

11 Zonificación de Amenaza y Riesgo

11.1 INTRODUCCION

La ocurrencia de deslizamientos es un fenómeno sujeto a muchos grados de incertidumbre debido a que los deslizamientos incluyen diferentes tipos de movimientos, velocidades, modos de falla, materiales, restricciones geológicas, etc. Morgenstem (1997), expresó que el papel de factor de seguridad es complejo debido a que no tiene en cuenta la incertidumbre de la ignorancia con respecto a la confiabilidad de los datos para el análisis, a incertidumbres en los modelos matemáticos y a incertidumbres humanas.

Cuando existe incertidumbre de la posibilidad o no de la ocurrencia de un fenómeno, generalmente, se toman decisiones equivocadas de diseño. El costo de un proyecto puede resultar muy alto o se tienen que asumir riesgos de características y magnitudes no determinadas.

La zonificación de amenazas y riesgos es una herramienta muy útil para la toma de decisiones, especialmente en las primeras etapas de planeación de un proyecto.

La zonificación consiste en la división del terreno en áreas homogéneas y la calificación de cada una de estas áreas, de acuerdo al grado real o potencial de amenaza o de riesgo.

El mapeo puede realizarse sobre un área donde se tiene información de la ocurrencia de deslizamientos o se tiene un inventario de estos eventos, o sobre áreas en las cuales no se tiene conocimiento de deslizamientos en el pasado, pero se requiere predecir la posibilidad de amenazas hacia el futuro. En el primer caso se trabaja con una metodología de mapeo directo con base en la experiencia y en el segundo una de mapeo indirecto con base en los factores que contribuyen a su ocurrencia.

Se debe diferenciar entre técnicas de análisis relativo y técnicas de análisis absoluto. El análisis relativo presenta la posibilidad diferencial de ocurrencia de deslizamientos sin dar valores exactos y en el análisis absoluto se presentan factores de seguridad o probabilidad real de ocurrencia de movimientos.

Carrara diferenció las técnicas de zonificación en tres formatos así:

1. Modelos de caja blanca (White box model), los cuales se basan en modelos físicos de estabilidad de taludes y modelos hidrológicos. A estos se le conocen como modelos determinísticos.

2. Modelos de Caja negra (Black box model), los cuales se basan en análisis estadístico solamente.
3. Modelos de caja gris (Gray box model), basados parcialmente en modelos físicos y parcialmente en estadística.

La zonificación puede efectuarse en diferentes escalas, de acuerdo a la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (1976).

1. Escala nacional (más de 1: 1.000.000). A esta escala se pueden tomar decisiones de política general pero no permite definir metodologías de prevención o manejo.
2. Escala regional (1:100.000 a 1:500.000).
3. Escala de cuenca (1:25.000 a 1:50.000). Esta escala da información de la amenaza o riesgo y permite realizar evaluaciones de costos.
4. Escala grande (1:5.000 a 1:15.000). Esta escala permite la toma de decisiones sobre prevención y manejo. Generalmente, la escala 1:5.000 es la mejor para establecer planes de manejo de los riesgos (Leroi, 1996).

Dependiendo de la escala se pueden obtener mapas de utilidad diversa, por ejemplo para planeación general se pueden utilizar mapas a escala regional, trabajando áreas de hasta 1.000 kilómetros cuadrados pero para zonificación urbana se requiere trabajar en escalas grandes que permitan trazar líneas muy claras de delimitación de las áreas de riesgo.

11.2 DEFINICION DE TERMINOS

El IUGS (1997) definió una serie de términos para la utilización en el análisis cuantitativo de amenaza y riesgo para taludes y deslizamientos los cuales se indican a continuación:

Riesgo

Es una medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, la salud, la propiedad o el ambiente. Se mide en vidas humanas y propiedades en riesgo.

El riesgo generalmente se le estima como el producto de probabilidad X consecuencias.

Peligro

El deslizamiento geoméricamente y mecánicamente caracterizado se le define como peligro.

Amenaza

Una condición con el potencial de causar una consecuencia indeseable. Una descripción de amenaza a deslizamientos debe incluir las características de los deslizamientos, incluyendo el volumen o áreas de los movimientos y su probabilidad de ocurrencia. También es importante describir las velocidades y las velocidades diferenciales de los deslizamientos.

Alternativamente la amenaza es la probabilidad de que ocurra un deslizamiento particular en un determinado tiempo.

Elementos en riesgo

Se incluyen la población, edificios, obras de infraestructura, actividades económicas, servicios públicos en el área potencialmente afectada por los deslizamientos.

Probabilidad

La posibilidad de un resultado específico medido como la relación de los resultados específicos sobre el número total posible de resultados. La probabilidad se expresa como un número entre 0 y 1 indicando con 0 la imposibilidad de ocurrencia y con 1 la certeza.

Vulnerabilidad

El grado de probabilidad de pérdida de un determinado elemento o grupo de elementos dentro del área afectada por el deslizamiento. Se expresa en una escala de 0 (no pérdida) a 1 (pérdida total).

Análisis de Riesgo

El uso de la información disponible para estimar el riesgo a individuos o población, propiedades o el ambiente debido a las amenazas. El análisis de riesgo generalmente, comprende tres pasos: definición del alcance, identificación de la amenaza y la estimación de riesgo.

Valoración del Riesgo

El proceso del análisis de riesgo y evaluación de riesgo.

Estimación del Riesgo

El proceso utilizado para producir una medida del nivel de riesgos de salud, propiedad o ambiente que son analizados. La estimación del riesgo incluye las siguientes etapas: análisis de frecuencia, análisis de consecuencia y su integración.

Evaluación del Riesgo

La etapa a la cual los juicios y valores entran en el proceso de decisiones, explícita o implícitamente, incluyendo consideraciones de la importancia de los riesgos estimados y las consecuencias sociales, ambientales y económicas asociadas, con el propósito de identificar un rango de alternativas para el manejo de los riesgos.

Manejo de Riesgo

El proceso completo de evaluación del riesgo y control de riesgo.

Riesgo aceptable

Un riesgo para el cual, para los propósitos de vida o trabajo nosotros estamos preparados a aceptar tal como es, sin preocupación de su manejo. La sociedad no considera justificable realizar gastos para reducir esos riesgos.

Riesgo tolerable

Un riesgo que la sociedad tiene la voluntad de vivir con él, con la confianza de que está apropiadamente controlado hasta donde es posible.

Riesgo Individual

El riesgo de la fatalidad o lesión de un individuo identificable con nombre propio, quien vive dentro de la zona expuesta al deslizamiento y quien tiene un sistema de vida particular que lo puede exponer al deslizamiento o sus consecuencias.

Riesgo social

El riesgo de lesiones múltiples o muertes a una sociedad como un todo.

11.3 SUSCEPTIBILIDAD

La susceptibilidad generalmente, expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno. La probabilidad de ocurrencia de un factor detonante como una lluvia o un sismo no se considera en un análisis de susceptibilidad.

La susceptibilidad se puede evaluar de dos formas diferentes:

1. Sistema de la experiencia

Se utiliza la observación directa de la mayor cantidad de deslizamientos ocurridos en el área estudiada y se evalúa la relación entre los deslizamientos y la geomorfología del terreno.

2. Sistema teórico

Se mapea el mayor número de factores que se considera que puedan afectar la ocurrencia de deslizamientos y luego se analiza la posible contribución de cada uno de los factores.

Preparación de mapas de susceptibilidad a los deslizamientos

El mapa de susceptibilidad es un mapa en el cual se zonifica las unidades de terreno que muestran una actividad de deslizamientos similar o de igual potencial de inestabilidad, la cual es obtenida de un análisis multivariable entre los factores que pueden producir deslizamientos y el mapa de inventario de deslizamientos.

No existe un procedimiento estandarizado para la preparación de mapas de susceptibilidad a los deslizamientos y existe mucha libertad en la determinación de los pasos a seguir.

En áreas de montañas de alta pendiente y valles semiplanos se pueden identificar las áreas de acuerdo a su topografía. Si se posee un mapa geológico, a cada formación se le puede asignar un grado de susceptibilidad, y se puede combinar formación geológica y topografía para identificar áreas diferentes dentro de la misma formación. Combinando

mapas de pendientes y de geología dentro de un sistema de información geográfica se pueden lograr resultados interesantes.

Se recomienda localizar con mucha precisión las áreas cubiertas por coluviones, las cuales son generalmente de susceptibilidad alta, al igual que las áreas con procesos intensos de erosión y las áreas de influencia de las grandes fallas geológicas. Se deben tener en cuenta otros factores tales como uso de la tierra y drenaje.

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad se tienen en cuenta generalmente tres elementos:

- 1) Inventario de deslizamientos ocurridos en el pasado.
- 2) Topografía y mapa de pendientes
- 3) Características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del terreno.

Tabla 11.1 Criterios para determinar el grado de susceptibilidad a los deslizamientos (Kanungo - 1993)

Grado de susceptibilidad	Criterio
Muy alta	Laderas con zonas de falla, masas de suelo altamente meteorizadas y saturadas, y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe alta posibilidad de que ocurran
Alta	Laderas que tienen zonas de falla, meteorización alta a moderada y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran.
Moderada	Laderas con algunas zonas de falla, erosión intensa o materiales parcialmente saturados donde no han ocurrido deslizamientos pero no existe completa seguridad de que no ocurran.
Baja	Laderas que tienen algunas fisuras, materiales parcialmente erosionados no saturados con discontinuidades favorables, donde no existen indicios que permitan predecir deslizamientos.
Muy baja	Laderas no meteorizadas con discontinuidades favorables que no presentan ningún síntoma de que puedan ocurrir deslizamientos.

La información de los mapas de susceptibilidad a los deslizamientos se puede utilizar más eficientemente si en los mapas se incluyen las técnicas que se pueden utilizar para la reducción de la susceptibilidad.

