.) en un área determinada, causado por interacción de diferentes factores de origen geológico, meteorológico y humano.

Los movimientos de masa pueden clasificarse de acuerdo a la rapidez del desplazamiento en:

- Lentos: reptación y subsidencia
- Medianamente rápidos: deslizamientos de material parcialmente saturados, volcamientos.
- Rápidos: deslizamientos de material altamente saturados de agua, movimientos de flujo de lodo

- Muy rápidos: caída de rocas, basculamientos

Amenaza por inundaciones: se entiende por inundación, el fenómeno mediante el cual el nivel de agua de una corriente supera la capacidad de su cauce natural o artificial, cubriendo zonas aledañas. Las inundaciones fluviales pueden ser ocasionadas por lluvias, rotura de presas, corrientes de lodo, etc. No se considera como inundación, el encharcamiento ocasionado por rotura de tuberías, obstrucción de drenajes, etc.

La causa principal de las inundaciones, como la de los movimientos de masa, es del desequilibrio natural infringido por el hombre

3.2. Desarrollo metodológico en la evaluación de la amenaza por movimientos de masa en la ciudad de Medellín dentro del Proyecto Col 88/010

Dentro de los objetivos a desarrollar por el Proyecto Col 88/010 en cuanto a la evaluación del riesgo por fenómenos naturales, está el de determinar la amenaza por movimientos de masa e inundaciones. El proceso de identificación de dichas amenazas ha sufrido modificaciones que lo han perfeccionado en la medida en que se

han incluido otros factores para dicha evaluación preliminar.

El siguiente es el esquema de la metodología utilizada:

- a. Recopilación de la información de las características físicas de la ciudad (geología, geotecnia, topografía, hidrología, pendientes, geomorfología, inventario de desastres, procesos erosivos, localización de canteras y botaderos, modificación del perímetro urbano y ubicación de riesgo por decreto).

La información básica de estas zonas ha sido complementada por otras actividades tales como la base de datos geológica- geotécnica, el análisis de los usos del suelo del sector rural y el de la localización de la infraestructura hidráulica.

- b. Desagregación de la información recopilada por comunas y corregimientos.
- c. Cruce de las características geológicas, geotécnicas, morfométricas y geomorfológicas de cada una de las comunas de la ciudad con el fin de obtener los diferentes **grados de susceptibilidad a los movimientos de masa** para cada una de dichas zonas.
- d. Complementación y análisis del inventario de desastres en los últimos doce años originados por movimientos de masa e inundaciones (Mapa escala 1:10.000 y base de datos).
- e. Superposición de la información referente a la ocurrencia y recurrencia de eventos a la obtenida en el análisis de susceptibilidad con el fin de obtener así de una forma preliminar los diferentes **grados de amenaza por movimientos de masa**.

Nota:

Paralelamente a este análisis de la información temática recopilada se han realizado diagnósticos geológicos- geotécnicos puntuales de sectores tales como Villatina, San Antonio, La Ladera, Santa Cecilia, Piskines, López de Mesa, etc. Estos estudios se realizaron a solicitud de las diferentes dependencias de la Administración Municipal.

- f. Con el ánimo de enmarcar esta metodología dentro de las metodologías existentes para la elaboración de mapas de amenaza utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) específicamente dentro de un modelo cualitativo, se vió la necesidad de adicionar al análisis, factores tales como **la precipitación y los usos del suelo** y cambiar la unidad básica de estudio de **comuna por la microcuenca**, ya que es una unidad geográfica con características propias e independientes.

La evaluación de la ocurrencia y recurrencia de desastres entra a ser parte de la validación del modelo y no como factor de amenaza.

3.3. Pasos secuenciales del método para definir la amenaza por movimientos de masa

3.3.1. Definición de los factores y variables que intervienen en el análisis

Una de las etapas previas más importantes en la identificación y evaluación de la amenaza en una zona dada, es la definición de los factores que intervienen en la

misma; tales factores deberán cumplir las siguientes condiciones: ser cartografiable en forma de zonas homogéneas o de cargas puntuales; ser deducibles directamente a partir de información existente o mediante técnicas rápidas, y admitir una definición sencilla.

