

Figura 10-5

LA ROCA FIRME COMO FACTOR EN LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA

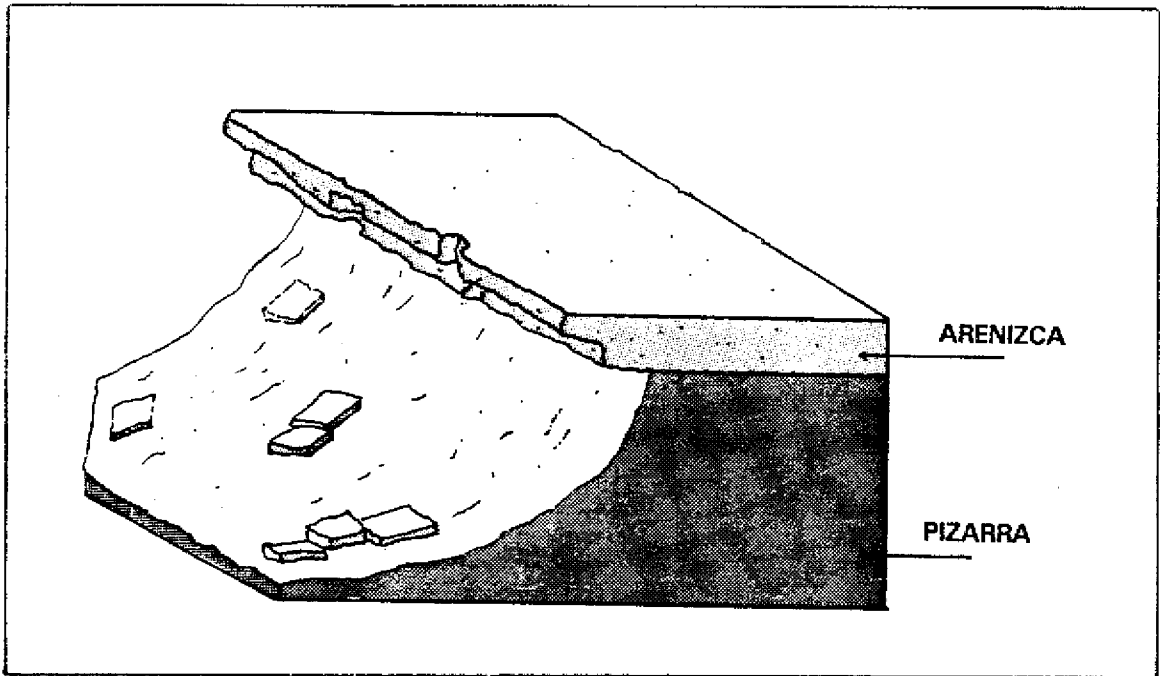
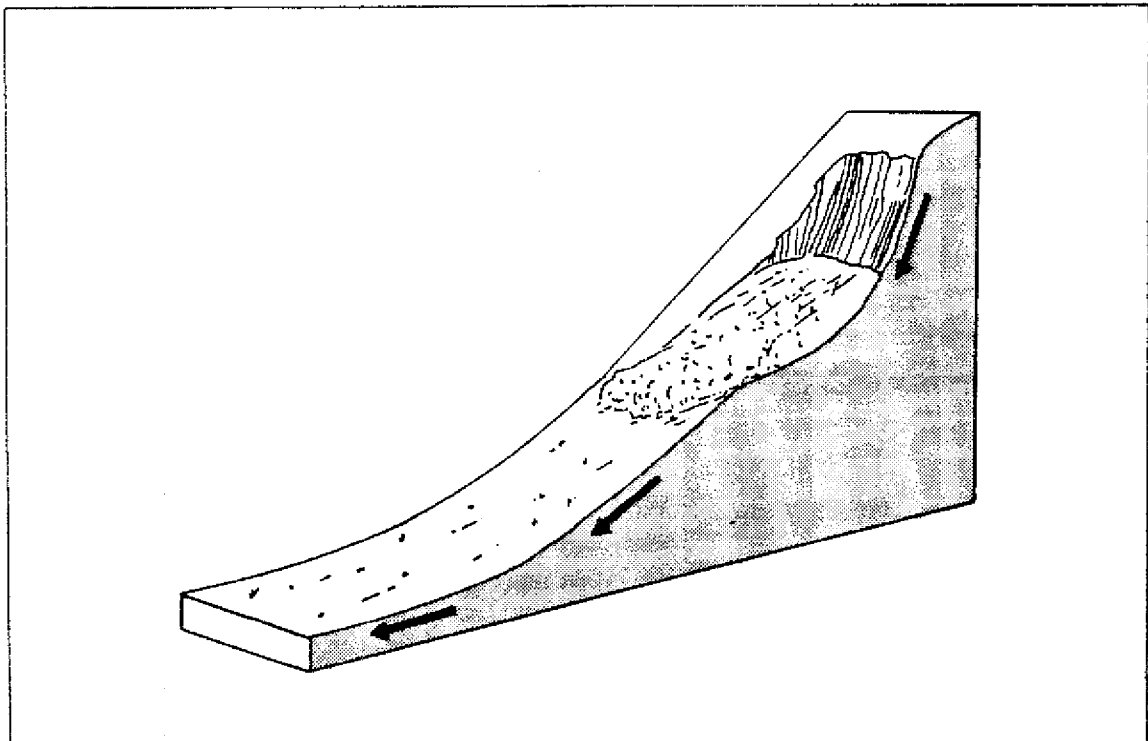


