

11. AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS.

11.1. Consideraciones generales.

Los procesos de remoción de masa sobre las vertientes están gobernados por diversos factores: formaciones geológicas superficiales, geomorfológicos, estructurales, climáticos y biológicos; sobre una vertiente el paso de condiciones de estabilidad a condiciones de inestabilidad puede ser disparado por la ocurrencia de aceleraciones producidas por sismos, por sobresaturación de los suelos, o por acción de la biomasa subaérea que actúa, por ejemplo, a través de aumento de la tensión de las raíces sobre ellos (Restrepo, 1997). Ante la ausencia de información sobre las formaciones geológicas superficiales se escogieron criterios petrográficos relacionados con el tipo de minerales, su tamaño y textura; así, por ejemplo, rocas con altos contenidos de minerales de hierro se transforman en saprolitos arcillosos, mientras que rocas intermedias con mediano a alto contenido de cuarzo y grano medio a grueso (cristales de hasta varios milímetros), generan suelos granulares, arenosos. El principal parámetro geomorfológico es la pendiente, sobre la que actúa la fuerza de la gravedad. Pendientes pequeñas sobre laderas cortas son menos susceptibles a deslizarse, lo mismo que pendientes escarpadas debido a que estas últimas son expresión de otras condiciones (p. ej., rocas masivas poco fracturadas). En condiciones de trópico húmedo, en Costa Rica y en Colombia, se ha encontrado que sobre las pendientes intermedias ocurren los mayores movimientos de masa (Mora & Vahrson, 1992; Olivera & Aguirre, 1991). Los factores estructurales son las zonas de falla geológica, el rumbo y buzamiento de la estratificación, orientación y densidad de planos de fracturamiento o de diaclasas, rumbo y buzamiento de foliación. El clima (precipitación y temperatura) actúa principalmente de dos maneras: como responsable de los procesos de descomposición de los minerales de las rocas hasta formar saprolitos (a mayores precipitaciones y temperaturas las rocas se descomponen más rápida y profundamente) y como agente disparador

de deslizamientos por sobresaturación de los suelos y consecuente pérdida de cohesión, además de contribuir con masa adicional sobre una vertiente potencialmente inestable. El papel de la vegetación es menos entendido, en razón de que no existen todavía modelos probados que permitan conciliar la ocurrencia de movimientos de masa en diversidad de ecosistemas naturales e intervenidos (Restrepo, 1997).

11.2. Información disponible.

De los diversos tipos de información idealmente necesarios para realizar modelamientos de amenaza por deslizamientos (petrográfica, formaciones geológicas superficiales, climática, etc.), sobre la región (también válido para otras del país), sólo se dispone de cartografía y documentación parcial sobre algunos, principalmente de cartografía de curvas de nivel, geológica y climática, con cobertura homogénea a resolución equivalente a 1:1'000,000. En estas condiciones, y utilizando experiencias previas modelamiento por movimientos de masa en otras regiones del país, se decidió acopiar, procesar y modelar la información cartográfica, geológica y de lluvias, para generar un modelo del potencial de movimientos de masa con resolución espacial equivalente a 1:500,000 (OSSO para ECOPETROL, 1995).

El área de trabajo para este modelamiento, que incluye toda la cuenca del río Atrato, cubre el centro y norte del departamento Chocó y parte de Antioquia Córdoba y Risaralda. (Fig. 11.1), así como la vertiente Pacífico de la Serranía del Baudó.

11.3. Metodología para el modelamiento.

Como insumos básicos se incluyeron el mapa digital de curvas de nivel (hipsografía) de Colombia, ESRI (1995); el mapa de Isoyetas de Colombia, Himat (1988) y el Mapa Geológico de Colombia, Ingeominas (1988), todos a escala 1:1'000.000.

