3. EVALUACION Y ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR FRM

3.1. OBJETIVO, METODO DE ESTUDIO Y MODELO EMPLEADO

La evaluación y la zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa tienen como objetivo proporcionar una herramienta básica para la toma de decisiones sobre la planificación del desarrollo urbanístico y las inversiones a realizarse en el área estudiada.

La evaluación y la zonificación de la amenaza por fenómenos geodinámicos exógenos se realizó a través de su correlación con la susceptibilidad natural de las áreas al desarrollo de los mismos (INGEMETRICA LTDA, 1999, Tchemodanova, 2000). Esta metodología fue creada con base en varios estudios realizados para el INVIAS, ECOPETROL y DPAE, lo que permitió acumular los datos y concebir una ecuación empírica para la evaluación de la amenaza.

La evaluación partió de la consideración de que el análisis debe ser cuantitativo, y empleando los conocimientos y los métodos de las ciencias geológicas y geotécnicas, especialmente de la geodinámica, la mecánica de rocas y la mecánica de suelos.

La valoración de la susceptibilidad se presenta en forma probabilística semicuantitativa, con base en el conocimiento de las leyes naturales del desarrollo de los fenómenos geodinámicos, y utilizando las clasificaciones existentes en la mecánica de rocas y la mecánica de suelos.

En mecánica de rocas y suelos la evaluación de la estabilidad de los taludes se hace a partir del factor de seguridad (Fs), que no es otra cosa, que relación entre las fuerzas que se resisten al movimiento (reactivas) y las fuerzas que lo generan (activas). De aquí, este factor no depende del tipo del material ni del tipo del ambiente geológico, lo mismo que la relación entre el Pf y Fs. Es lógico pensar, que el factor de seguridad esta estrechamente ligado a la amenaza, comprendida como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno no deseado, que afecta tanto al hombre como las construcciones.

Como criterios para la estabilidad de taludes se han tomado los factores de seguridad presentados por Schuster R. (1978) y Paducov (1981):

$F_s<1$ Inestable
$F_s= 1.0-1.5$ Estado de equilibrio límite
$F_s> 1,5$ Estado estable

Se consideró que el factor de seguridad de 0 a 1.0 corresponde a amenaza alta; de 1.0 a 1.5 como media; y se construyó mayor que 1.5 como de amenaza baja.

La distribución probabilística en forma de campana de Gauss, con base en los resultados obtenidos en los cálculos de estabilidad.

De acuerdo con la metodología propuesta para la evaluación de la amenaza, se efectuaron las siguientes actividades y tareas:

a) Realización de una zonificación geomecánica del área con base en las propiedades físico – mecánicas de los materiales presentes en el área definiendo así los sectores homogéneos.
b) Definición, por medio de la metodología propuesta, de la susceptibilidad a los fenómenos de deslizamientos, derrumbes, caídas de bloques, flujos de detritos o de lodo, y de erosión, de cada uno de los sectores homogéneos.
c) Evaluación de la estabilidad de cada uno de los sectores homogéneos típicos por medio de las propiedades físico - mecánicas, y definición del factor de seguridad.
d) Utilización de la correlación de la susceptibilidad con el factor de seguridad y la probabilidad de falla, definiendo de esta forma el valor de la amenaza en términos probabilísticos.

El primer punto (a) ya se completó y se trató en el numeral 2.7.3.2.

A continuación se describen y sustentan los criterios que se han tenido en cuenta para la evaluación de la susceptibilidad y el factor de seguridad y la relación de este último con la amenaza y/o probabilidad de ocurrencia de uno u otro fenómeno.

3.2. ZONIFICACIÓN POR SUSCEPTIBILIDAD

3.2.1 Criterios y variables aplicados

La evaluación de la susceptibilidad a los FRM se efectuó para cada uno de los 88 sectores homogéneos, definidos con base en lo descrito en el numeral anterior y su ubicación en el terreno.