Figura 10-6

CALIDAD DE LA PENDIENTE ASOCIADA CON LA ACTIVIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA



como la recarga de aguas subterráneas resultante de los vientos dominantes y su influencia sobre las tormentas locales frontales o de la nieve acumulada. En otros casos, una pendiente puede experimentar un mayor número de ciclos hielo/deshielo o húmedo/seco, lo cual puede reducir la resistencia del suelo y hacer más susceptible a deslizamientos al área. En general, debido a la complejidad de estos factores y las actividades de desarrollo existentes, usualmente no hay una correlación directamente observable entre la orientación de la pendiente y el peligro de deslizamiento.

e. Efectos iniciados por el ser humano

Además de los fenómenos naturales, las actividades humanas pueden aumentar la tendencia natural para que ocurra un deslizamiento. Los deslizamientos que resultan de las actividades de desarrollo, usualmente se originan por el aumento de humedad en los suelos o el cambio de forma en la pendiente. Las actividades de desarrollo tales como cortes y rellenos a lo largo de los caminos y la supresión de toda vegetación, pueden alterar enormemente la forma de la pendiente y las condiciones de las aguas subterráneas (Swanson y Dyrness, 1975). Así alteradas, éstas pueden aumentar significativamente el actual nivel de deslizamientos (Varnes, 1985, y Sidle, Pearce, y O'Lughlin, 1985).

Por ejemplo, convertir un área de bosques en pastizal, o en terreno de cultivo, puede aumentar tanto la humedad en el suelo como para causar problemas de deslizamiento (DeGraff, 1979). Construir un camino que corta la base de una pendiente pronunciada puede aumentar la susceptibilidad a deslizamientos. Considerando estos efectos muy al inicio del estudio, es posible reducir el impacto potencial de la actividad natural de deslizamientos, y limitar la ocurrencia de los iniciados por el desarrollo (Kockelman, 1985).

Ahora que han sido cubiertos los puntos generales con respecto a la cartografía de diferentes características del terreno, la sección final proporciona detalle sobre las técnicas para ello, además presenta un método paso-a-paso para preparar un mapa de peligro de deslizamiento.

C. Cartografía de factores físicos y preparación de un mapa del peligro de deslizamientos de tierra

Un inventario de deslizamientos produce un mapa descriptivo de datos (Cotecchia, 1978). Sobreponiendo una transparencia del mapa del inventario de deslizamientos sobre los mapas de tipo de roca firme, calidad de pendientes y medidas hidrológicas indirectas, se puede reconocer la asociación de los deslizamientos del pasado con los factores que controlan su ocurrencia. El método que se describe a continuación emplea estas asociaciones al sintetizar un mapa de peligro de deslizamiento. La extrapolación de los datos a áreas con características similares a las que se encuentran

asociadas a anteriores deslizamientos, es una herramienta efectiva para pronosticar donde, pero no cuando, es más probable que ocurran deslizamientos en el futuro.

Esta sección presenta las técnicas utilizadas para la cartografía de cada uno de los factores importantes asociados con los deslizamientos. Con estos mapas se puede preparar uno de peligro de deslizamiento. La zonificación de los peligros es una manera de identificar áreas con diferentes niveles de peligro de deslizamiento. Se describe el método paso-a-paso, o de análisis factorial, usado para preparar un mapa de peligro de deslizamiento.

1. CARTOGRAFIA DE FACTORES FISICOS ASOCIADOS CON DESLIZAMIENTOS DE TIERRA

Cada factor es cartografiado por separado, con una técnica diferente.

a. Cartografía del inventario de deslizamientos existentes

Un mapa de los deslizamientos existentes sirve como fuente básica de datos para entender las condiciones que contribuyen a la ocurrencia de deslizamientos. Normalmente, el mapa es preparado en base a la interpretación de fotografías aéreas y al examen de campo de los lugares seleccionados. Si bien este mapa podría ser compilado exclusivamente en base a estudios de campo, el tiempo y el costo correspondiente sólo sería justificado si no hubiera cobertura fotográfica. Cualquiera de las dos maneras de preparar los mapas requiere los conocimientos de un geólogo con experiencia en la interpretación de deslizamientos o formas del terreno.