A partir de cada uno de estos insumos básicos se obtuvieron en su orden respectivo imágenes (modelos intermedios) correspondientes a: **a)** un modelo de elevación digital (DEM), con resolución espacial de pixel de 500 m, a partir del cual se obtuvo el modelo de pendientes naturales del terreno (Mapa 2); **b)** un modelo de cantidad de lluvia promedio al año, con resolución espacial de pixel de 500 m (Mapa 4), y **c)** un modelo de susceptibilidad a la remoción de las formaciones geológicas superficiales, de acuerdo con las características petrográficas, texturales y mineralógicas de las unidades geológicas, a la misma resolución de los dos anteriores.

Las características técnicas de cada imagen es descrita en la Tabla 11.1:

Tabla Error! Unknown switch argument.1.1 Ficha técnica de los modelos intermedios

Columnas	460
Filas	780
Sist. de Ref.	Plano
Unidades	M
Dist. unitaria	1,000
min. X	570,000
max. X	800,000
min. Y	1'065,000
max. Y	1'455.000
Resolución	500,000

Por tratarse de cartografía original a escala 1:1'000,000 toda ella se manejó con el sistema de coordenadas planas de Gauss con origen en Bogotá cuyas coordenadas son 1'000,000 m E y 1'000,000 m N. El área de trabajo definida abarca la región comprendida entre las coordenadas 570,000 m E, 1'065,000 m N y 800,000 m E, 1'455,000 m N, la cual cubre un área de 89,700 km² (Mapa 1).

La información utilizada para este proyecto fue digitalizada y llevada a formato vectorial. Aquellas entidades que definen unidades de igual valor o características similares fueron codificadas según la nomenclatura de la fuente original. Una vez terminada esta digitalización se procedió a la conversión a formato raster para realizar los cruces de las variables de acuerdo a los modelos desarrollados. Para estos procesos se emplearon los paquetes informáticos Autocad, PROMAP, IDRISI y MapInfo.

A continuación se presenta la memoria explicativa de cada uno de los pasos, previos para la generación del modelo de potencial de movimientos de masa.

Modelo de elevación del terreno. Este insumo es básico y esencial, pues a partir de él se genera el modelo de pendientes naturales del terreno. Fue generado con la ayuda del módulo INTERCON de IDRISI, el cual permite interpolar los datos a partir de un mapa de curvas de nivel. Los valores de elevación, según la cartografía, van desde la cota 0 m.s.n.m. en las costas hasta la cota 3900 m.s.n.m. en la cordillera Occidental en los límites de los municipios Andes y Mistrató de Antioquia y Risaralda respectivamente.

Por la forma como interpola los datos el programa INTERCON: creación de perfiles longitudinales, transversales y diagonales y calculando para cada punto (pixel) de la imagen 4 valores de alturas y asignación final del valor que corresponda a la curva con mayor pendiente, en el modelo se observan una serie de anomalías o “ruidos” que se hacen notorias en aquellas áreas con menor cobertura de información topográfica. Sin embargo el programa cuenta con algunas rutinas o filtros que permiten reducir o suavizar los contrastes o diferencias en los valores resultantes de estos procesos de interpolación lineal (Idrisi, 1997). Para reducir este tipo de efectos propios del algoritmo interpolador se requiere de mayor densidad de información.

En el modelo de elevación digital de la región se destacan la Cordillera Occidental, las Serranías de Abibe, San Jerónimo y Ayapel; en la porción central el valle del río Atrato con elevaciones que van desde el nivel del mar hasta los 150 m.s.n.m. en el pie de monte de la Cordillera Occidental, y las Serranías del Baudó y del Darién.

Modelo de pendientes naturales del terreno. A partir del modelo anterior la rutina SURFACE de IDRISI, permite el cálculo automático de las pendientes naturales del terreno. Estas pueden ser obtenidas en porcentajes o en grados; para nuestro caso fueron calculadas en porcentajes. En el Mapa 2 se aprecian pendientes muy suaves en la llanura de inundación del río Atrato, moderadas en la Serranía del Baudó y, las más fuertes, de hasta el 70%, en la Cordillera Occidental y en la serranía de Darién, al Norte, en la frontera con Panamá.