Las observaciones de campo identificaron varios fenómenos de remoción en masa: caídas de bloques, deslizamientos y flujos de lodo, todos agravados por procesos de erosión por escorrentía superficial. La distribución espacial de dichos fenómenos está estrechamente relacionada con los factores intrínsecos del terreno, tales como la composición de los materiales geológicos (clasificación geomecánica); y las condiciones geomorfológicas, tectónicas, hidrogeológicas, y climáticas y las características de la cubierta vegetal.

Por consiguiente, el análisis de susceptibilidad de las áreas homogéneas a los procesos (evidentes y ocultos) se efectuó a partir de los factores naturales propios del terreno.

Para el análisis de susceptibilidad se conformó la matriz de evaluación presentada en el cuadro 3.1, donde se pueden apreciar los factores y parámetros de evaluación.

Entre los factores intrínsecos del terreno y los parámetros de evaluación se encuentran los siguientes:

- Relieve (Sr) condiciones geomorfológicas. Parámetros: pendiente, longitud, altura y formas. Es un factor primordial para definir qué tipo de fenómeno puede presentarse en cada uno de los 88 sectores.

- Respuesta sísmica de los suelos (S_s). Parámetro: Factor de amplificación, según Medvedev (1964).

- Grado de desintegración (S_d). Parámetro: cohesión.

- Propiedades geomecánicas (S_g). Parámetro: Grupo según clasificación de Lomtadze (1984).

- Condiciones hidrogeológicas e hidrológicas (S_h). Parámetros: permeabilidad de la masa a la presión hidrodinámica y coeficiente de infiltración J, que se define como la relación entre la precipitación (E), la escorrentía (i) y la evaporación (P), así:

$$J = (E - i)/P$$

- Condiciones de recubrimiento por vegetación (Sr). Parámetro: porcentaje de recubrimiento.

- El análisis factorial se realiza en forma semicuantitativa. La valoración se hace en una escala de 1 a 5, que fue seleccionada de acuerdo a la clasificación general de rocas y depósitos no consolidados de Lomtadze (1984). La valoración de la susceptibilidad natural ($S_{natural}$) se hace independientemente para cada uno de los factores que influyen sobre la resistencia de las rocas y suelos. Luego, para obtener el resultado final, se procede a la suma de las susceptibilidades parciales, es decir:

$$S_{natural} = \Sigma S_p + S_s + S_d + S_g + \Sigma S_h + S_r$$

La importancia y/o peso de cada factor se dió de acuerdo con la calificación de la susceptibilidad, que fue concebida de acuerdo a las Leyes naturales de desarrollo de los fenómenos de remoción en masa, con base en la teoría de pronostico, enunciada en la bibliografía. Por ejemplo, a los rellenos antrópicos se les asignó el puntaje máximo de susceptibilidad; y entre mayor es el ángulo de la inclinación de los taludes, conformados por estos materiales, mayor es el valor que se le asignó a la susceptibilidad por el factor del pendiente, y así sucesivamente por cada uno de los factores naturales que influyen sobre la estabilidad de los taludes. Además se sabe, que la inclinación de taludes naturales se encuentra en estrecha relación con el tipo del material. Los taludes verticales son propios de los materiales más competentes, en este caso, mayor peso va a tener el factor de pendiente, en relación con el tipo del material.

Es de anotar, que la evaluación de la susceptibilidad se realizó principalmente con las pendientes del terreno tomados del plano del IGAC, y solo para aproximadamente un 25% del área total, estos corresponden a la situación actual. Como se anotó en los capítulos anteriores, el relieve fue modificado notoriamente por la actividad urbanística mediante la ejecución de cortes y rellenos. Por lo tanto, la evaluación ejecutada no refleja en un 100% la realidad en los sectores donde no se realizó ningún levantamiento topográfico.