A continuación se hace una descripción de los factores que han sido definidos como determinantes de la amenaza a movimientos de masa y se indican las clases o tipos en que se divide cada factor.

Factor 1: Unidades geomorfológicas

Son todas aquellas formas específicas del relieve, desarrolladas como producto de la interacción de procesos, estructuras y materiales, asociadas a la evolución geológico de la superficie terrestre.

Las principales geoformas consideradas como existentes en el municipio de Medellín, son las siguientes: planicie aluvial, ladera baja -pendiente 3-10%-, ladera media -pendiente 10-25%-, ladera alta -pendiente 25-60%-, altiplanicie, abanicos aluviales, peldaños, cerros aislados, escarpes y cañones.

Variable 1

Llanura aluvial: corresponde a la zona con pendientes menores del 10% y constituida por depósitos provenientes de las quebradas y/o del río Medellín.

Variable 2

Ladera baja: es la zona que posee pendientes mayores del 10% y menores del 25%, conformadas principalmente por depósitos de flujo de lodo.

Pueden presentarse ocasionalmente problemas de reptación del terreno.

Variable 3

Ladera media: constituida por los terrenos con pendientes entre 25% y 40% y con materiales predominantes tales como depósitos de flujos de escombros y suelos residuales.

En esta ladera existen menores manifestaciones de inestabilidad tales como deslizamientos y/o reptación.

Variable 4

Ladera alta: conformada por terrenos con pendientes mayores del 40% y menores del 60%. Predominan suelos residuales y ocasionalmente afloramientos rocosos afectados en mayor o menor grado por procesos erosivos. Es frecuente la existencia de movimientos de masa.

Variable 5

Escarpe: áreas con pendientes mayores del 60%, conformadas por afloramientos rocosos afectados por fracturamientos, diaclasas o fallas. Ocurren fenómenos de caídas de bloques.

Variable 6

Cañón: depresión del terreno originada por el socavamiento y la incisión de una quebrada. Estos cañones son zonas de marcada inestabilidad geológica debido a que se presentan procesos erosivos tales como el socavamiento de los taludes, deslizamientos regresivos y

desconfinamiento de las bases de las laderas.

Variable 7

Altiplano: superficie relativamente plana ubicado por encima de las laderas de la ciudad. Pueden existir colinas, llanuras y cerros.

Variable 8

Cerro aislado: colina independiente del sistema de cordilleras, originando posiblemente como consecuencia de la erosión regional del valle.

Factor No. 2: Procesos erosivos

Los procesos erosivos consisten en el desprendimiento, arrastre y descarga del suelo, ocasionados por diferentes agentes (agua, gravedad, viento, etc.).

Las clases de erosión considerados -teniendo en cuenta que en el municipio de Medellín los agentes erosivos más importantes son el agua y la gravedad-, son los siguientes: erosión hídrica superficial (erosión laminar o por escurrimiento difuso, erosión en surcos o por escurrimiento difuso intenso, erosión en cárcavas), erosión en masa, reptación, hundimiento, socavación de orillas e incisión de cauces.

Para efectos de la evaluación de la amenaza se tuvieron en cuenta los siguientes grados de erosión (CIAF, 1983).

- Ninguna: no se aprecia la pérdida de suelo aunque si puede haber reptación y pequeños hundimientos.
- Ligera: se ha perdido menos del 25% del suelo superficial por procesos de

escurrimiento difuso normal; se pueden presentar pocos surcos.