Del modelo anterior se obtuvo una segunda imagen, reclasificando las pendientes en cuatro rangos o valores relacionados con su incidencia en la susceptibilidad a los deslizamientos (Mapa 3 y Tabla 11.2). El valor mas alto, asignado a pendientes entre 25% y 35%, es una expresión de la dinámica más activa de las vertientes intermedias de las cordilleras, con base en consideraciones de evolución y estabilidad relativa del paisaje (Mora, 1992, en OSSO para Ecopetrol, 1995), así como en evaluaciones sobre vertientes colombianas (Olivera & Aguirre, 1992 en OSSO para Ecopetrol, 1995).

Tabla 11.Error! Unknown switch argument. **Clasificación de pendientes naturales del terreno**

Pendientes (%)	Valor asignado	Kilómetros ²	Hectáreas
< 3	0	37.833,50	3'833.500
3 - 12	1	17.754,25	1'775.425
12 - 25	3	*8.540,50	*854.050
25 - 35	6	867,00	86.700
> 35	3	*8540,50	*854.050

** Valor correspondiente a la suma de los dos rangos.*

Modelo de lluvias. El mayor contenido de humedad en las formaciones geológicas superficiales contribuye a los movimientos, actuando como reductor de la resistencia a los esfuerzos cortantes y/o aumentando la masa potencialmente inestable. Este es un factor que, estrictamente, debe ser considerado como temporal, es decir, como disparador dependiendo de la distribución, intensidad y duración de las lluvias en un área específica. Por carecer de información sobre este parámetro, para el modelamiento se asumió lo que puede considerarse una aproximación: la variación regional de los valores de precipitación media anual, como expresión de mayores valores promedio de saturación de las vertientes. Se utilizó el Mapa de Isoyetas de Colombia para el periodo 1964-1980, (HIMAT, 1989).

Después de la digitalización de las isoyetas (Mapa 4), se procedió a calcular, con el módulo INTERCON de IDRISI (Idrisi, 1997), el modelo de precipitaciones. Las precipitaciones varían desde los 7,000 mm o más, al Sur del área de estudio, 5,000 a 3,000 mm en la parte central hasta descender gradualmente a 1,000 mm hacia el Norte.

Finalmente, el modelo anterior fue reclasificado (Mapa 5), en 6 rangos que, para efectos del modelo final, se asumieron como los indicadores de la humedad relativa del suelo. Los valores de precipitación y los asignados para efecto del modelo de análisis, así como las áreas que abarcan cada uno de estos rangos se muestran en la Tabla 11.3.

Tabla 11.Error! Unknown switch argument. **Modelo de llluvias**

Precipitación media anual (mm)	Valor asignado	Kilómetros²	Hectáreas
< 1000*	1*	*	*
1000 – 2000	2	5.601,75	560.175
2000 – 3000	4	12.698,00	1'269.800
3000 – 4000	5	14.908,25	1'490.825
> 4000	6	31.787,25	3'178.725

* *Este rango no ocurre en el área evaluada.*

Modelo de Formaciones Geológicas Superficiales. De acuerdo con la metodología seguida (OSSO para Ecopetrol, 1995), como una aproximación a las **formaciones geológicas superficiales**, las unidades litológicas del Mapa Geológico de Colombia (Mapa 6, a partir de Ingeominas, 1988) fueron clasificadas y agrupadas según sus características petrográficas, texturales y mineralógicas, de tal manera que se expresara la susceptibilidad a la remoción de los materiales derivados de su descomposición, que cubren los primeros metros y decenas de metros de espesor sobre el territorio. Se asignaron atributos de menor susceptibilidad a las rocas ácidas (ricas en sílice), poco meteorizables y más consolidadas, y atributos de mayor susceptibilidad a los depósitos inconsolidados, a las rocas básicas (ricas en minerales ferromagnesianos y más meteorizables) y a las rocas metamórficas densamente foliadas (Mapa 7 y Tabla 11.4).