La fotografía aérea puede servir como fuente de datos sobre deslizamientos existentes, tipos de roca firme y cobertura de vegetación. Típicamente, se necesita la fotografía a gran escala para estudiar los deslizamientos existentes. La escala de la fotografía depende del tamaño de los deslizamientos más comunes en el área de estudio. La fotografía a pequeña escala es menos importante donde existe roca firme y vegetación, dado que la demarcación de áreas con textura y apariencia semejante, es más fácil que reconocer rasgos discretos. Las imágenes de satélite no suelen ser adecuadas para la cartografía de deslizamientos, excepto donde los datos producidos puedan ser ampliados a una escala por lo menos de 1:50.000. La información fotográfica y de satélites es valiosa para la cartografía de otra información espacial y para uso conjunto con técnicas de cartografía con computadora, como parte del estudio de planificación para el desarrollo (ver Capítulos 4 y 5 para una discusión más detallada).

Dependiendo de la cobertura vegetativa, la calidad de las fotografías y la habilidad del intérprete, es bastante realista lograr una exactitud del 80 al 85 por ciento para una identificación general, usando

fotografías aéreas (Rib y Liang, 1978). El rango de escalas útiles de fotografías aéreas para trabajos de inventario de deslizamientos, está limitado a 1:40.000 o mayor. La escala seleccionada dependerá del tamaño de los deslizamientos comunes al área de estudio y hasta cierto punto del relieve del área. Los grandes deslizamientos de cuatro o más kilómetros cuadrados son extremadamente difíciles de detectar sobre fotografías aéreas a escalas menores de 1:40.000. Donde la mayoría de los deslizamientos son de una hectárea o más pequeños en tamaño, es necesaria la fotografía a gran escala del orden de 1:4.800. La utilidad de la fotografía blanco y negro, a color, o color-infrarrojo para el trabajo de inventario de deslizamientos, ha de variar según las condiciones locales y la persona responsable de la interpretación. Cada tipo de fotografía tiene sus ventajas y desventajas, que han de variar en importancia de acuerdo con las características del área donde se lleva a cabo el levantamiento cartográfico.

El mapa se puede preparar a diferentes niveles de detalle respecto a los deslizamientos existentes (USGS, 1982). Un simple inventario identifica áreas definitivas y probables de deslizamientos existentes y es el nivel mínimo necesario para una evaluación del peligro de deslizamiento. Se produce un mapa sobre el cual cada deslizamiento está indicado y se dibuja una flecha para indicar la dirección del movimiento. (Ver la Figura 10-7 de un mapa sencillo de inventario).

Se puede ofrecer más información si se produce un inventario intermedio. A ese nivel el mapa producido mostrará un esquema de tipos de deslizamientos y distinguirá entre áreas de origen y de depósitos. La primera es el área donde en alguna época existió el material que fue la fuente del deslizamiento, y aparece como una huella. La segunda es el material depositado por el deslizamiento. (Ver Figura 10-8 para un ejemplo de mapa de inventario intermedio). La mayor información es obtenida produciendo un inventario detallado (Wieczorek, 1984). Las características a gran escala, tales como escarpas secundarias, hondonadas y patrones de grietas en el terreno, pueden ser presentadas en deslizamientos individuales. (Ver Figura 10-9 para un mapa detallado de deslizamientos).

Se pueden preparar tres tipos de inventario a medida que se avanza en el estudio de planificación para el desarrollo. Reiterando lo presentado en la Sección A de este capítulo, el inventario simple es adecuado para la Fase I de las actividades de diagnóstico de desarrollo; el inventario intermedio proporciona mayores detalles para un mejor mapa de peligros de una área-objetivo de la Fase II; y los rasgos a gran escala del inventario detallado son necesarios para el diseño final del proyecto, en la etapa de implementación. Referirse a la Figura 10-2 para las escalas apropiadas de mapas.