Tabla 11.2 Valoración de factores para evaluación de susceptibilidad a deslizamiento debida a lluvia (Asian Technical committee on geotechnology for natural Hazards in ISSMFE, 1997)

Factor	Característica	Peso
Altura del talud	≥10 m.	7
	<10 m.	3
Inclinación del talud	≥45°	1
	<45°	0
Salientes topográficas (overhangs)	Presentes	3
	Ausentes	0
Espesor de suelo superficial	≥0.5 m.	1
	<0.5 m.	0
Nacimientos de agua	Presentes	1
	Ausentes	0
Fallas alrededor del área	Presentes	3
	Ausentes	0

Inventarios de deslizamientos

Después de un cuidadoso análisis de las fotografías aéreas y correlaciones de campo, se digitalizan sobre los mapas topográficos las áreas de deslizamientos activos o inactivos que se detectaron en el área estudiada. En algunos países se tienen mapas muy completos de inventario de los deslizamientos existentes generalmente, utilizando sistemas de información geográfica.

Para la preparación de un mapa de inventario de deslizamientos se recomiendan los pasos siguientes (Brabb-1993):

- Determinación de los recursos humanos disponibles.
- Entrenamiento del personal especialmente en el reconocimiento de los fenómenos.
- Preparación de las convenciones a utilizar y sistema de clasificación.
- Investigación de las fotografías aéreas disponibles del área a analizar.
- Preparación los mapas-base en los cuales se van a dibujar los deslizamientos.
- Interpretación de las fotografías aéreas y transferencia de la información a los planos.
- Chequeos de campo de áreas representativas para asegurarse de la precisión de la información.

El producto final presenta la distribución espacial de los deslizamientos en forma de áreas afectadas o símbolos. La distribución de deslizamientos puede presentarse en forma de mapa de densidades o zonas de igual cantidad de deslizamientos.

Mapa de pendientes

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad es importante dibujar previamente un mapa de pendientes adicionalmente, a los mapas geológicos y de uso del suelo. El objetivo es generar una planta topográfica del área a estudiar delimitando las áreas de pendiente diferente en sectores o fajas de valores previamente establecidos.

Tabla 11.3 Clasificación utilizada para elaborar el mapa de pendientes.

Clasificación	Pendiente (ángulo de inclinación)
Muy baja	0 a 5 % (0 a 8.5 grados)
Baja	15 a 30 % (8.5 a 16.7 grados)
Mediana	30 a 50 % (16.7 a 26.6 grados)
Alta	50 a 100% (26,6 a 45 grados)
Muy alta	Más del 100% (más de 45 grados)

Características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas

Se recomienda realizar un plano geológico - geotécnico en el cual se indiquen los suelos o materiales más susceptibles a sufrir procesos de deslizamiento. El objetivo principal es definir cuales áreas tienen un comportamiento crítico si estas se encuentran localizadas en zonas de influencia de corrientes de agua reales o eventuales provenientes de los sistemas de drenaje natural y artificial.

Algunos municipios disponen de planos geológicos o geotécnicos de las áreas urbanas y clasificación de sus diversos tipos de suelos con sus principales.

La metodología recomendada es la de asignar calificaciones o valores a cada parámetro geológico o geotécnico, de acuerdo a su grado de influencia sobre la susceptibilidad y las condiciones reales del material.

Tabla 11.4 Valores relativos para la ocurrencia de deslizamientos

Factor	Calificación	Ejemplo
Formación geológica	0 a 5 dependiendo de la calidad de la formación	Un coluvión matriz soportado calificación = 5 Una arcillolita susceptible calificación = 4 Un granito calificación = 3 Una arenisca competente calificación = 0
Estructura	0 a 3 dependiendo en el rumbo buzamiento y resistencia al cortante de las discontinuidades	Estructura favorable a los deslizamientos Calificación = 3 Estructura algo favorable calificación = 2 Estructura No favorable calificación = 0
Grado de meteorización	0 a 3	Muy meteorizado calificación = 3 Roca sana calificación = 0
Fracturación	0 a 3	Muy fracturada calificación = 3 Sin fracturas importantes calificación = 0
Nivel freático	0 a 5	Superficial calificación = 5 No hay nivel freático calificación = 0
Susceptibilidad Geologico-geotecnica	Suma de todas las calificaciones.	

Tabla 11.5 Pesos para evaluar la susceptibilidad de rocas a los deslizamientos (Nicholson,1997)

Factor	Característica	Peso
Espaciamiento de las discontinuidades	>2 m	2
	600 mm - 2 m	8
	200 - 600 mm	16
	60 - 200 mm	28
	<60 mm	35
Abertura de las discontinuidades mm	Cerrada – 0.1 mm	1
	0.1 - 0.5 mm	3
	0.5 - 1.0 mm	7
	1.0 - 5.0 mm	13
	>5.0 mm	15
Resistencia de la roca intacta MPa	>200	2
	100-200	5
	50-100	10
	12.5-50	18
	5-12.5	27
	<5	35
Meteorización	Roca sana	1
	Roca algo meteorizada	5
	Roca moderadamente meteorizada	10
	Roca altamente meteorizada	14
	Roca completamente meteorizada	15
Valor total de susceptibilidad		
Clase	Valor	Descripción de la susceptibilidad
1	0-20	Muy baja
2	20-40	Baja
3	40-60	Moderada
4	60-80	Alta
5	>80	Muy alta

Para la calificación de los diversos parámetros se requiere la intervención de geólogos y Geotecnistas con amplios conocimientos sobre el comportamiento de los materiales del área en estudio.

Ambalagan (1992), propuso un sistema de calificación con los pesos indicados en la Tabla 11.6.

Tabla 11.6 Peso de los diferentes factores de acuerdo a Ambalagan (1992)

Factor	Peso en el Análisis
Litología	2
Estructura y discontinuidades	2
Morfometría del talud	2
Relieve relativo	1
Uso de la Tierra y cobertura vegetal	2
Condiciones de aguas subterráneas	1
Total	10

Se divide el terreno de una serie de subáreas que tienen características similares en cada uno de los aspectos indicados. En la Litología debe tenerse en cuenta la erodabilidad de los materiales y los procesos de meteorización. Las rocas duras no meteorizadas poseen una susceptibilidad baja, mientras las rocas fisuradas o foliadas presentan una susceptibilidad alta. La estructura incluye las discontinuidades primarias y secundarias así como las superficies de estratificación.

La disposición de la estructura con relación al talud debe tenerse en cuenta de acuerdo a los siguientes parámetros:

- a. El rumbo de las discontinuidades en comparación con el rumbo de la superficie del talud.
- b. El buzamiento tanto de las discontinuidades como de las líneas de intercepción de varias discontinuidades.
- c. La localización de las discontinuidades con referencia al pie del talud.

La morfometría define las categorías de talud con base en la frecuencia de ocurrencia de determinados ángulos particulares en el talud, junto al mapa de morfometría puede prepararse reuniendo las áreas en las cuales las líneas de nivel tienen un espaciamiento estándar y pueden dividirse en pendientes inclinadas, moderadas o suaves.

El relieve relativo representa la máxima altura entre la divisoria de aguas arriba de los taludes y el valle abajo del mismo.

11.4 AMENAZA

Amenaza natural es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructor, en un área específica dentro de un determinado período de tiempo. (Varnes – 1984).

La amenaza a los deslizamientos generalmente, se muestra en planos que indican la distribución espacial de los diversos tipos de amenaza.

La zonificación de amenazas requiere tener en cuenta varios elementos:

1. Un inventario detallado de los deslizamientos y procesos de inestabilidad que han ocurrido en el pasado.
2. Un conocimiento detallado de los procesos y de los factores que los producen.
3. El análisis de la susceptibilidad a la ocurrencia de esos fenómenos, relacionada con las condiciones ambientales existentes.

Tabla 11.7 Pesos de los diferentes factores a tener en cuenta en la evaluación de amenazas a deslizamientos (Ambalagan (1992))

FACTORES GEOLOGICOS				
Factor	Descripción	Categoría	Peso	Observaciones
Litología	Tipo de material	Tipo I		Muy meteorizada
		Cuarcita y Caliza	0.2	multiplicar por 4.
		Granito y Gaugo	0.3	Algo meteorizada
		Neiss	0.4	multiplicar por 3.
				Poco meteorizada
				multiplicar por 2.
		Tipo II		Muy meteorizada
		Areniscas	1.0	multiplicar por 1.5
		Areniscas con algo de lutitas	1.3	Algo meteorizada
				multiplicar por 1.25.
		Poco meteorizada		
		multiplicar por 1.1		
Litología	Tipo III	Pizarra y Filita	1.2	
		Esquisto	1.3	
		Lutitas no arcillosas	1.8	
		Lutitas, esquistos o filitas muy meteorizadas.	2.0	
		Materiales aluviales antiguos muy bien consolidados	0.8	
		Suelos arcillosos	1.0	
		Suelos arenosos, blandos	1.4	
		Coluviones antiguos	1.2	
		Coluviones jóvenes	2.0	
		Estructura	Relación de paralelismo entre el talud y las discontinuidades	Más de 30°
21° a 30°	0.25			
11° a 20°	0.30			
6° a 10°	0.40			
Menos de 5°	0.50			
Relación entre el buzamiento de las discontinuidades y la inclinación del talud	Más de 10°		0.3	Si el del buzamiento es mayor que el del talud el ángulo es positivo y si es menor que el del talud el ángulo es negativo.
	0° a 10°		0.5	
	0°		0.7	
	0° a -10°		0.8	
	Más de -10°		1.0	
Buzamiento de la discontinuidad	Menos de 15°		0.20	
	16° a 25°		0.25	
	26° a 35°		0.30	
	36° a 45°		0.40	
	Más de 45°		0.50	
Espesor de la capa de suelo	Menos de 5 metros	0.65		
	6 a 10 metros	0.85		
	11 a 15 metros	1.30		
	16 a 20 metros	2.00		
	Más de 20 metros	1.20		

FACTORES TOPOGRAFICOS Y AMBIENTALES			
Factor	Categoría	Peso	
Morfometría Pendiente de los taludes	Más de 45°	2.0	
	36° a 45°	1.7	
	26° a 35°	1.2	
	16° a 25°	0.8	
	Menos de 15°	0.5	
Relieve relativo Diferencia de altura entre la divisoria de aguas y el valle	Menos de 100 metros	0.3	
	101 a 300 metros	0.6	
	Más de 300 metros	1.0	
Uso de la Tierra	Area Urbana	2.00	
	Cultivos anuales	2.00	
	Vegetación intensa	0.80	
	Vegetación moderada	1.20	
	Vegetación escasa	1.50	
	Terrenos áridos	2.00	
Aguas subterráneas	Inundable	1.0	
	Pantanosos	0.8	
	Muy húmedo	0.5	
	Húmedo	0.2	
	Seco	0.0	
SUMATORIA O AMENAZA TOTAL			
Amenaza total	Descripción	Suma de los pesos	
I	Amenaza muy baja	3.5	
II	Amenaza baja	3.5 a 5	
III	Amenaza moderada	5.1 a 6.0	
IV	Amenaza alta	6.1 a 7.5	
V	Amenaza muy alta	7.5	

4. El estudio de las probabilidades reales de que se presenten, las condiciones para la ocurrencia de los fenómenos. (por ejemplo, de que ocurra una lluvia o un sismo de tal magnitud que pueda activar los posibles deslizamientos de tierra).