En la calificación de la susceptibilidad no se tuvo el factor antrópico, porque la variable, denominada como la susceptibilidad, comprende la predisposición intrínseca del medio al desarrollo de los fenómenos de remoción en masa. La valoración de la influencia del factor antrópico sobre el medio natural puede y debe cuantificarse en un estudio de evaluación del impacto ambiental, cuyos resultados pueden integrarse al estudio de evaluación de riesgos inducidos por el factor antrópico, que tiene gran importancia en la zona. El presente trabajo no incluye la evaluación cuantitativa del impacto que ha generado el hombre, sino de zonificación de riesgos por fenómenos naturales, donde el factor antrópico es uno de los factores detonantes, que se tuvo en cuenta en los cálculos de estabilidad de taludes.

Los resultados de la evaluación realizada se presentan en los cuadros 3.2 (deslizamientos), 3.3 (caídas de bloques), 3.4 (Flujos de tierra), y 3.5 (erosión) y en el mapa de susceptibilidad del anexo 3.

3.2.2. Caracterización de las áreas homogéneas por su susceptibilidad a los FRM.

La caracterización de las áreas homogéneas con base en sus susceptibilidades a los procesos desestabilizantes, se efectuó por medio de la evaluación descrita en el numeral anterior.

Para una mejor comprensión, los resultados obtenidos se agruparon en el Cuadro 3.6, y en el mapa 7 (Anexo 3), donde cada uno de los sectores evaluados se calificó por su susceptibilidad, de acuerdo a la siguiente clasificación:

Rango de valores	Susceptibilidad	Color
9 - 21	Baja	Verde
22 - 33	Media	Amarillo
34 - 45	Alta	Rojo

La mayor susceptibilidad a los procesos de deslizamiento la presentan los sectores conformados por los rellenos antrópicos (I-A-4-$ae_{1, 2, 3, 4,6}$; I-D-1-ae_{7} ; II-A-4-$ae_{3, 5, 6, 8, 9,10}$; II-A-4-ac_{17}), debido principalmente a las propiedades geomecánicas de los materiales que los componen, y las altas pendientes del terreno.

Los sectores muy susceptibles a los fenómenos de flujos de tierra, son: I-A-1–$ft_{3,4}$ y II-A-1–$ft_{2,6,11,13,}$Todos los factores que se analizaron favorecen su desarrollo, más si se tiene en cuenta que este sector recibe continuamente material detrítico desde las partes altas. Aunque las magnitudes de los flujos son relativamente pequeñas, estos influyen desfavorablemente en la estabilidad de los sectores ubicados en su cabecera.

Todos los sectores analizados a los fenómenos de derrumbes y las caídas de bloques han desembocado en rangos de valores correspondientes a una susceptibilidad baja, debido principalmente a que las pendientes naturales del terreno no superan los 40º, y al buzamiento favorable de la estratificación del macizo rocoso. Sin embargo, en el caso de efectuarse cortes verticales con alturas superiores a 3 m, tal como se observan en la vía de acceso, (ubicada en la parte alta del barrio), la susceptibilidad puede alcanzar una magnitud media.

La erosión de las rocas y depósitos no consolidados por aguas de escorrentía superficial es un proceso que se evidencia prácticamente en toda el área, y se debe principalmente a las características de los materiales, y las altas pendientes. El proceso de erosión se presenta en las áreas desprovistas de recubrimiento alguno, y afecta principalmente las vías de acceso y las zonas de cárcavas. Es necesario destacar que el desarrollo del fenómeno de erosión está estrechamente relacionado con los otros fenómenos descritos anteriormente, y puede primar como un factor detonante. La mayoría de los sectores (67%) tienen evidencian una susceptibilidad alta al desarrollo del proceso de erosión.

3.3. ANÁLISIS DE LOS FACTORES DETONANTES

Los factores detonantes de los procesos de desestabilización de los taludes son tres: la actividad antrópica, la pluviosidad y la sismicidad del área de estudio.