- Moderada: se ha perdido entre el 25 y el 75% del suelo superficial; se observan procesos de escurrimiento difuso intenso, sin surcos o con pocos surcos, y soliflucción activa.
- Severa: ha habido remoción de más del 75% del suelo superficial y se observan frecuentes surcos y cárcavas aisladas; como procesos que pueden estar ocurriendo, se tienen: escurrimiento difuso intenso y concentrado, con surcos, cárcavas independientes, separadas por áreas de escurrimiento difuso intenso con surcos, soliflucción y deslizamientos aislados pequeños.
- Muy severa: presencia de una red densa de cárcavas y deprendimientos y deslizamientos densos y muy grandes.

En los grados de erosión se han considerado también los procesos erosivos inactivos, como son las cicatrices de movimientos de masa -principalmente deslizamientos-, que se encuentran más o menos estabilizados. La presencia de estas cicatrices puede ser indicativo de la posible inestabilidad de la zona considerada. También se ha dado especial atención al grado de concentración de las cicatrices y a su distribución relativa

Es necesario aclarar que el área afectada debe ser entendida como la porción de terreno que muestra la cicatriz, así como el área ocupada por material desplazado, el cual se considera igualmente inestable.

Factor No. 3: Usos del suelo

El uso del suelo es considerado como factor de amenaza, ya que cuando se supera

la capacidad potencial de los terrenos, tanto urbanos como rurales, puede acelerar o dinamizar los movimientos de masa; no obstante, ciertos usos del suelo pueden contribuir a disminuir la amenaza o contrarrestar los efectos de otros factores.

Los usos del suelo considerados fueron los siguientes: bosque natural, bosque plantado, rastrojo, pastos, cultivos limpios, cultivos permanentes, explotación de materiales de construcción, depósitos artificiales, asentamientos subnormales, asentamientos normalizados.

Los asentamientos humanos subnormales contribuyen a la amenaza por movimientos de masa, especialmente por el efecto que en la estabilidad de los terrenos tienen las prácticas anticuadas que en ellos se realizan, tales como: manejo inadecuado de las aguas lluvias, servidas y de abasto; excavaciones y movimientos de tierra incontraolados; construcciones de taludes de pendiente excesiva y de gran altura sin obras de protección; construcción de vías sin ninguna técnica y sin obras de defensa; construcción de viviendas en terrenos de fuertes pendientes, etc. etc.

Factor No. 4: Isoyetas

Se considera que el factor climático que tiene mayor influencia en la ocurrencia de los movimientos de masa en Medellín, es la precipitación, cuyas características principales son: intensidad, duración y frecuencia.

La intensidad hace referencia a la lámina de agua que cae en un evento de lluvia o de aguacero, en un tiempo determinado; la duración es el tiempo que transcurre entre el comienzo y la terminación de un aguacero; y es considerada como unidad de trabajo en la precipitación; la frecuencia expresa el número de

eventos de lluvia o de aguaceros registrados y la precipitación total acumulada en un período de tiempo determinado. De estas características, las más importantes en los movimientos de masa, son la frecuencia y la intensidad.

La lluvia como tal no representa amenaza; ésta se presenta cuando al caer, el agua se concentra, se infiltra y genera o acelera los movimientos de masa, según las características de los suelos y el grado de alteración e inestabilidad que presentan los terrenos. Cuando la cantidad de agua lluvia que llega al suelo, excede la capacidad de absorción e infiltración del mismo, el agua de exceso fluye sobre la superficie como agua de escurrimiento o escorrentía.

Factor No. 5: Formaciones geológicas superficiales y suelos

Las formaciones geológicas consideradas fueron las siguientes: depósitos de vertiente, suelos residuales, afloramientos rocosos y depósitos artificiales.

Variable 1: Depósitos de vertiente

Son aquellos que se han formado en las estribaciones de las laderas, por el desprendimientos de los materiales que conforman las partes altas y medias de los valles. Cuando estos depósitos se superponen por deslizamientos sucesivos, alcanzan a formar gruesas capas que ocultan por completo las rocas originales.

Los depósitos de vertiente tenidos en cuenta son los siguientes: depósitos de flujo de lodo, depósitos de flujo de escombros, depósitos de talud, depósitos de flujos saprolitizados y depósitos de flujo cementados.