La zonificación es el resultado de la aplicación de un modelo en el que se involucren todos los factores que intervienen en el fenómeno.

Análisis de probabilidad de Deslizamientos

La probabilidad de la ocurrencia de deslizamientos puede expresarse en los siguientes términos:

- El número de deslizamientos de ciertas características que puede ocurrir en un área por año.
- La probabilidad de que una ladera o talud particular presente deslizamientos en un determinado tiempo.
- Las fuerzas actuantes que exceden las fuerzas resistentes en términos de probabilidad sin tener en cuenta su frecuencia anual. (factor de seguridad)

Métodos de cálculo de probabilidad de ocurrencia

Existen varias formas de calcular la probabilidad de ocurrencia:

- Datos históricos en el área de estudio o en áreas de características similares.
- Métodos empíricos basados en correlaciones de acuerdo con sistemas de clasificación en estabilidad de taludes.

- c. Uso de evidencia geomorfológica junto con datos históricos o basada en criterio de los profesionales.
- d. Relación con la frecuencia e intensidad de los eventos detonantes, por ejemplo lluvias o sismos.
- e. Valoración directa basada en el criterio de un experto.
- f. Modelación de variables primarias como por ejemplo presiones fisiométricas contra eventos detonantes, junto con conocimiento de las características físicas.
- g. Aplicación de métodos formales probabilísticos, tomando en cuenta la incertidumbre en geometría, resistencia al cortante, mecanismos de deslizamiento y presiones piezométricas.

Es importante unir la información subjetiva con la información medida, lo cual puede hacerse formalmente o informalmente. Debe anotarse que existen una serie de datos importantes, los cuales no están disponibles para el análisis y cualquier valoración puede resultar incorrecta si no se tienen en cuenta.

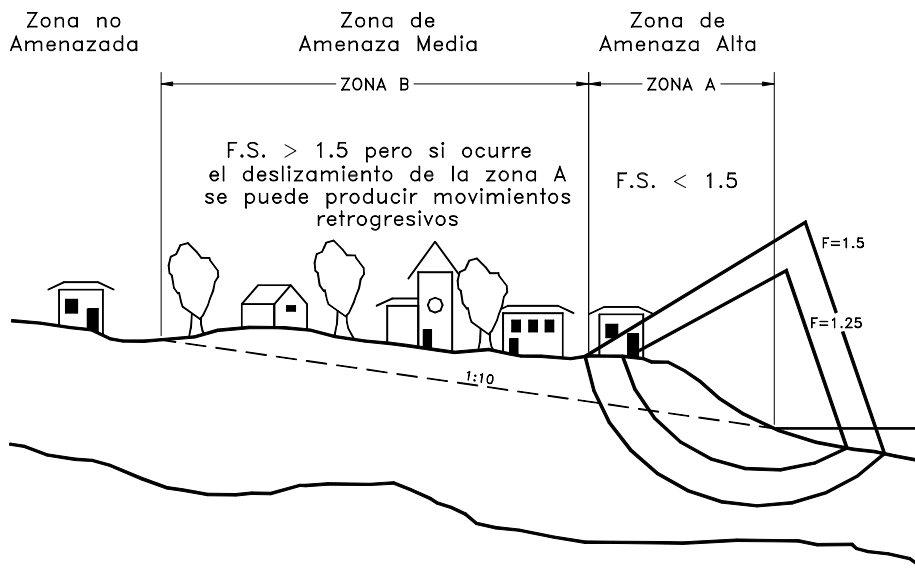


Figura 11.1 Zonificación de un área amenazada por deslizamientos

Evaluación por un Experto

La evaluación por expertos es tal vez, el método del mapeo más utilizado. Este se basa en la experiencia de un experto quien define las reglas y criterios de estabilidad y evolución de los movimientos. Estos criterios se basan en la experiencia adquirida en situaciones supuestamente similares.

Las ventajas de la evaluación por parte de un experto son el análisis multicriterio que está implícito en la mente del profesional experimentado, que puede ser analizado en diferentes escalas con un manejo constante de información anterior basada en la descripción detallada de la situación de campo.

Las desventajas de la evaluación por expertos están en la subjetividad de los criterios. Cada experto puede llegar a conclusiones diferentes de acuerdo a su propia experiencia. El experto no es dado a analizar alternativas y es muy difícil y prácticamente imposible que el experto pueda explicar su criterio y sus reglas para permitir un análisis crítico de los resultados obtenidos. (Leroi, 1996).

Mapas de Amenaza

Un mapa de amenaza a deslizamientos debe presentar información de:

- 1) Probabilidad de ocurrencia.
- 2) Tipo de deslizamientos. Cada tipo de deslizamiento puede tener un impacto diferente sobre el ambiente y producir un riesgo diferente.
- 3) Magnitud de los movimientos
- 4) Velocidad y características.
- 5) Distancia de recorrido
- 6) Límite de progresión o retroprogresión

Los mapas de amenaza se pueden digitalizar con base en los mapas de inventario, vulnerabilidad y el análisis de los diversos factores que podrían generar deslizamientos en un proyecto específico.

La elaboración de mapas de amenaza de deslizamientos es una herramienta muy importante para la planeación de obras de infraestructura tales como presas, canales, oleoductos, carreteras, líneas eléctricas, etc., por cuanto le provee a los profesionales no especializados la información sobre los diferentes tipos de deslizamiento, la severidad de las amenazas y el riesgo que pueden correr las obras que se plantea construir.

Para la elaboración de mapas de amenaza se deben analizar los siguientes parámetros:

1. Susceptibilidad a los deslizamientos

Como se expresó anteriormente esta susceptibilidad depende de las condiciones topográficas y geológicas de cada área específica y del conocimiento de deslizamientos ocurridos en el pasado.

2. Hidrología

Se deben analizar las lluvias; tipo, características y longitud de los sistemas de drenaje; tamaño y características del área de aferencia de agua; temperatura; evapotranspiración y mapas de niveles freáticos.

3. Uso de la tierra y vegetación

El objetivo del mapa de vegetación o de cobertura vegetal es definir las áreas cubiertas por bosques primarios o secundarios, pastos, rastrojo, cultivos, etc. Es importante definir no solamente el tipo de vegetación sino su densidad y características específicas. Adicionalmente, deben incluirse las áreas expuestas o desprovistas de vegetación.

4. Factores Antrópicos o urbanos

Localización y características de las carreteras, canales, tubería, oleoductos y demás elementos producto de la acción humana.

Se deben zonificar las áreas de zonas duras o pavimentadas, las áreas de zonas verdes, la localización de sumideros y demás elementos de drenaje y los sitios de descarga de los diversos colectores de aguas.

Uno de los objetivos es determinar los sitios donde existe o pueda existir concentración de corrientes de agua que pudieren producir focos de erosión o acelerar los procesos en los focos existentes.

Deben delimitarse los sitios de botaderos de basuras, cortes de carreteras, áreas en proceso de deforestación y demás acciones de tipo antrópico que afectan los procesos de erosión o deslizamientos.

5. Tectónica y sismicidad

Se debe identificar la cercanía a fallas geológicas, volcanes y otras fuentes de energía sísmica y realizar un análisis de la sismicidad histórica para definir la intensidad de los fenómenos sísmicos que puedan activar deslizamientos. Existen algunos métodos para determinar el valor de las fuerzas y las aceleraciones sísmicas que permiten definir los valores diferentes de amenaza.

Generalmente, se trabaja con un valor de sismo-aceleración, el cual se integra a los cálculos de estabilidad. La tecnología actual permite obtener con algún grado de precisión las aceleraciones con sus respectivas amplificaciones debidas a factores geotécnicos o topográficos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el desplazamiento máximo esperado es un factor muy importante para el análisis del factor sismo. (Leroi, 1996).

6. Procesos actuales

En este mapa se deben localizar las áreas afectadas por surcos, erosión laminar, cárcavas de erosión, deslizamientos, etc., además de las corrientes de agua que estén sufriendo profundización o ampliación de su cauce.

La calidad y cantidad de la información que se obtenga va a determinar el tipo y confiabilidad del mapa de amenazas.

La información recogida se mapea en diferentes capas por áreas de conocimiento. El número de capas varía de acuerdo a la información que se puede obtener y a las características ambientales del área en estudio.

Cuando se utilizan técnicas de sistemas de información geográfica es importante que cada capa de información esté compuesta por un mismo tipo de elementos (Puntos, líneas o áreas y polígonos).

A cada mapa o capa se le asignan una escala de valores o calificaciones y de acuerdo a un modelo que integre todas las variables se obtiene el mapa de amenazas.