Hay varias consideraciones que se deben tener en mente al compilar datos sobre paisajes existentes. En primer lugar, el tiempo y el esfuerzo que se requiere para llevar a cabo un inventario varía de acuerdo con (1) la

complejidad geológica y topográfica; (2) el tamaño del área; y (3) el nivel de detalle de inventario deseado (Varnes, 1985). La Figura 10-10 caracteriza la relación entre el tiempo y el esfuerzo para estas tres variables. Segundo, para los inventarios más detallados se necesitarán escalas mayores de mapa a fin de revelar los pequeños rasgos de este mayor detalle. Tercero, la obtención de datos adicionales puede aumentar el detalle de un inventario existente. Esto permite que un inventario sencillo, previamente terminado, sea transformado en un inventario intermedio con menos tiempo y esfuerzo que si se produce el inventario intermedio solamente en base a trabajos de campo y de fotografías aéreas.

b. Cartografía de los tipos de roca firme que contribuyen a la inestabilidad

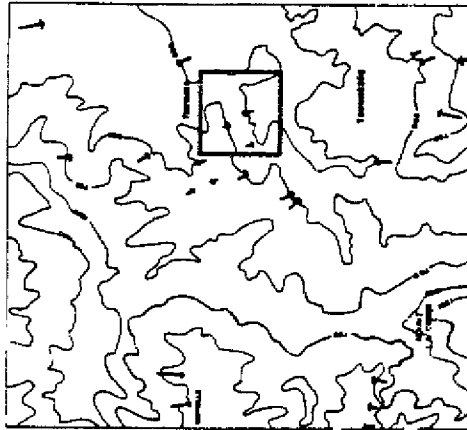
Usando la roca firme como un factor en la evaluación del peligro de deslizamiento, se muestran las muchas maneras de como el tipo de roca o de estructura contribuyen a la inestabilidad. Comparando un mapa de roca firme con el mapa de deslizamientos, uno puede discriminar entre unidades de roca asociadas con deslizamientos existentes y aquellas que están libres o casi libres de actividad de deslizamientos.

Para producir un mapa de roca firme útil para una evaluación del peligro, debe trazarse los bordes de las unidades de roca firme para producir nuevas y más adecuadas unidades. Los mapas geológicos universales que existen definen unidades de acuerdo con factores tales como edad, composición, litología (tipo de roca), y estructura (fallamiento, plegamiento, etc.). Por ejemplo, un mapa geológico normal puede mostrar una serie de depósitos de ceniza volcánica de composición mineral similar, pero con variación de edades. En la mayoría de los casos, estas diferentes unidades afectarán la ocurrencia de deslizamientos de manera similar y deben ser identificadas como una sola unidad de roca firme en un mapa revisado para los trabajos de evaluación del peligro. El geólogo debe usar su propio juicio profesional para asegurarse que el número de unidades de roca firme sea suficiente como para distinguir diferencias en sus efectos sobre la ocurrencia de deslizamientos.

Cuando no existe un mapa geológico, la alternativa es un mapa de roca firme basado en fotografías aéreas con alguna verificación de campo. Este mapa puede no ser más detallado que la demarcación de tipos de roca sedimentaria, ígnea y metamórfica. Obviamente, es preferible un mapa de roca firme, generalizado de un mapa más detallado. Pero esta es una alternativa aceptable en tales circunstancias. La demarcación de áreas de similar textura y apariencia es más fácil que reconocer rasgos discretos. Escalas tan pequeñas como 1:62.500 son útiles para este trabajo. Las fotografías a escalas de 1:20.000 o mayores, son difíciles de utilizar porque muestran un área reducida que restringe la comparación con áreas adyacentes contrastantes. También aumenta significativamente el número de fotografías a ser examinadas como resultado de la