Variable 2: Suelos residuales

En el municipio de Medellín, los suelos residuales se han formado a partir de las siguientes rocas: diorita (Stock de Altavista), cuarzodiorita (Batolito Antioqueño), metasedimentos, neis, anfibolita esquistosa, gabro, esquistos, anfibolita y serpentinita (dunita).

Variable 3: Afloramientos rocosos

Son todas aquellas rocas o unidades litológicas expuestas en la superficie de un área dada. Dichos afloramientos pueden ser de anfibolita, serpentinita (dunita), diorita, cuarzodiorita, gabro, esquistos, metasedimentos, neis o anfibolita esquistosa.

Variable 4: Depósitos artificiales

Se agrupan bajo esta denominación, todas aquellas acumulaciones de materiales de diferente índole, generados por la acción humana. Los depósitos considerados son los siguientes: desechos sólidos (basuras), depósitos de escombros y llenos estructurales.

Factor No. 6: Pendiente del terreno

La pendiente, como componente del relieve, se refiere al grado de inclinación del terreno o gradiente, expresado en porcentaje o grados.

Para efectos de su evaluación, se adoptó la siguiente clasificación, según rangos específicos: < 3%, 4-10%, 11-25%, 26-40%, 41-60%, > 60%.

Factor No. 7: Recurrencia de los movimientos de masa utilizado en la validación del modelo.

Este factor está relacionado con la regularidad con que se presentan los movimientos de masa en una zona dada. A diferencia de los otros factores, que tienen una connotación espacial, la recurrencia está relacionada con el tiempo.

Para la evaluación de este factor, se tuvo en cuenta la relación histórica de ocurrencia de desastres por deslizamientos en la ciudad de Medellín, durante el periodo comprendido entre 1979 y 1989.

3.3.2. Calificación de las variables y ponderación de los factores

Cuadro 1.

AMENAZA Por movimientos de Masa		
Factores/variable	Cal.	Pond
<ul style="list-style-type: none"> ● Unidad geomorfológica - Cerro aislado - Cañones - Escarpe Den-Estructu - Ladera alta Den-Estr - Ladera baja Den-Estr. - Llanura aluvial - Ladera Media Den-Estr - Peldaños Est y/o Den 	<ul style="list-style-type: none"> 3 5 4 5 2 1 3 2 	13%
<ul style="list-style-type: none"> ● Procesos erosivos - Ligeros - Moderados - Muy severos - Severos 	<ul style="list-style-type: none"> 2 3 5 4 	15%
<ul style="list-style-type: none"> ● Usos del suelo <i>vinculados en forma de</i> - Asentamientos subnormales en laderas - Asentamientos subnormales en quebrada - Pasto - Zona residencial formal 	<ul style="list-style-type: none"> 5 5 3 1 	14%
<ul style="list-style-type: none"> ● Isoyetas - 1.400 - 1.500 mm - 1.500 - 1.600 mm - 1.600 - 1.700 mm < 1.400 mm > 1.700 mm 	<ul style="list-style-type: none"> 2 3 4 1 5 	16%
<ul style="list-style-type: none"> ● Formaciones geológicas superficiales - Depósitos de talud - Depósitos de flujo de escombros - Depósitos de flujo de lodo - Depósito de flujo saprolitizado - Depósito residual de anfiboilita - Suelo residual de dunta - Terraza 	<ul style="list-style-type: none"> 2 4 5 2 4 5 1 	20%
<ul style="list-style-type: none"> ● Pendientes - 0 - 3% - 4 - 10% - 11 - 25% - 26 - 40% - 41 - 60% 	<ul style="list-style-type: none"> 1 1 2 3 5 	22%

3.3.3. Recolección, selección y análisis de la información

Definidos los factores que intervienen en la amenaza por los diferentes eventos de origen natural, se procede a la recolección, selección, análisis y evaluación de la información existente sobre dichos factores. Como es bien sabido, la calidad de esa información -determinada por muchos aspectos-, es de singular importancia en la definición precisa y objetiva de los grados de amenaza y en la zonificación.