El análisis de la información para obtener el mapa de amenaza se puede realizar de varias formas:

1. Análisis Estadístico

Se combinan el mapa de distribución de deslizamientos con los diversos parámetros dentro de una grilla o matriz, la cual se analiza mediante análisis de regresión múltiple o discriminante.

2. Análisis Determinístico

Se elaboran modelos de análisis de estabilidad de taludes con base en la información obtenida y se calculan los factores de seguridad al deslizamiento. Estos modelos requieren de información específica sobre estratificación, estructura, propiedades de resistencia de los materiales y modelos de simulación de niveles freáticos.

Elaboración de mapas de amenaza a lo largo de un proyecto vial

Para la elaboración de un plano de amenaza a lo largo de un proyecto vial se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Preparar el plano vial y localizarlo en el campo.
- Obtener las secciones topográficas transversales típicas.
- Sobre las secciones transversales, dibujar las secciones de corte y terraplén.
- Realizar una inspección de campo y mapear, indicando el abscisado de las diversas formaciones geológicas que aparecen a lo largo del alineamiento señalando además, las características de cada formación, profundidad del perfil meteorizado, nivel freático, espesor de coluviones y propiedades de la matriz.
- Con la información vial, topográfica y geotécnica en forma semicuantitativa, determinar el grado de inestabilidad o calcular los factores de seguridad para los diversos perfiles de vía.
- Indicar en el plano de planta vial con sus convenciones los diversos sectores con grado de inestabilidad diferente.

Una vez realizado el plano de amenaza a deslizamientos se puede determinar las obras que se requieren para garantizar la estabilidad de la vía para cada sector.

Método de Mora y Vahrson

Mora y Vahrson (1993) realizaron estudios de casos de fallas de taludes en Centroamérica y propusieron un método de predicción de amenaza, en este método se incluyeron tres factores relacionados con la susceptibilidad que son: Relieve relativo, condiciones litológicas y humedad. Adicionalmente, se consideraron dos factores relacionados al evento detonante que son: la sismicidad y la intensidad de las lluvias. Combinando estos factores se encontró un grado de amenaza a deslizamiento de los taludes:

$$H_1 = (S_r \times S_l \times S_h) \times (T_s + T_p)$$

Donde:

H_1 = índice de amenaza a deslizamiento

S_r = índice de relieve relativo

S_l = susceptibilidad litológica

S_h = influencia de la humedad natural del suelo

T_s = influencia de la sismicidad

T_p = influencia de la intensidad de la precipitación

11.5 VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad es el grado de pérdida de un determinado elemento o grupo de elementos en riesgo, como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud determinada. (Varnes 1984).

El análisis de vulnerabilidad requiere de un conocimiento detallado de la densidad de población, infraestructura, actividades económicas y los efectos de un determinado fenómeno sobre estos elementos en riesgo. Este tipo de trabajos es generalmente, realizado por profesionales de disciplinas diferentes a las ciencias de la tierra.

La vulnerabilidad es afectada por la naturaleza del sitio, si está arriba o abajo el deslizamiento, y la naturaleza del elemento en riesgo. La velocidad del movimiento

también afecta la vulnerabilidad, a mayores velocidades generalmente, las vulnerabilidades son mayores. Esto puede conducir a diferentes grados de daño en el camino o trayectoria de un deslizamiento. Para estructuras y personas, a mayor profundidad del deslizamiento, generalmente el daño es mayor y la vulnerabilidad mayor.

Para estructuras, la valoración del daño y la vulnerabilidad depende de la modelación de la interacción del deslizamiento de la estructura. Este factor se puede documentar fácilmente para caídos de roca cuando las estructuras han sido diseñadas para resistir los impactos, y en menor extensión para flujos de detritos y movimientos lentos.

Para deslizamientos de gran velocidad no existe una guía para evaluar la vulnerabilidad y es necesario utilizar criterios relativamente subjetivos.

Tabla 11.8 Valores de vulnerabilidad recomendados en Hong Kong (Finlay 1997)

VULNERABILIDAD DE UNA PERSONA EN UN AREA ABIERTA			
Caso	Rango de valores históricos	Valor recomendado	Comentarios
1. Es golpeado por un caído de roca	0.1 – 0.7	0.5 ⁽¹⁾	Puede ser herido, pero rara vez causa la muerte.
2. Es sepultado por un flujo de detritos.	0.8 – 1.0	1.0	Muerte por asfixia.
3. No es sepultado	0.1 – 0.5	0.1	Alta probabilidad de supervivencia.
Nota: (1) La proximidad de la persona debe considerarse en más detalle.			
VULNERABILIDAD DE LA PERSONA EN UN VEHICULO			
Caso	Rango de valores históricos	Valor recomendado	Comentarios
1. Si el vehículo es sepultado o destruido	0.9 – 1.0	1.0	La muerte es casi segura.
2. Si el vehículo es dañado solamente.	0.0 – 0.3	0.3	Alta probabilidad de supervivencia
VULNERABILIDAD DE LA PERSONA EN UN EDIFICIO			
Caso	Rango de valores históricos	Valor recomendado	Comentarios
1. Si el edificio colapsa	0.9 – 1.0	1.0	La muerte es casi segura.
2. Si el edificio es inundado con residuos del deslizamiento y la persona sepultada	0.8 – 1.0	1.0	La muerte es muy probable.
3. Si el edificio es inundado con residuos del deslizamiento y la persona no es sepultada	0.0 – 0.5	0.2	Alta probabilidad de supervivencia
4. Si los residuos golpean al edificio solamente	0.0 – 0.1	0.05	Virtualmente no hay peligro. ⁽¹⁾
Nota: (1) Debe tenerse en cuenta la proximidad de la persona a la parte del edificio afectada por el deslizamiento			

La valoración de la vulnerabilidad puede definirse como el nivel potencial de daño o grado de pérdida de un determinado elemento expresado en una escala de 0 a 1:

$$V = V_s \times V_t \times V_l$$

V_s = Probabilidad del impacto espacial del deslizamiento sobre el elemento.

V_t = Probabilidad en el tiempo (donde se encuentre el elemento durante el impacto).

V_l = Probabilidad de pérdida de vida o proporción del valor del elemento.

Para valorar la vulnerabilidad debe tenerse en cuenta el tipo, proximidad y distribución espacial de las facilidades afectadas o población, grado de protección ofrecida a las personas por la naturaleza de la facilidad, escala o volumen probable de la falla, grado de prevención o alarma, velocidad del movimiento y su respuesta, así como la posibilidad de efectos secundarios.

Finlay (1997) presenta un ejemplo de un enfoque directo donde los valores de vulnerabilidad son asignados directamente por referencia a los datos históricos, pero sin consideración de los diversos componentes que afectan la vulnerabilidad. Se asignan valores de 0 a 1 de acuerdo a la experiencia histórica que se tiene en el manejo de una determinada amenaza.

11.6 RIESGO

Riesgo es el número esperado de vidas humanas perdidas, personas heridas, daño a la propiedad, y pérdidas económicas relacionadas con la ocurrencia de un determinado fenómeno (Varnes 1984).

Para la implementación de medidas de prevención y control es conveniente identificar los niveles de riesgo. El análisis de riesgo se fundamenta en la observación y registro de los indicadores tanto naturales como los producidos por acción antrópica, analizados desde el punto de vista de las consecuencias resultantes en el caso de formación o progreso de procesos de deslizamiento. Estas consecuencias deben analizarse no solamente para las áreas urbanizadas sino teniendo en cuenta la posibilidad de ocupación o urbanización de las áreas aledañas.

Para el análisis de riesgo es importante que sean definidos los tipos y procesos, sus parámetros de formación y progreso y la previsión de las consecuencias resultantes. A partir de este procedimiento es posible caracterizar las situaciones de riesgo incluyendo sus dimensiones.

En este sentido se puede concluir que se trata de varias situaciones de riesgo localizado, afectando solamente a algunos sitios específicos del área ocupada o una situación de riesgo generalizado que afecta a toda el área ocupada. Esta caracterización es fundamental para definir la mejor forma de enfrentar un problema de deslizamientos.

Análisis cualitativo del riesgo

Esta es la forma más simple de realizar un estudio de riesgo a deslizamientos, el cual incluye el adquirir el conocimiento de las amenazas, los elementos en riesgo y sus vulnerabilidades, pero expresando los resultados en forma cualitativa. Los diversos

atributos pueden clasificarse o calificarse en tal forma que se expresa el riesgo en una forma prácticamente verbal.

Análisis cuantitativo del Riesgo

El análisis cuantitativo del Riesgo incluye las siguientes actividades:

a. Análisis de las amenazas

Se determina la distribución probable de los deslizamientos en términos del número y características de los taludes y deslizamientos para un proyecto particular. Este puede realizarse como una distribución frecuencia – magnitudes.

b. Elementos en riesgo

El objetivo es determinar la distribución probable del número, la naturaleza y características de los elementos en riesgo (personas y propiedades). Debe tenerse en cuenta la localización de los elementos en riesgo con relación a la amenaza (por ejemplo si se encuentran abajo del deslizamiento); si el elemento en riesgo está en una posición fija (ejemplo una casa) o es móvil (ejemplo personas o automóviles) y la posibilidad de medidas de mitigación como sistemas de alarma, etc.

c. Análisis de vulnerabilidad

El objetivo es medir el grado de daño o probabilidad de pérdida de vidas debida a la interacción del elemento en riesgo cuando el deslizamiento.

d. Análisis de Riesgo

El objetivo es determinar la distribución probable de las consecuencias del deslizamiento. El cálculo primario es una operación matemática basada en la amenaza, los elementos en riesgo y la vulnerabilidad de esos elementos, utilizando álgebra probabilística o métodos de simulación.

Un estudio completo de riesgo debe definir el número de personas amenazadas así como las propiedades. Bergren (1992) propone una tabla para evaluar el valor total del riesgo de acuerdo a la posición de las personas o propiedades, con relación al deslizamiento en la forma indicada en la tabla.