Figura 10-7

MAPA DE UN INVENTARIO SIMPLE DE DERRUMBE



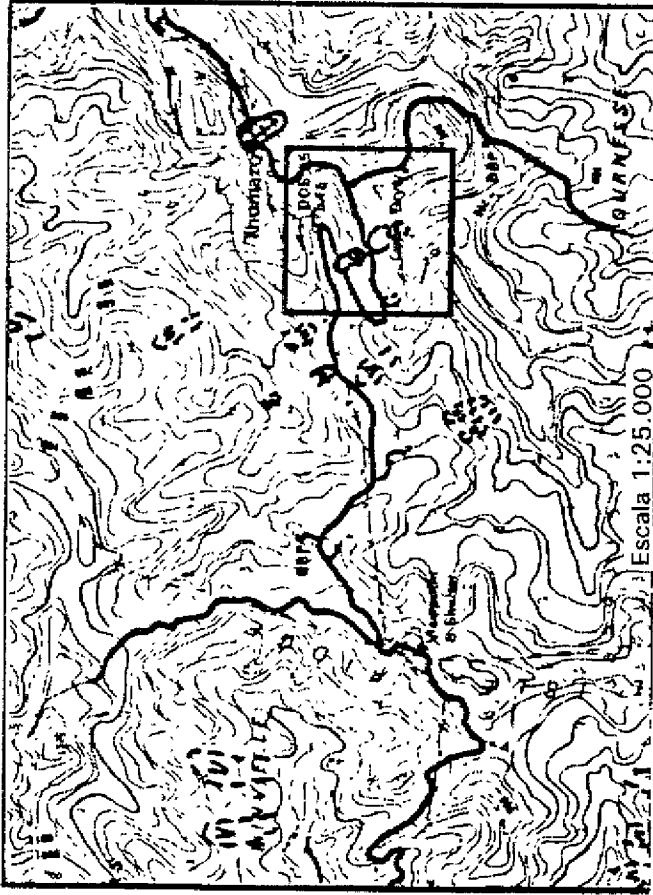
Escala 1:50.000

EXPLICACION

↖ Deslizamiento

Figura 10-8

MAPA DE UN INVENTARIO INTERMEDIO DE DERRUMBE



Escala 1:25.000

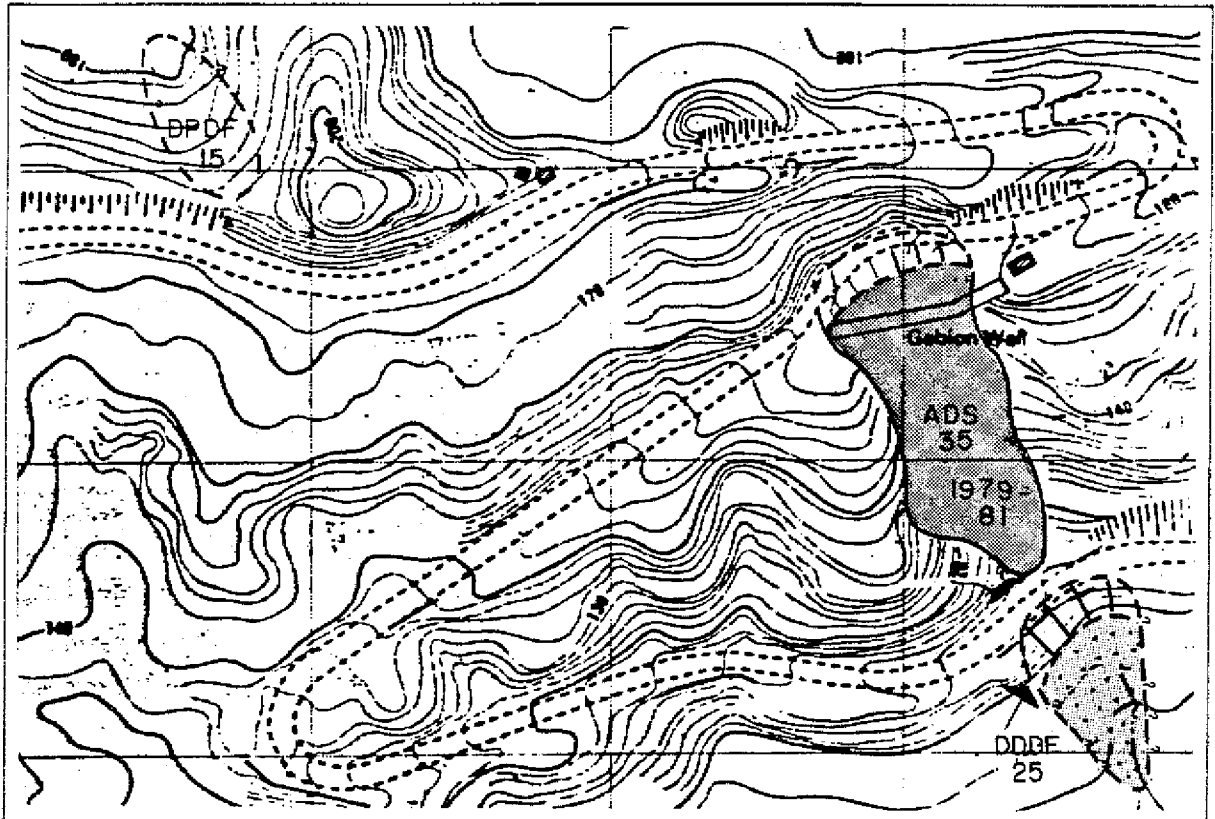
LEYENDA

DERRUMBE O DESLIZAMIENTO DE ROCAS	traza	deposición	DERRUMBE O DESLIZAMIENTO DE ESCOMBROS	traza	deposición
Falla Superficial			Falla Profunda		
DERRUMBE COMPLETO			DESPLAZAMIENTO DE ROCAS O FLUJO DE TIERRA		
<p>Puede consistir de muchos derrumbes demasiado pequeños para ser representados en forma individual, algún rasgo de un derrumbe antiguo erosionado, o un derrumbe mostrando más de un tipo de movimiento.</p>			<p>traza</p> <p>deposición</p>		