3.3.4. Elaboración cartográfica (Planos temáticos)

Con base en la información obtenida en la fase anterior, se elabora un mapa de cada uno de los factores por separado. Cada mapa se constituye en la expresión gráfica de los datos descriptivos de la zona estudiada, en lo que respecta al factor información del modelo que se utilice.

La cartografía puede desarrollarse automáticamente, mediante la digitalización de cada mapa de los factores -mapa temático-. Esto permite, no solamente la salida de estos mapas por factores, sino también el almacenamiento en el computador de todos los datos correspondientes a cada punto del área que se está estudiando.

Los mapas temáticos para la cuenca que se está analizando se digitalizan en escala 1:10.000 a excepción del mapa de pendientes que es generado a través del ILWIS usando las curvas de nivel digitalizadas (ver documento "Guía metodológica para el uso del ILWIS), los mapas digitalizados (formaciones geológicas superficiales, geomorfológicos, usos del suelo, isoyetas, procesos erosivos), son convertidos a la estructura de remodelamiento espacial Raster para la aplicación del modelo.

3.3.5. Aplicación del modelo (Interrelación de los factores y sus tipos o clases)

Para la interrelación de los factores y variables se utiliza el modelo cualitativo elaborado a través del sistema de información geográfica ILWIS, en la forma indicada en el numeral 2.5.

3.3.6 Zonificación preliminar de la amenaza a través del SIG

Con base en el resultado anterior y en una tabla de clasificación que utiliza el ILWIS, se obtiene una zonificación que debe ser validada en el campo.

Tabla para la zonificación preliminar

		Grados de amenaza
1.0 -	1.5	Muy baja
1.5 -	2.5	Baja
2.5 -	3.5	Media
3.5 -	4.0	Media alta
4.0 -	4.5	Alta
4.5 -	5.0	Muy alta

3.3.7. Validación del modelo

Una vez realizada la interrelación de los factores y sus clases respectivas, la etapa que sigue es la validación del modelo. Para este efecto se requiere disponer de una zona piloto, de la cual se tenga el mayor volumen de información relacionada con los factores que se hayan definido; además, la zona debe caracterizarse por una gran variedad de condiciones, que permita analizar, prácticamente todos los grados de amenaza.

El objetivo de esta etapa es el de poder comprobar la validez de la ponderación

y la calificación asignada a los factores y sus clases respectivamente y hacer los ajustes correspondientes. Para ello es absolutamente necesaria la comprobación de campo.

Para probar el presente modelo, el Proyecto Col 88/010, ha escogido como zona piloto la microcuenca de la quebrada La Rosa, de la cual se tiene información aceptable sobre los diferentes factores, fuera de que en algunas áreas de la misma se han presentado tanto movimientos de masa como inundaciones.

Mediante la verificación de campo y con la ayuda del computador, se logra la zonificación preliminar que servirá de base para la obtención del riesgo.

3.3.8 Zonificación de la amenaza con base en los resultados de la validación

Una vez que ha sido verificada la validez del modelo, la etapa final es la zonificación de la amenaza mediante la utilización del sistema de información geográfica, como se explicó anteriormente. Este proceso permite clasificar las áreas de estudio, con respecto a un fenómeno determinado, en zonas de muy baja, baja, media, media alta, alta y muy alta amenaza.

3.4. Pasos secuenciales del método para definir la amenaza por inundaciones

3.4.1. Caracterización de la zona de estudio

La realización de un estudio de este tipo, que pretenda tener un cubrimiento am-

plio debe estar precedido por una revisión general, de toda la zona en consideración, que permita definir cuales áreas deben estudiarse en forma detallada, y cuales no lo ameritan. Para ello además del conocimiento de la historia de las inundaciones en la zona, es de principal importancia la observación de la geología y de los procesos geomorfológicos que se han presentado y que tienen lugar en ella.