Tabla 11. Error! Unknown switch argument. **Modelo de formaciones geológicas superficiales**

Unidades litológicas	Códigos	Valor asignado	Kilómetros²	Hectáreas
Volcánicas ácidas, metamórficas de alto grado, plutónicas ácidas, sedimentarias clásticas (areniscas, conglomerados, etc.).	To, Te	1	30,631.5	3'063,150
Volcánicas intermedias, esquistos, filitas, sedimentarias pelíticas (lutitas, lodolitas, arcillolitas), calcáreas, sedimentarias con aporte volcánico, intrusivas intermedias.	Tpi, Toe, Te, Kso, Kvb, Mpi, Tpri	3	19,306.5	1'930,650
Metamórficas de bajo grado, intrusivas básicas, intercalaciones de areniscas y lutitas, depósitos terciarios y cuaternarios (flujos de lodo, flujos piroclásticos, depósitos fluviovolcánicos, piroclastos).	Tvb, Q, Tpu, Tvb	6	150,57.25	1'505,725

11.4 Modelamiento del potencial de movimientos de masa en el NW de Colombia.

El modelo generado incluye los parámetros ya mencionados, para los cuales se establecieron y valoraron diversas categorías, de acuerdo con el grado de incidencia en la generación de movimientos de masa. Finalmente el modelo se obtuvo como el producto, mediante operación de álgebra booleana, de los tres grupos de variables ya mencionadas:

Pendientes reclasificadas x Modelo de Lluvias x Geología reclasificada

Este procedimiento se llevó a cabo con el módulo OVERLAY de IDRISI cuya función principal es la de realizar operaciones de álgebra de imágenes (*raster* en este caso), obteniéndose una imagen intermedia cuyos valores representan el producto de las tres variables consideradas, para cada unidad del área cubierta por el área de trabajo (Mapa 8). Los valores obtenidos están dentro de un rango de 0 a 180, de acuerdo con los asignados en cada uno de las variables utilizadas, como se muestra en la Tabla 11.5.

Tabla 11.5. Valores obtenidos en el modelo de potencial de movimientos de masa y clasificación final

Potencial bruto			Potencial reclasificado				Potencial
Valor	km ²	Ha	Valor	km ²	Ha	%	
0	38,014.75	3'801,475	0	38,014.75	3'801,475	58.49	Nulo
2	121.25	12,125	1	5,798.75	579,875	8.92	Muy Bajo
4	1,746.25	174,625	1				Muy Bajo
5	1,581.50	158,150	1				Muy Bajo
6	2,349.75	234,975	1				Muy Bajo
12	2,664	266,400	2	2,664	266,400	4.10	Bajo
15	3,026.75	302,675	3	8,067.5	806,750	12.41	Moderado
18	3,832.25	383,225	3				Moderado
24	148.25	14,825	3				Moderado
30	1,060.25	106,025	3				Moderado
36	5,078.25	507,825	4	5,078.25	507,825	7.81	Alto
45	2,225.50	222,550	5	5,372	537,200	8.27	Muy Alto
54	2,041.50	204,150	5				Muy Alto
72	454.25	45,425	5				Muy Alto
90	386.25	38,625	5				Muy Alto
108	261.25	26,125	5				Muy Alto
144	0.25	25	5				Muy Alto
180	3	300	5	Muy Alto			
Total	64,995.25	6'499,525		64,995.25	6'499,525	100	

La imagen obtenida (Mapa 8) fue reclasificada analizando los histogramas de distribución de frecuencias de valores (número de pixeles de igual valor, Figura 11.01), de tal manera que los pixeles con valores iguales o cercanos y de

frecuencias similares se reagruparan en una misma categoría (Fig. 11.02). Así, los potenciales, o categorías, se expresaron en una escala de 6 valores, desde nula potencialidad (valor 0), hasta muy alta (valor 5). Esta escala de valores se representó en el modelo final (Mapa 9) mediante código de colores.