Mitigación del Riesgo

El análisis del riesgo es a menudo interactivo con los efectos de las medidas de mitigación del riesgo que se valoren. Esto puede influenciar la probabilidad o características de los deslizamientos (ejemplo reducir su volumen a velocidad), elementos en riesgo (ejemplo sistemas de alarma) o la vulnerabilidad. La efectividad de las medidas de mitigación del riesgo pueden valorarse en un sentido económico o en una reducción potencial de muertes.

Limitaciones del análisis y valoración del riesgo

En grupo de Deslizamientos del IUGS (1997) indica una serie de limitaciones al análisis y valoración del riesgo para taludes y deslizamientos, los cuales se indican a continuación:

- a. El contenido de criterio o prejuicio en los datos utilizados para el análisis puede resultar en que los valores de los riesgos valorados tengan una incertidumbre inherente.
- b. La variedad de formas en que se puede analizar los problemas puede significar una diferencia muy grande en los resultados si el mismo problema es considerado por diferentes profesionales.

Tabla 11.9 Análisis del Riesgo con relación a las personas (Bergren – 1992)

Población afectada	A Número de Personas	B Factor de Presencia	Población amenazada = Ax B
Residentes			
Personas que viven permanentemente		1	
Personas que vienen los fines de semana (cabañas)		0.3	
Personas que permanecen en hoteles (Número de camas)		0.5	
Pacientes en Hospitales (Número de camas)		1	
Pacientes en Ancianatos (Número de camas)		1	
Visitantes de Día			
Número de Empleados de Oficinas o Fábricas, alumnos y niños en colegios		0.35	
Número promedio de clientes de almacenes y Centros comerciales		0.008	
Otros visitantes ocasionales		0.008	
Personas en Automóviles y autobuses			
Más de 5000 vehículos promedio por día		0.01	
500 a 5000 vehículos por día		0.005	
Menos de 500 vehículos por día		0.001	

Tabla 11.10 Análisis de Riesgo con relación a Propiedades (Bergren – 1992)

Propiedades Afectadas	Número de unidades	Factor de Cálculo	Valor de las propiedades amenazadas en dólares
Casas		Valor unitario	
Casas de área menor a 90 m ²			
Casas de área de 90 a 130 m ²			
Casas de área de 130 a 200 m ²			
Casas de área de más de 200 m ²			
Edificios		Valor por m ²	
Metros cuadrados de Edificios de vivienda			
Metros cuadrados de Escuelas, Oficinas y Almacenes			
Metros cuadrados de Bodegas y Edificios Industriales			
Estructuras Especiales		Valor unitario	
Puentes			
Estaciones Eléctricas			
Instalaciones de Agua, Gas, Tuberías diversas, etc.			
Areas diversas		Valor hectárea	
Jardines			
Calles, parqueaderos y áreas duras			
Bosques			
Areas agrícolas			

- c. La revisión de una valoración puede traer un cambio significativo en los resultados debido a que existe cada día mayor información.
- d. La inhabilidad para reconocer una amenaza conduce a una subestimación del riesgo.
- e. Los resultados de una valoración rara vez son verificables.
- f. Las metodologías generalmente, no son ampliamente aceptadas y muchas veces existe aversión a su utilización.
- g. Es muy posible que el costo de la valoración puede superar el beneficio de la técnica en la elaboración de la decisión, especialmente cuando se requiere información muy compleja de obtener.
- h. Los criterios de riesgo aceptable y tolerable para taludes y deslizamientos no están bien establecidos.
- i. Es difícil valorar con precisión el riesgo para eventos de baja probabilidad.

Situación legal frente al riesgo

Los municipios y las entidades territoriales según el caso tienen el deber legal de prevenir los riesgos especialmente contra eventos previsibles, a veces producto de la ineficiencia de los servicios públicos a su cargo. Con base en los resultados de los análisis de riesgo los municipios, corporaciones, empresas de servicios públicos, etc., deben tomar las medidas administrativas o judiciales con el objeto de minimizar o eliminar el riesgo a la pérdida de vidas humanas o bienes materiales.

En una situación de riesgo inminente debido a lluvias intensas por ejemplo, se puede obligar a un morador a salir de su casa de habitación incluso con el uso de la policía, si es necesario y el Municipio debe velar por la seguridad de los bienes abandonados en virtud de esta relocalización para prevenir saqueos, por ejemplo. Superada la situación de riesgo el Municipio debe autorizar el regreso de los moradores y exigir la realización de las obras de seguridad, de acuerdo a las responsabilidades de cada entidad o personas.

Generalmente estas obras deben ser realizadas por los propios Municipios. En el caso de riesgo grave se puede recurrir a declaratoria de “Emergencia Manifiesta”, la cual le da herramientas administrativas que permiten agilidad en la contratación de consultoría y construcción de obras de prevención y control.

Caracterización y manejo del riesgo

La caracterización entre otras cosas debe definir la existencia de situaciones de riesgo localizado o generalizado.

En el caso de riesgo localizado se deben identificar los puntos y las áreas de riesgo dentro de una determinada área estudiada. Además, se debe definir si se trata de un riesgo emergencial o de un riesgo permanente o a largo plazo.

En el caso de una situación de emergencia se deben tomar decisiones en forma inmediata para eliminar o reducir determinada situación de riesgo localizado, debido a la inminencia de los procesos de inestabilización, especialmente cuando la emergencia coincide con el periodo lluvioso.

Las soluciones pueden estar destinadas a relocalizar preventivamente a los habitantes o a construir obras inmediatas de emergencia, las cuales dependen de la claridad técnica que se tenga de la amenaza y la posibilidad técnica o material para la construcción de obras adecuadas de control.

En el caso de una situación de riesgo permanente o a largo plazo se deben establecer las medidas definitivas adecuadas para controlar los fenómenos, los cuales pueden estar directamente ligados a la ocurrencia de lluvias. Esto significa que puede existir un tiempo suficiente para un análisis detallado, diseño de obras, contratación, etc.

Para las situaciones de riesgo generalizado para un grupo grande de población, las decisiones de evacuación o la construcción de obras de control requieren de una ponderación mucho más exigente, los cuales deben ser analizados en forma interdisciplinaria por los diversos profesionales que tienen la responsabilidad de la toma de decisiones. En estos casos las situaciones pueden salirse de la posibilidad física de manejo por parte de los municipios y puede ser conveniente acudir a la Oficina Nacional para la Prevención de Desastres o al Gobierno Nacional.

El manejo del riesgo puede significar el vivir con el riesgo en ese caso el riesgo debe manejarse y evaluarse para permitir su manejo. Lo cual equivale, a que el mapeo es una de las herramientas más importantes. Las soluciones a los casos de riesgo, no tienen una receta única y las soluciones ideales generalmente, no existen.

La inestabilidad de taludes y laderas es un problema de alta complejidad y todavía muy poco entendido y es difícil definir una dirección correcta de manejo. El mapeo de zonas de riesgo todavía es una evaluación tipo ejercicio y aunque es indispensable en muchos casos, no provee información suficiente para el diseño de las soluciones. (Leroi, 1996).

Mapas de Riesgo a los deslizamientos

Con la información sobre la amenaza y con la información disponible sobre los elementos de riesgo, tales como áreas cultivadas, bosques, asentamientos humanos, obras de infraestructura existentes, elementos ambientales importantes, sitios arqueológicos, carreteras, industrias, etc., se debe analizar la vulnerabilidad de cada elemento al impacto de deslizamientos y los efectos que de este se derivan. Al riesgo se le debe dar una escala y zonificar las áreas o puntos de riesgo.

Es conveniente colocar sobre un plano los diversos asentamientos humanos, indicando el tipo de construcción y las densidades poblacionales, para poder definir las magnitudes de los riesgos relacionados con vidas humanas y bienes materiales.

Elaboración del mapa de riesgo

Superponiendo los elementos o parámetros de los mapas indicados de amenazas y riesgos se puede elaborar un plano delimitando las áreas de riesgo, dándole un peso determinado a cada factor y analizando las situaciones sitio por sitio, con la ayuda de los diversos planos.

Deben determinarse en cada sector el tipo de proceso, las áreas de influencia y el nivel de riesgo en lo referente a la posibilidad de pérdida de vidas humanas, bienes materiales y obras de infraestructura y la evolución de los procesos con referencia al tiempo y al espacio.

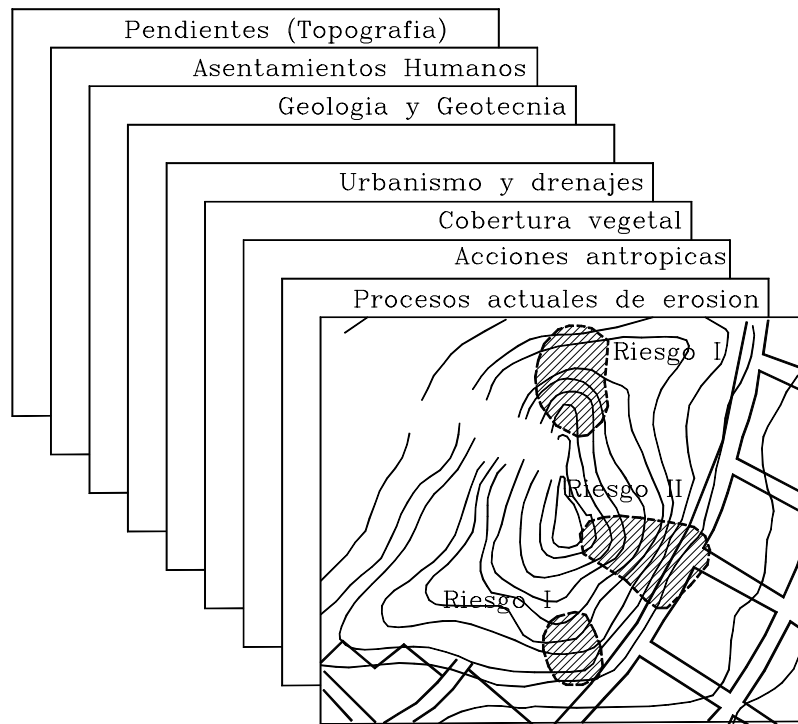


Figura 11.2 Ilustración de la metodología para elaboración del mapa de riesgo

Sistemas Experto

Se han desarrollado programas de computador conocidos como sistemas experto. Estos sistemas son una herramienta que le da al Ingeniero una ayuda para recoger información tanto cualitativa como cuantitativa del comportamiento de los taludes, predecir los movimientos potenciales y sus consecuencias y proponer medidas remediales. Uno de esos programas (Vaunat, 1992), propone una metodología para evaluar el riesgo asociado con movimientos de taludes.