En corrientes pequeñas en las que se presentan problemas asociados a un sitio específico, donde no se justifica realizar la evaluación de toda la corriente, es necesario llevar a cabo un estudio puntual que permita obtener la información para adelantar las medidas de mitigación adecuadas.

3.4.2. Análisis de recurrencia de eventos

La información de la ubicación y fechas en las que se han presentado desbordamientos es indicativa de la amenaza a la que puede estar expuesta una zona.

Debido a que la ocurrencia de un caudal dado es un fenómeno aleatorio, se requiere de un seguimiento durante un largo periodo de tiempo para que la información permita sacar algunas conclusiones. Además, si las condiciones de la cuenca están cambiando como consecuencia de variaciones en el uso del suelo u otras alteraciones, esto se verá reflejado en cambios en los caudales que se presentan.

Por lo anterior, la base histórica de inundaciones que se tiene para la ciudad, que sólo consta de doce años de registros, solamente es un índice aproximado de los problemas de inundaciones que se pueden presentar en el futuro. Obviamente, la ocurrencia reiterada de inundaciones en un lugar, indica que está altamente expuesto a la inundación.

Es importante anotar que aun si en un sitio no se han presentado inundaciones, esto no garantiza que está zona no está expuesta a la amenaza. Mas aún si se tienen en cuenta los cambios que pueden estarse presentando en la cuenca.

3.4.3. Evaluación hidrológica

La estimación de los caudales máximos, que son los que generalmente ocasionan las inundaciones, que se presentan en una cuenca, debe estar precedida por un conocimiento y análisis global de los principales factores que inciden en la respuesta hidrológica. Particular importancia tienen las condiciones climáticas, los usos del suelo que presenta la cuenca y las características de los drenajes.

Existen, básicamente, dos procedimientos para la estimación de los caudales que se presentan en un lugar determinado. El primero basado en registros directos de caudales máximos. El segundo, utilizando métodos indirectos que permiten obtener una relación entre los fenómenos de precipitación y escorrentía. A continuación se describe en forma sucinta cada uno de los procedimientos

3.4.3.1. *Determinación de caudales máximos con base en registros históricos*

La existencia de una estación limnimétrica o limnigráfica en un sitio calibrado previamente, permite obtener una serie de valores máximos de caudal, que, mediante un tratamiento estadístico, posibilitan la estimación (dentro de un determinado rango de confiabilidad), de los caudales asociados a diferentes periodos de retorno.

Algunas de las distribuciones de probabilidad más utilizadas para este fin, son las

siguientes: Normal, Log-Normal, Pearson, Log-Pearson, Weibull, etc.

Luego de realizar las pruebas estadísticas de la serie de caudales máximos, se elige la distribución de probabilidad que más se adecue y con ella se realizan las estimaciones.

Aunque este es el método más adecuado para la estimación de caudales, porque se modela directamente la variable de interés, sólo en raras ocasiones se cuenta con los registros necesarios para el modelamiento en corrientes pequeñas.

Además de la escasez de sitios de medición, otra gran limitación en este procedimiento, es la extensión del período de registros. No pueden esperarse estimaciones válidas para periodos de retorno grandes si se tienen series de registros de poca extensión.

3.4.3.2. *Métodos de estimación indirecta*

Se debe recurrir a éste tipo de métodos cuando, como en la ciudad, no se tiene una información de caudales adecuada.

La respuesta de una cuenca ante un evento de precipitación, depende no sólo de las características morfológicas de la misma, sino también, de las condiciones de humedad antecedente. Adicionalmente, la fuerte variación en los comportamientos espacial y temporal de la lluvia, hacen muy difícil la predicción del caudal que se producirá en un sitio dado.

La información acerca del régimen de lluvias (registrado en estaciones pluviográficas), es, en muchas ocasiones, suficientemente amplia para ser utilizada, mediante un tratamiento de tipo estadístico, en la estimación de los valores de precipitación máxima asociados a una