3.3.1. Actividad Antrópica

A partir del análisis de susceptibilidad de las áreas homogéneas por procesos, se deduce que la causa principal de los procesos se originó, sin duda, por la intervención antrópica anterior al presente estudio. Esta intervención propició la creación de nuevos tipos de depósitos, denominados como antrópicos, por la construcción de vías y la urbanización del sector.

Dicha intervención antrópica también produjo los siguientes cambios notables en el estado de equilibrio geomecánico natural del área:

1. Modificaciones del drenaje natural.

2. Alteración de los elementos del ciclo hidrológico; escorrentía, infiltración, evapotranspiración, y la cantidad y calidad de las aguas subterráneas. Esta alteración se originó por fugas desde el sistema rudimentario del abastecimiento de agua potable y por los vertimientos de aguas residuales desde las viviendas.

3. Cambio del relieve, con un aumento de las pendientes debido a los cortes y efectuados para la construcción de viviendas.

4. Conformación de rellenos con material mixto y heterogéneo, proveniente de la construcción de las vías y de las excavaciones para las casas, contaminándolos con basuras, algunos de ellos en sitios desfavorables para la estabilidad de los taludes.

Lo anterior desembocó en unas condiciones geotécnicas relativamente recientes a muy recientes, en cuyo nuevo conjunto sistemático todavía no ha logrado un estado de equilibrio, y se encuentra en un proceso de acomodamiento. Los fenómenos actuales de desestabilización son el reflejo de este proceso.

En términos generales, el mal manejo de las aguas lluvias residuales continua siendo un factor detonante principal para el desarrollo de los procesos de erosión, deslizamientos y flujos de tierras.

El caudal máximo de las descargas de aguas sin control ni canalización en el área de estudio se estima en 0.011 m^3/seg (950,4 m^3/dia). Una parte de este caudal se infiltra y satura el subsuelo así alimentando permanentemente las aguas subterráneas, y otra parte, correspondiente a las aguas negras de las viviendas (60%), aumenta la escorrentía superficial. Sin embargo, este caudal es muy inferior al máximo calculado para la lluvia crítica de 10 años (4,02 m^3/seg) y de 25 años (4,8 m^3/seg). Las aguas de vertimiento contribuyen principalmente al cambio de los valores de "c" y "φ" de los materiales porque contribuyen a su saturación y su contaminación por materia orgánica y por microorganismos.

3.3.2. Pluviosidad

En la zonificación efectuada por la EAAB (IRM, 1995) el área de estudio corresponde a la Zona IV. Las estaciones más cercanas a la zona son La Regadera y el Tanque Jalisco, donde se registra una precipitación promedio anual respectivamente de 968 y 567 mm, y una evaporación promedio de 691 mm, lo que indica un clima cercano al árido.

Tal como se anotó en el numeral 2.4.4., la distribución anual de las lluvias en la zona es bimodal, con dos períodos lluviosos, y con precipitaciones máximas en los meses de mayo (135 mm) y octubre (100 mm).

Los resultados de los estimativos para la intensidad de las lluvias máximas con períodos de retorno de 10 y 25 años son de 68 y 88 mm/h respectivamente, y tendrían una duración estimada de 15 minutos.

Si comparamos estos valores con la permeabilidad de los depósitos que conforman el área, que oscila entre 83 y 833 mm/hora (ver cuadro 2.3), se puede concluir que una buena parte del agua se infiltra fácilmente.

La permeabilidad del substrato rocoso es de 10 o más veces inferior a la de otros los depósitos, razón por la cual muy posiblemente se genera un flujo temporal de agua por los contactos depósitos – rocas.

Los análisis de los antecedentes del comportamiento de las áreas de deslizamientos potenciales durante un período de 6 años (incluyendo el periodo del presente estudio), con base principalmente en los testimonios de los vecinos y en las fotos áreas de diferentes épocas, han demostrado que las lluvias han tenido una incidencia notoria inestabilidad en la de los rellenos antrópicos utilizados en las vías y viviendas.