Figura 11.01 Histograma del potencial bruto de movimientos de masa

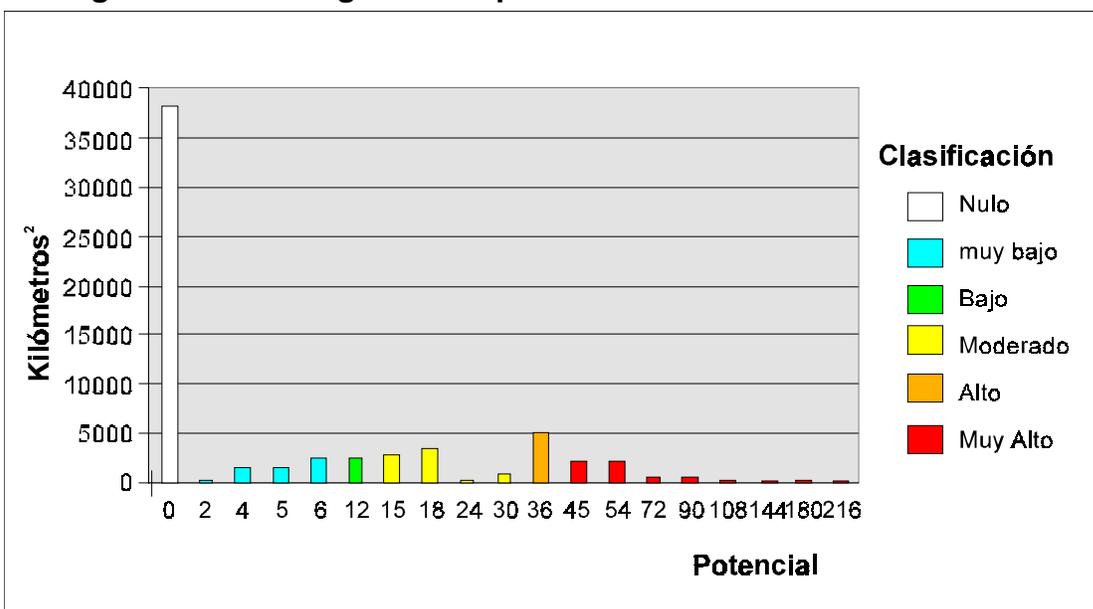
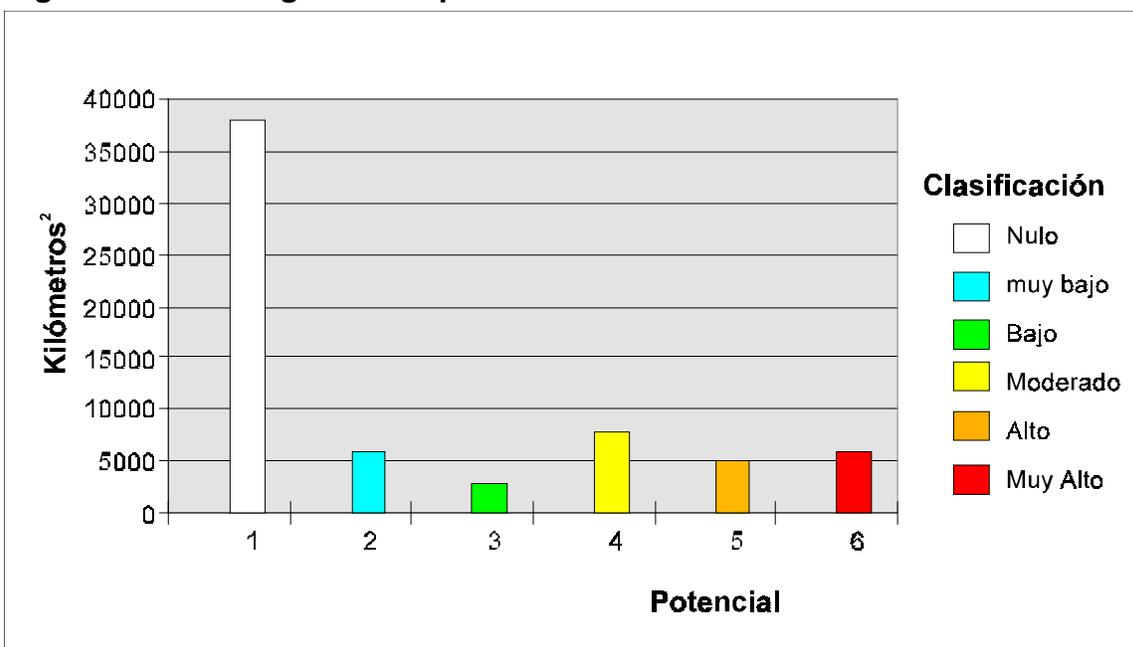