NOTA. Los derrumbes trazados con líneas sólidas pueden ser identificados como derrumbes delimitados. Las líneas interrumpidas muestran posibles derrumbes

Figura 10-9

MAPA DE UN INVENTARIO DETALLADO DE DERRUMBE



LEYENDA

<p>Area de escarpa</p> <p>Area de depósito</p> <p>Límites del depósito de un derrumbe (interrumpida cuando está aproximadamente localizado, con signo de interrogación cuando su ubicación es incierta).</p> <p>Primera letra: estado de actividad</p> <p>À - Activo o recientemente activo (oscuro)</p> <p>Ð - Durmiente (claro)</p>		<p>Segunda letra: certeza de la identificación del derrumbe</p> <p>Ð - Definitivo</p> <p>? - Probable</p> <p>Q - Questionable</p> <p>Tercera y cuarta letras: tipo predominante de movimiento de pendiente</p> <p>DF - Flujo de tierra compuesto</p> <p>DS - Deslizamiento de escombros</p> <p>DF - Flujo de escombros</p> <p>DT - Flujo de tierra</p> <p>S - Desplome, hundimiento</p> <p>Máxima profundidad del derrumbe (pies)</p> <p>Año del movimiento</p>
---	--	---

cartografía del área. Las fotografías en blanco y negro, color y color infrarrojo son todas adecuadas para la cartografía de roca firme. Las imágenes de satélite suelen no ser útiles para esta cartografía, excepto cuando las imágenes son ampliadas a escalas utilizables. Por ejemplo, las imágenes a una escala de 1:50.000, producidas de imágenes de satélites, son aceptables para esta cartografía (ver Capítulo 4).

Un mapa de suelos es un sustituto inadecuado para un mapa de roca firme. Los mapas de suelos están basados en factores concentrados en el metro superior (o menos), del material de superficie que afecta las actividades agrícolas. Generalmente hay poca o ninguna correlación entre las características de suelos "agrícolas" y la probabilidad de fallas que se originan en superficies de unos cuantos metros a decenas de metros de profundidad de material superficial.

c. Cartografía de la calidad de pendientes o inclinación

La calidad de la pendiente es un factor que asocia la efectividad de la acción de la gravedad sobre una pendiente con la susceptibilidad a deslizamientos de tierra. Un mapa topográfico es la base para preparar un mapa de calidad de pendientes. El mapa de calidad de pendientes muestra los valores de la pendiente asociados con la mayoría de los deslizamientos existentes y se deriva de un mapa topográfico actualizado. La calidad de pendiente para la evaluación del peligro de deslizamiento es comúnmente expresada como un porcentaje en vez de usar grados. Las categorías o agrupación de valores de la calidad de pendiente para uso en el análisis del peligro de deslizamiento, se deben aproximar a aquellos de las pendientes presentes en la área de estudio. Demasiadas clases de pendientes harán difícil identificar a aquéllas que son críticas para la ocurrencia de deslizamientos y demasiado pocas clases han de ser igualmente inútiles.

d. Factor hidrológico opcional - cartografía de medidas indirectas

Dado que rara vez se encuentra disponible la información sobre los niveles de napa freática y sus fluctuaciones, la cartografía de medidas indirectas tales como la vegetación y la orientación de pendientes puede revelar la influencia de la hidrología sobre un área. Cualquier mapa de vegetación que se utilice para presentar el factor hidrológico en la evaluación del peligro de deslizamiento, debe usar unidades que son dependientes del agua. Esto puede ser tan sencillo como presentar comunidades de plantas piraicas o no piraicas, o tan complejo como distinguir entre diferentes tipos de bosque. La selección de un mapa apropiado de vegetación para indicar los efectos del agua en motivar deslizamientos de tierra, requiere del geólogo un cuidadoso trabajo de campo.

La fotografía aérea es una fuente apropiada de datos para preparar mapas de vegetación. Al preparar estos, tal como el caso de la cartografía de roca firme, la escala

es de menor importancia. Aquí, también, la demarcación de áreas con características similares es más fácil que reconocer rasgos discretos. La escala de 1:62.000 es útil para identificar la vegetación ya que escalas de 1:20.000 o mayores, no revelan las características contrastantes de áreas adyacentes. Las fotografías en blanco y negro, color y color infrarrojo son todas adecuadas para esta cartografía. Las imágenes de satélite son aceptables sólo cuando son ampliadas a una escala adecuada.