La influencia de la precipitación incide directamente sobre el desarrollo de los procesos de erosión hídrica, la formación de cárcavas y los flujos de lodo. Estos procesos se activan con una lluvia de cualquier intensidad, y son más notorios en los períodos de alta pluviosidad.

El caudal máximo de escorrentía calculado para diferentes zonas hidrológicas varía de 0,49 m^3/seg a 1,20 m^3 /seg y de 0,52 m^3/seg a 1,43 m^3/seg, para lluvias máximas con periodos de retorno de 10 y 25 años respectivamente (ver cuadro 2.6).

En el área no existe ningún sistema de manejo de aguas lluvias. Como es de suponer, con los mayores caudales y las mayores energías el agua llega hasta los sectores topográficamente más bajos. Para el presente estudio, la influencia de la precipitación se tuvo en cuenta por medio de la disminución de los parámetros de “c” y “φ” (ensayo en estado saturado), y con el incremento del nivel freático, hasta el punto de considerar los materiales como totalmente saturados. Esta situación también puede presentarse cuando se presenten fugas de las mangueras de acueducto, situación que se presenta a diario en este sector.

3.3.3. Sismicidad

De acuerdo a la microzonificación sísmica de Bogotá, el área de estudio pertenece a una zona de riesgo intermedio, con una magnitud máxima esperada de 7.0, y con una aceleración horizontal de 0.24 g.

Esta magnitud se califica como fuerte, porque provoca daños graves en las construcciones, y en muchos casos deslizamientos en las laderas, y cambios en los caudales de los manantiales y de otras fuentes hídricas, y en el nivel freático (Lomtadze, 1977).

Los cambios en las condiciones comienzan a ser observables con un sismo de intensidad VI, o inclusive inferior, si se incluye los factores de la ampliación local del espectro de aceleración por efectos de sitio y material geológico.

El análisis de la influencia de la sismicidad, como un factor detonante de los procesos desestabilizantes que se podrían originar en el área de estudio, se efectuó por medio de los cálculos de estabilidad.

Los antecedentes de la actividad sísmica ocurrida durante el período desde que se hizo notoria la urbanización del área (1990), hasta la fecha del presente estudio (1999), se analizaron en relación con los efectos que se han producido sobre el área. Las entrevistas con los vecinos del área, y la comparación tanto de fotografías áreas como las tomadas en el sitio, ambas en diferentes épocas, no han revelado ninguna evidencia de movimientos perceptibles por causa de los sismos.

En el cuadro 3.7 se presentan los sismos cercanos más intensos que ocurrieron durante dicho período.

Cuadro 3.7 Eventos Sísmicos que se consideraron para el presente estudio

SITIO	FECHA	MAGNITUD	
		EN FOCO	EN BOGOTA
Nariño	17 de octubre de 1992 18 de octubre de 1992	6.6 7.2	Hasta 4 – 5
Paez	6 de junio de 1994	6.4	
Tauramena	19 de enero de 1995	6.5	
Calima	2 de agosto de 1995	6.6	
Armenia	19 de enero de 1999	6.4	

Los últimos temblores que generaron daños de consideración en Santafé de Bogotá fueron los sismos de 1917 y de 1928 (INGEOMINAS, 1997).

De acuerdo con el catalogo de sismos históricos de Bogotá (INGEOMINAS, 1997), se estima que el período promedio de recurrencia de un sismo cercano es 50 años, para una intensidad de VII-VIII en la escala de Mercalli. Es probable que un sismo cercano active los procesos destructivos en los sectores potencialmente inestables del área de estudio.

Para el cálculo de estabilidad a las cargas dinámicas se estimó el coeficiente local de amplificación de la intensidad del sismo para cada uno de los sectores analizados. Este coeficiente varía de 1.0 en la roca hasta 2.3 a 2.6 en los flujos de lodo y en los rellenos antrópicos ubicados sobre las superficies inclinadas con pendientes hasta de 35º.