El esquema sugerido incluye cuatro etapas:

- a. Clasificación de la información en tres escalas: (1) factores de predisposición que determinan la respuesta del talud; (2) factores detonantes que pueden ser temporales o cíclicos; (3) factores de comportamiento o evolución del movimiento.
- b. Caracterización de todos los movimientos posibles y todas las fuentes posibles de activación de acuerdo a los factores definidos anteriormente.
- c. Evaluación de la probabilidad de ocurrencia o amenaza de cada movimiento, dependiendo de la probabilidad de ocurrencia de los factores de activación o agravación.
- d. Evaluación del riesgo total o consecuencias esperadas

El corazón del programa experto es la caracterización geotécnica de los movimientos, teniendo en cuenta el comportamiento mecánico de los materiales.

Los programas experto permiten calcular los factores de seguridad de taludes, en áreas relativamente grandes y permite definir si los deslizamientos son profundos o superficiales (Liener, S.,1996).

11.7 USO DE SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

El análisis de amenaza a los deslizamientos requiere de la modelación de interacciones complejas entre un número grande de factores parcialmente inter-relacionados y de la evaluación de las relaciones entre varias condiciones del terreno y ocurrencia de deslizamientos.

Los sistemas de información geográfica son un sistema muy útil para resolver los modelos que permiten zonificar las amenazas, debido a que permite el almacenamiento y manipulación de la información referente a los diferentes factores de terreno como capas de datos.

La recolección de los datos y su estructuración representa entre el 70 y el 80% del costo de un mapa de riesgos (Leroi, 1996). La actualización de datos para complementar un mapa generalmente, es un costo muy similar al de la obtención de la información del primer estudio.

La recolección de los datos y su estructuración debe contener:

- a. Bases cartográficas homogéneas a una escala específica, en la cual los niveles climáticos dentro de la misma base deben ser coherentes unos con otros, por ejemplo deben tener la misma escala de trabajo y el mismo sistema de proyección geográfica.
- b. Estructuración de la información en niveles. Las bases de datos deben ser estructuradas por elementos temáticos independientes, cada uno de los cuales debe contener información que es homogénea, tanto en el contenido como en su origen. Se debe incluir la fuente de la información, la fecha y validez, la escala, y el sistema utilizado de coordenadas.

Un sistema de información geográfica se define como un poderoso grupo de herramientas para recolectar, almacenar, recuperar, transformar y presentar datos en forma espacial (Burrough 1986).

El primer sistema de información geográfica computarizado fue desarrollado en los años 60', pero su real utilización empezó aproximadamente en 1980. Generalmente, un sistema de información geográfica consiste de los siguientes componentes:

1. Entrada de datos y verificación
2. Almacenamiento y manipulación de datos.
3. Transformación y análisis de datos.
4. Salida y presentación de información.

En la actualidad hay muchos sistemas diferentes, los cuales difieren entre sí con respecto a:

1. Tipo de estructura de datos
2. Técnicas de compresión de información
3. Dimensión (dos o tres dimensiones)
4. Hardware requerido
5. Interfase de usuario

Un sistema ideal de utilización de un SIG para zonificación de amenaza de deslizamientos es su combinación con capacidades de procesos de imágenes, tales como aerofotografías escaneadas e imágenes de satélite, por esta razón el sistema “raster” es el más útil. El sistema debe ser capaz de desarrollar análisis espacial sobre mapas múltiples y tablas de atributos.

Las funciones necesarias incluye la superposición de mapas, reclasificación y otras funciones espaciales que incorporen condicionantes lógicas o aritméticas. En muchos casos la modelación de deslizamientos requiere la aplicación iterativa de análisis similares, usando parámetros diferentes. Por lo tanto, el SIG debe permitir el uso de grupos de archivos y macros para ayudar a desarrollar estas iteraciones. Como la mayoría de los grupos de datos requeridos para el análisis de proyectos de zonificación son relativamente pequeños, generalmente de menos de 100 megabytes, ellos pueden ser acomodados en computadores personales.

Las ventajas de utilizar SIGs para la zonificación de amenazas de deslizamiento son las siguientes:

1. Se puede utilizar una mayor variedad de técnicas de análisis, debido a la velocidad de los cálculos y a que las técnicas complejas requieren la superposición de un número grande de mapas y tablas.
2. Es posible mejorar los modelos, evaluando los resultados y ajustando las variables de entrada. En ocasiones se utiliza un sistema de prueba y error, corriendo el modelo varias veces hasta obtener un resultado satisfactorio.
3. Generalmente, en el transcurso del análisis se obtiene nueva información, la cual puede ser actualizada rápidamente en los modelos.

Las desventajas del uso de los SIGs, para la zonificación de amenazas de deslizamiento son el tiempo relativamente largo de digitalización y el peligro de poner mucho énfasis en el análisis de datos con poca influencia de la experiencia profesional, la cual es muy útil y generalmente, indispensable para que el modelo no termine siendo un ejercicio teórico no aplicable.

Utilización de SIGs

El primer SIG utilizado para zonificar deslizamientos fue reportado por Newman, 1978 para un trabajo en California. Posteriormente, se han reportado en la literatura centenares de casos utilizando diferentes técnicas y concepciones teóricas. La mayoría de los casos presentados en la literatura corresponden a investigaciones relacionadas con zonificación cualitativa de amenazas con énfasis en la entrada de información geomorfológica, utilizando modelos muy sencillos pero realísticos.

La utilización de SIGs para análisis de susceptibilidad a los deslizamientos ha sido reportada en varias ocasiones por el U.S. Geological Survey (Brabb 1984, 1987, 1989). Estos estudios tuvieron en cuenta otros factores como geología, pendientes y deslizamientos activos.

Posteriormente se han presentado trabajos utilizando análisis estadístico multivariado, especialmente, por Carrara en Italia y recientemente se ha popularizado la utilización de SIGs para modelos determinísticos, utilizando factores de seguridad.

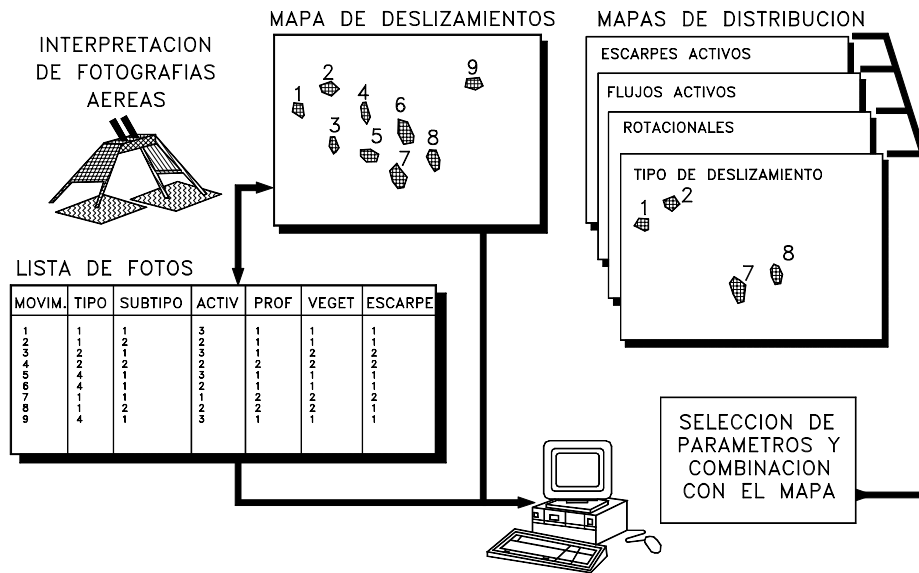


Figura 11.3 Uso de SIGs para el análisis de distribución de deslizamientos.(Turner y McGuffey 1996).

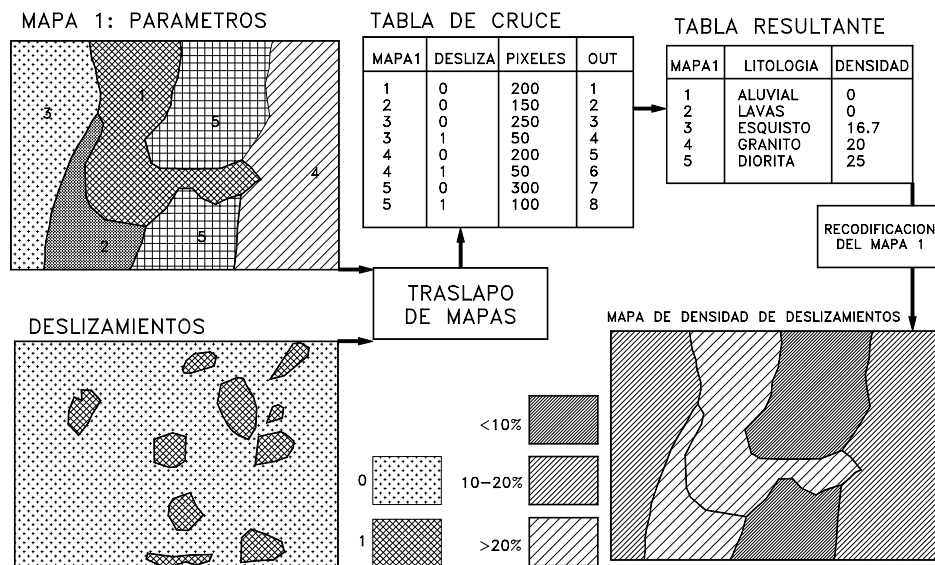


Figura 11.4 Uso de SIGs para el análisis de densidad de deslizamientos. .(Turner y McGuffey, 1996).