Figura 11.02 Histograma del potencial reclasificado de movimientos de masa



11.5 Validación y utilización del modelo.

Con base en la disponibilidad de información temática adicional y/o de mayor resolución espacial, las Corporaciones Regionales podrán dotarse de modelos más detallados y complejos, es decir, que incorporen variables específicas

adicionales actualmente no disponibles. Entendiendo con lo anterior que el modelo es perfectible, su capacidad de pronóstico de áreas sujetas a movimientos de masa debe ser validado con base en datos históricos, estudios de caso y comparación con futuros eventos. La información disponible permite, por ahora, verificar *grosso modo* los siguientes casos:

en términos generales, las zonas de deslizamientos disparados por sismos como los de 1970 en Bahía Solano, de 1976 en la frontera con Panamá y de 1992 en el Atrato Medio, son expresadas como zonas de Alto a Muy Alto Potencial de movimientos de masa.

Posterior a la entrega del Modelo (Informe de Avance al PNUD, enero de 1997), ocurrieron en la región dos nuevos procesos:

en la cuenca del río San Jorge (límites Antioquia y Córdoba), en la cual ocurrieron enormes movimientos de masa a principios de este año, con severos efectos sobre la ecología y la ictiofauna, expresada en el modelo como de Muy Alto Potencial;

en las porciones medias y altas de las cuencas de los ríos Mambaradó, Tumutungudó y Andágueda (21 a 22 de junio de 1997) en los cuales ocurrieron movimientos de masa y palizadas, (probablemente disparados por fuertes y prolongadas lluvias), que corresponden a zonas en las cuales el modelo “predice” un Muy Alto Potencial de movimientos de masa (Geól. Emilio Moreno, Codechocó, informe sobre los deslizamientos en los municipios de Lloró y Bagadó).

Ahora bien, aún teniendo en cuenta que el Modelo de Potencial de Movimientos de Masa (Mapa 9) es perfectible en función de disponer de información de mayor resolución espacial, las Corporaciones pueden utilizarlo como un instrumento de la planificación regional, mediante iniciativas como las de difundir esta información

entre otros usuarios, su validación con base en registros de ocurrencias de movimientos de masa y, sobre todo, la incorporación de la información del modelo en planes y normas de aptitudes y restricciones a los usos del suelo y en el diseño de Planes para la Prevención y Atención de Desastres del Chocó.

A escala de cuencas la información también es de utilidad incluyendo usuarios como los Comités por Cuenca para la Prevención y Atención de Desastres en el Atrato Medio.

Los mapas de este capítulo se encuentran en el Anexo 9, nos. 1 al 9.

Figura 11.1 Cuenca del río Murindó, huellas de palizadas (Imágenes de radar SIR-C trasbordador espacial, 1994)

Figura 11.2 Ríos Jejedá y Torquidadó, huellas de palizadas y remanentes de deslizamientos (Imágenes de radar SIR-C trasbordador espacial, 1994)