La dirección a la cual da cara una pendiente también puede ser cartografiada y usada como un indicador indirecto del factor hidrológico. La orientación de la pendiente, o su aspecto están descritos en términos de ocho direcciones cardinales, es decir, norte, noreste, etc. Para conveniencia al establecer una base de datos, la orientación de la pendiente se mide en grados de acimut que van desde 0° para el N, hasta 360° grados, en dirección del reloj. Cada punto cardinal está definido por un conjunto de valores acimutales. Por ejemplo, las laderas que dan cara al noreste pueden tener una serie de lecturas de acimut que van desde los 22.5° grados a 67.5° grados.

2. LA INTERPRETACION DEL PELIGRO DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA: EL MAPA DEL PELIGRO DE DESLIZAMIENTOS

Un mapa de peligro de deslizamiento es generado para identificar áreas vinculadas de diversas maneras con este fenómeno. Se produce un mapa de peligros para cada etapa del proceso de planificación, desde el más generalizado en la etapa inicial, hasta un detallado de zonificación para uso en lugares específicos. Tal como lo sugiere el nombre, este mapa divide la totalidad del área de estudio en sub-áreas basadas en el grado del peligro potencial de deslizamiento. El mapa de peligro de deslizamiento es producido interpretando los datos presentados por los mapas de inventario de deslizamientos y los factores permanentes que influyen sobre la ocurrencia de deslizamientos.

Como con cualquier otro mapa la escala es una consideración importante. Hay dos puntos que se deben mantener en la mente respecto a la escala del mapa de peligro de deslizamiento. Primero, el mapa debe ser producido a una escala capaz de presentar la información necesaria para un determinado nivel de planificación. La compatibilidad de escala será importante cuando el mapa del peligro habrá de ser combinado con otros mapas para producir uno de capacidad de tierra (ver Capítulo 3). Segundo, el mapa de peligro de deslizamiento tendrá que estar a una escala no marcadamente diferente de los otros mapas de datos que se usaron para producirlo. En otras palabras, la confiabilidad podrá ser cuestionada cuando un mapa de peligro de deslizamiento, producido a escala de 1:50.000, se ha basado en un mapa de (calidad de pendientes a escala de 1:250.000).

Se identifican cuatro niveles de peligros relativos sobre un mapa de peligro de deslizamiento: (1) bajo; (2)

moderado; (3) alto; y (4) peligro extremo. El nivel de peligro de deslizamiento se mide sobre una escala ordinal con este método y es una representación cuantitativa de los niveles de peligro que se difieren, y que muestra solo el orden de peligro relativo en un sitio determinado y no un peligro absoluto. La predicción de un peligro absoluto está más allá de la capacidad actual.

En consecuencia, no hay manera de comparar zonas de peligros en diferentes lugares o de determinar, por ejemplo, la probabilidad que un área de alto peligro sea dos o más veces proclive que las áreas de bajo peligro a fallar en el futuro. Se debe hacer hincapié en el hecho que estas zonas de peligros relativos están basadas en los deslizamientos existentes y en las condiciones que influyen sobre su ocurrencia en una área específica. Las zonas de peligro que han sido determinadas para una área dada, sólo son válidas para el área para la cual fueron preparadas. Condiciones similares que se encuentren fuera del área evaluada, pueden no producir el mismo grado de peligro, por causa de alguna diferencia

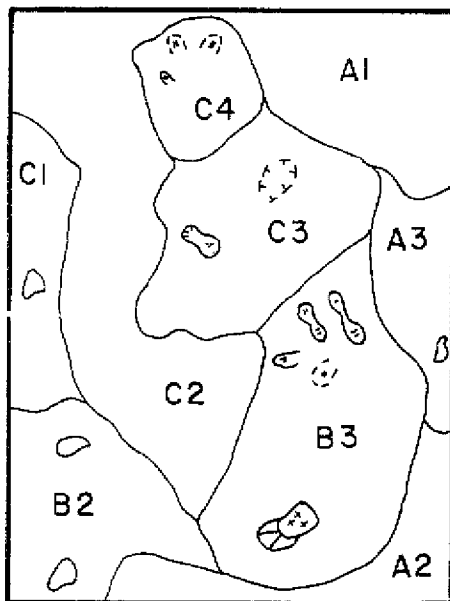
aparentemente muy pequeña en alguno de los factores.