Inventario de deslizamientos

Los datos de entrada consisten en mapas de deslizamientos por fotointerpretación con chequeo de campos combinados, con tablas que contienen parámetros de esos deslizamientos.

El proceso del SIG es el siguiente:

1. Digitalizar los fenómenos de movimientos de masa, cada uno con su propia identificación y un código de seis dígitos que contienen información sobre tipo de deslizamiento, subtipo, actividad, profundidad, vegetación y si la unidad es una escarpa o un cuerpo de deslizamiento.
2. Recodificar el mapa de deslizamientos, mostrando los parámetros para tipos y subtipos en mapas que muestran solamente un solo tipo o proceso. En esta técnica el sistema de información geográfico es utilizado solamente para guardar la información y presentar los mapas en formas diferentes, por ejemplo, solo deslizamientos activos o solamente escarpes. El código de actividad que se le da a cada movimiento puede también ser utilizado en combinación con mapas de distribución de deslizamientos con fechas anteriores para analizar el avance de la actividad de deslizamientos en una determinada área. Esto permite tener porcentajes estimados de deslizamientos nuevos o estabilizados.

La información de movimientos en masa puede también presentarse por porcentaje de cubrimiento o densidad de deslizamientos.

El siguiente procedimiento se utiliza para el análisis de densidades:

1. Cálculo de un mapa de bits que indique la presencia o ausencia de un tipo de movimiento específico.
2. Combinación del mapa de parámetro seleccionado con el mapa de bits, a través de un proceso llamado cruce de mapas, el cual correlaciona espacialmente las condiciones de los dos mapas.
3. Cálculo del porcentaje de área por clase de parámetro ocupado por deslizamientos.

Con una pequeña modificación, el número de deslizamientos puede calcularse en lugar de la densidad. En este caso no se hace un mapa de bits sino un mapa de movimientos, en el cual cada polígono tiene un código único y se cruza con el mapa de parámetros.

Un sistema especial es el mapeo de isoyetas que representaría la densidad de deslizamientos. Este método utiliza un círculo grande que cuenta el número de deslizamientos. Los resultados son valores para los centros de los círculos, los cuales son interpolados utilizando líneas de isoyetas.

Análisis heurístico

En el análisis heurístico el mapa de amenazas es hecho utilizando el conocimiento del profesional especializado sobre un sitio específico, a través de fotointerpretación o trabajo de campo. Este mapa puede hacerse directamente en el campo o recodificando un mapa geomorfológico.

El criterio con el cual se designan las clases de amenaza puede variar de polígono a polígono. El SIG se utiliza como una herramienta rápida de dibujo y no para análisis de parámetros. El análisis puede hacerse, sin embargo, utilizando valores de peso a cada mapa de parámetros y cada mapa de parámetros recibe un diferente peso. El profesional

especializado decide que mapas utilizar y los valores de peso, con base en su propia experiencia.

El procedimiento del SIG en este caso es el siguiente:

1. Clasificación de cada mapa de parámetros de acuerdo a las clases relevantes.
2. Asignación de valores de peso a cada parámetro (por ejemplo en escala de 1 a 10).
3. Asignación de pesos a cada mapa de parámetros.
4. Cálculo de los pesos para cada pixel y clasificación en clases de amenaza.

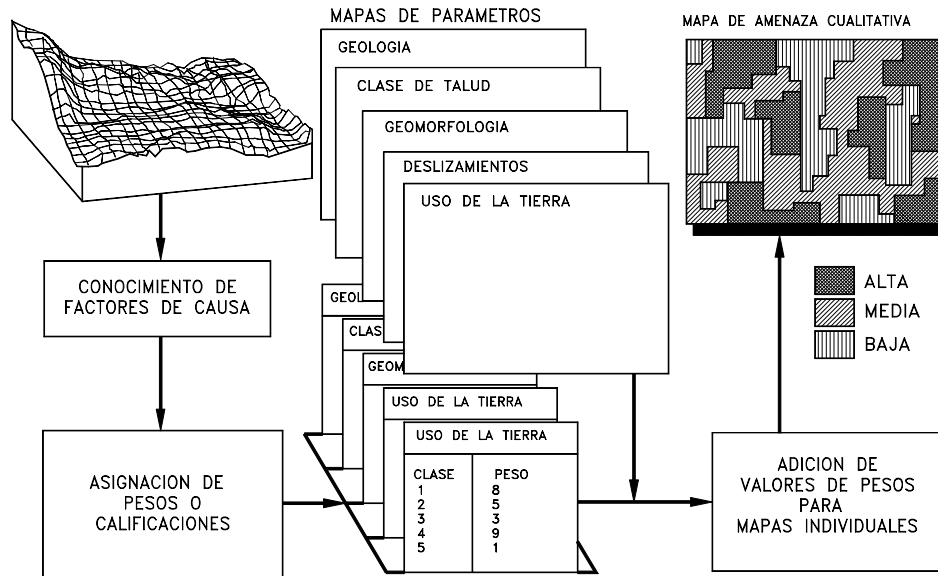


Figura 11.5 Uso de SIGs para combinación cualitativa de mapas. (Turner y McGuffey 1996).

Análisis estadístico

El método estadístico superpone mapas de parámetros y calcula densidades de deslizamiento, de acuerdo a una forma de análisis.

Si se utiliza una técnica bivariada la importancia de cada parámetro o combinación de parámetros puede ser analizada individualmente. Existen varios métodos para calcular los valores de peso, la mayoría de los cuales son basados en la relación entre densidad de deslizamiento y clase de parámetros comparados con la densidad de deslizamientos sobre el área completa.

Cada método tiene sus reglas específicas para la integración de datos requeridos para producir un mapa de amenazas.

Los valores de pesos pueden ser basados en la experiencia del profesional especializado. Es posible combinar varios mapas de parámetros con un mapa de unidades homogéneas, el cual es luego combinado o translapado con un mapa de deslizamientos para producir un mapa de densidad de deslizamientos.

Los SIGs son muy útiles para este método, especialmente con comandos macros para cálculos repetitivos que incorporen un gran número de combinaciones de mapas y la manipulación de los datos de atributo.

El usuario puede ensayar la importancia de cada mapa de parámetros y tomar decisiones sobre los mapas de entrada definitivos de una forma iterativa. Se utiliza el siguiente procedimiento:

1. Clasificación de cada mapa de parámetros en un número de clases relevantes.
2. Combinación de los mapas seleccionados de parámetros con el mapa de deslizamientos, utilizando el sistema de cruce de mapas para producir unas tabulaciones de cruce que definen las correlaciones espaciales entre los mapas de parámetros y el mapa de deslizamientos.
3. Cálculo de los valores de peso basados en la tabla de tabulación de cruce.
4. Asignación de valores de peso a los varios mapas de parámetros o diseñar unas reglas de decisiones para ser aplicados a los mapas y clasificaciones de acuerdo a los resultados finales.

El análisis estadístico multivariado de factores importantes relacionados con la ocurrencia de deslizamientos dan la contribución relativa de cada uno de esos factores a la amenaza total dentro de una unidad definida de área. Los análisis se basan en la presencia o ausencia de fenómenos de movimiento dentro de cada unidad que pueden ser cuencas, unidades geomorfológicas, etc.

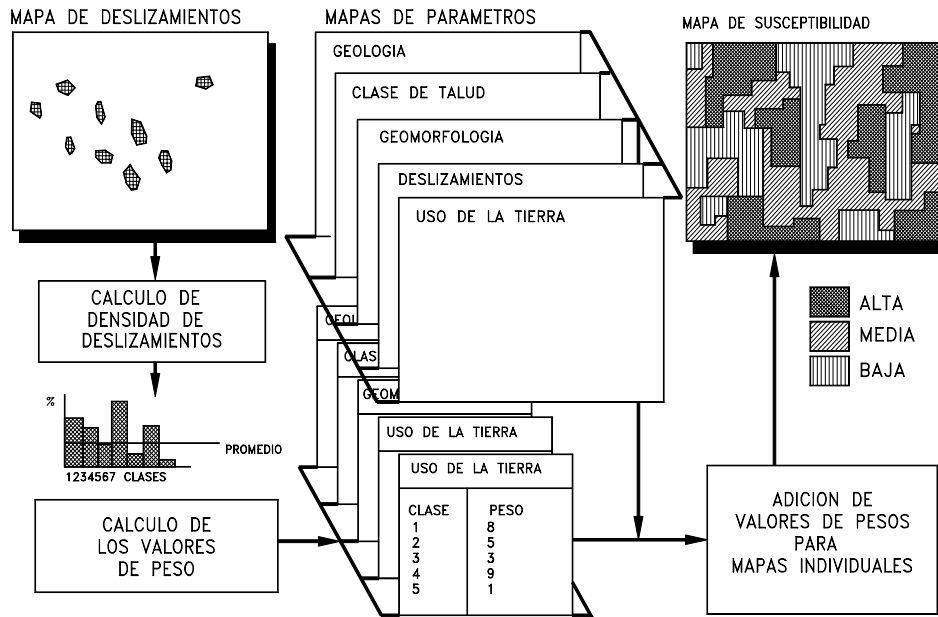


Figura 11.6 Uso de SIGs para análisis estadístico bivariado, para elaborar mapas de Susceptibilidad. (Turner y McGuffey, 1996).

Muchos métodos de análisis multivariado se han propuesto en la literatura, la mayoría de estos requieren del uso de paquetes adicionales de estadística para realizar análisis discriminante o regresión múltiple. En estos casos se debe manejar una gran cantidad de información, la cual es muy difícil en un computador personal, en ocasiones se incorporan hasta 50 parámetros diferentes.

El procedimiento utilizado en el SIG es el siguiente:

1. Determinación de la lista de factores que se van a incluir en el análisis. Los parámetros deben convertirse a mapas numéricos.
2. Combinación del mapa de unidades de área con el mapa de movimientos y separar los grupos de unidades estables e inestables.
3. Exportación de la matriz a un paquete de estadística para un análisis adicional.
4. Importación de los resultados al SIG y recodificación de las unidades de área.
5. Clasificación del mapa en clases de amenaza.

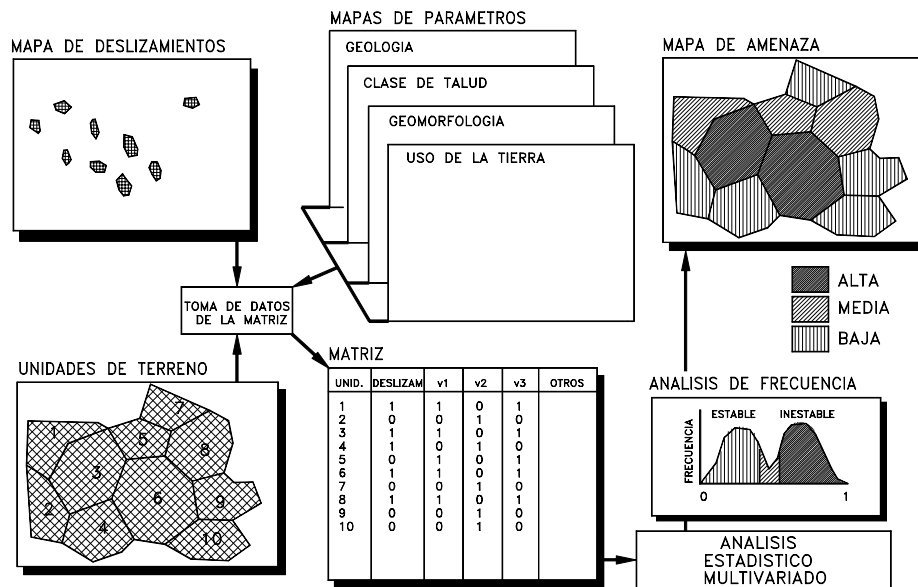


Figura 11.7 Uso de SIGs para análisis estadístico multivariado, para elaborar mapas de Amenaza a deslizamientos.(Turner y McGuffey, 1996).

Análisis determinístico

El análisis determinístico requiere de información muy completa y detallada y se debe tener claridad en los siguientes aspectos:

- a. Dónde están localizadas las áreas potencialmente inestables.
- b. Cuáles son las propiedades geológicas y geotécnicas de los materiales.
- c. En qué momento puede el fenómeno ser activado.
- d. Qué tan lejos puede propagarse el fenómeno.
- e. Cuáles son las interacciones entre el ambiente, el hombre y el problema analizado.

f. Cuál es el costo del daño causado.

Este método utiliza información de modelos de análisis de estabilidad, los cuales requieren datos de espesores de capa, resistencia al suelo, profundidad de las superficies potenciales de falla, pendiente del talud y condiciones de presión de poros.

Se deben elaborar los siguientes mapas:

1. Mapa de materiales mostrando la distribución en superficie y a profundidad de los diferentes materiales con datos de las características del suelo.
2. Mapa de líneas de nivel freático basados en modelos de aguas subterránea o en mediciones de campo.
3. Un mapa detallado de pendientes del terreno.

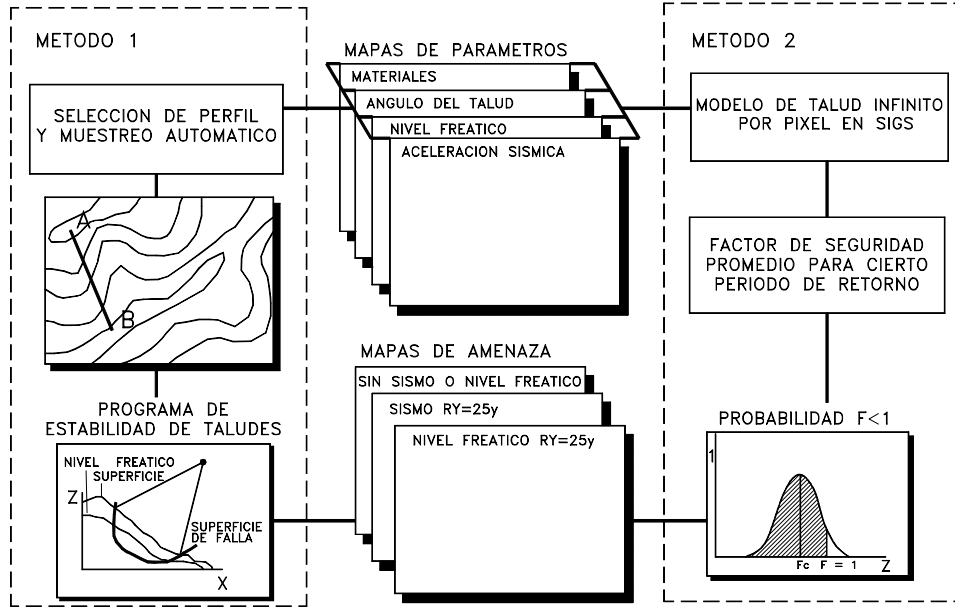


Figura 11.8 Uso de SIG para análisis determinístico para obtener mapas de factor de seguridad a deslizamientos.(Turner y McGuffey, 1996).

Se pueden utilizar varias formas de aplicación del SIG así:

1. El uso de un modelo de talud infinito que calcule el factor de seguridad para cada píxel.
2. Seleccionar el número de perfiles que se exportan a un modelo externo de estabilidad de taludes (Stable o Slope/w).
3. Muestreo de datos en unos puntos de grilla predefinidos y exportación de los datos a un modelo tridimensional de estabilidad de taludes

El resultado es un mapa que muestra el factor de seguridad promedio para una determinada magnitud de nivel freático y una determinada aceleración sísmica.

La variabilidad de los datos de entrada pueden utilizarse para calcular la probabilidad de falla en conexión con periodos de retorno de eventos detonantes de deslizamientos.

REFERENCIAS

- Ambalagan R. (1992) "Terrain evaluation and landslide hazard zonation for environmental regeneration and land use planning in mountainous terrain". Proceedings of the sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, pp. 861-871.
- Asian Technical Committee on Geotechnolgy for natural Hazards in ISSMFE (1997), "Manual for zonation on areas susceptible to rain induced slope failure". Japanese Geotechnical Society. 81 p.
- Bergren B. , Fallsvik J., Viberg L. (1992) "Mapping and evaluation of landslide risk in Sweden" Proceedings of the sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, pp. 873-878.
- Brabb, E.E. (1978), "Analyzing and portraying geologic and cartographic information for landuse planning", emergency response and Decision making in San Mateo country, California. In Proc., SIG'87, San Francisco, California, American Society of photogrammetry and remote sensing, falls church, Virginia, pp 362-374.
- Brabb, E.E. (1984), "Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping". In proc., fourth international symposium on landslides, Canadian.
- Brabb, E.E., Guzzetti F., Mark R., Simpson R.W.. (1989). "The extent of landsliding in Northern new Mexico and similar semi-arid regions". In Landslides in a semi-Arid Environment (P.M. Sadler and D.M. Morton, eds), Inland Geological Society, University of California, Riverside, Vol. 2, pp 163-173.
- Burrough, P.A. (1986), "Principles of Geographical Information Systems and Land Resources Assessment". Clarendon Press, Oxford, England, 194 pp.
- Carrara A. (1983), "Multivariate models for landslide hazard evaluation". Mathematical Geology, Vol. 15, No. 3, pp 403-427.
- Finlay P.J. , Mostyn, G.R., Fell, R. (1997) " Vulnerability to landsliding". Paper submitted to the Quarterly Journal of Engineering Geology. Geotechnical Society, Toronto, Canadá, vol. 1, pp. 307-324.
- International Association of engineering geology (IAEG) (1976). "Engineering Geological maps: A guide to their preparation". UNESCO. Press, Paris, 79 p.
- IUGS Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment (1997) "Quantitative risk assessment for slopes and landslides – The state of the art". Proceedings of the International Workshop on landslide risk assessment, Honolulu, Hawaii, USA, pp. 3-12.
- Leroi, E. (1996) "Landslide hazard – Risk maps at different scales: Objectives, tools and developments". Proceedings of the Seventh International Symposium on landslides. Trondheim, pp. 35-51.
- Leroueil S. , Locat, J. – (1996) "Geotechnical characterization of slope movements". Proceedings of the Seventh International Symposium on Lanslides. Trondheim, pp. 53-71.
- Liener, S. , Kienholz, H. , Liniger, M. , Krummenacher, B. (1996) "Slidisp – A procedure to locate landslide prone areas". Proceedings of the seventh International Symposium on landslides. Trondheim, pp. 279-284.
- Morgenstem, N.R. (1997) "Toward landslide risk assessment in practice" Proceedings of the International Workshop on landslide risk assessment. Honolulu, Hawaii, USA, pp. 15-23.
- Mora S , Vahrson, W. (1993). "Macrozonation methodology for landslide hazard determination", Bull. Intl. Ass. Eng. Geology.
- Newman E.B., Paradis A.R., Brabb EE., (1978). "Feassibility and cost of using a computer to prepare landslide susceptibility maps of the San Francisco Bay region, California, Bulletin 1443. U.S. Geologiccal Survey, Reston, Virginia., 29 p.
- Varnes D.J. (1984) " Landslide hazard Zonation " A Review of Principles and practice. UNESCO Press, Paris 63 p.
- Vaunat, J. , Leroueil, S. , Tavenas, F. (1992) "Hazard and risk analysis of slope stability". First Canadian Symposium on Geotechnique and Natural Hazard, Vancouver, pp. 397-404.