3. ANALISIS DE FACTORES: LA TECNICA PARA PREPARAR UN MAPA DE PELIGROS

El análisis de factores es un método paso-a-paso usado para preparar mapas de zonificación de peligro de deslizamiento de un área. Son cuatro los pasos para completar el análisis de factores y producir un mapa del peligro: (1) cartografía de los deslizamientos existentes y preparación de un mapa combinando los factores permanentes (roca firme, calidad de pendiente, factores hidrológicos) en unidades individuales del mapa; (2) sobreposición del inventario de deslizamientos sobre el mapa de factores combinados; (3) preparación de un análisis para todas las combinaciones de los factores y las combinaciones de grupos de factores, de manera que se definan los cuatro grados de peligro de deslizamiento; y (4) producir un mapa con cuatro zonas, para el peligro de deslizamiento, a partir de las combinaciones agrupadas.

Figura 10-10

MAPA DEL AREA DE ESTUDIO



$$\frac{\text{Area de Deslizamiento}}{\text{Roca firme/Pendiente del área (Area de Factores Permanentes)}} = \text{Proporción}$$

Leyenda

Una presentación sobre como se determina la proporción de combinaciones de roca firme/pendiente, sujetas a anterior actividad de deslizamientos. Tomar nota que mientras la combinación B3 obviamente tiene más deslizamientos que la combinación C4, el menor tamaño del área C4 probablemente resultará en que tenga una mayor proporción que B3.

a. Paso uno: Mapa combinado de factores permanentes

El primer paso es preparar un mapa de deslizamientos existentes inventariados. También compilar un mapa que combine la roca firme, calidad de pendiente y, cuando fuera posible, las unidades o categorías de factores hidrológicos en unidades cartográficas individuales. Como ejemplo, suponga que sólo se ha de usar la roca firme y la calidad de pendiente. El mapa compilado estará compuesto de unidades cartográficas que identifiquen ciertos tipos de roca firme y de calidad de pendiente, p.e., roca firme B3 sobre pendientes de 25 a 50 por ciento (ver Figura 10-10).

b. Paso dos: Sobreposición del inventario de deslizamientos de tierra

El segundo paso es colocar una transparencia del mapa de inventario de deslizamientos sobre el mapa de factores combinados. Esto identificará cuales combinaciones están asociadas con anteriores deslizamientos y cuales no lo están. La tabulación del inventario de deslizamientos se desarrolla indicando el área total de deslizamientos que ocurren en cada unidad específica de roca firme en combinación con la calidad de pendiente (y otros factores, si son considerados) (ver Figura 10-12). Cuando se usa un factor hidrológico tal como zona vegetativa u orientación de pendiente, la tabulación incluirá el área de deslizamiento para cada combinación específica de roca firme y calidad de pendiente, más el factor hidrológico. Sumando las áreas de todas las combinaciones que se encuentran en la tabla se obtendrá el área total de deslizamientos en el área de estudio. Esta es una manera de verificar que

todas las combinaciones estén incluidas en el análisis. La figura 10-11 muestra la extensión hasta donde está presente cada combinación en el área de estudio. Por ejemplo, en roca firme B, sobre pendientes entre 25 y 50 por ciento se observan 784 hectáreas de deslizamientos.

c. Paso tres: Combinación de grupos usando el análisis de factores

El tercer paso es agrupar las combinaciones de estos factores de manera que definan cuatro grados de peligro de deslizamiento. La agrupación se logra mediante un análisis de factores combinado o una evaluación de matrices (DeGraff y Romesburg, 1989). Este análisis permite incorporar la interacción entre factores que afectan la ocurrencia de deslizamientos, sin necesidad de entender explícitamente aquellas interacciones.

Para comenzar, se mide el área total de cada combinación de roca firme, el grado de deslizamiento y factores hidrológicos del área de estudio, representados en la tabla preparada en el paso 2. Ha de ser calculada el área total con estas combinaciones y no sólo aquellas áreas asociadas con actividad de deslizamientos. Continuando con el ejemplo, suponga que se determinó un área total de 2.327 hectáreas de roca firme B, sobre pendientes mayores de 25% pero menores de 50%. La tabla del inventario de deslizamientos preparada en el Paso 2, muestra sólo el área de anteriores deslizamientos que se encuentra para cada combinación. Entonces el área total para cada combinación asociada con los deslizamientos, que se encuentran en la tabla de inventarios de deslizamientos, se divide por el área para la misma combinación de factores que se encuentra en el área de estudio (ver Figura 10-12). En el ejemplo, esto

Figura 10-11

FACTOR PERMANENTE COMBINADO (MUESTRA DE ROCA FIRME Y CLASE DE PENDIENTE) Y COBERTURA DE AREAS DEL TERRENO (EN HECTAREAS)

GRUPO DE ROCA FIRME	CLASE DE DESLIZAMIENTO				AREA TOTAL (HA)
	0 < 12% (1)	12 < 25% (2)	25 < 50% (3)	> 50% (4)	
A	--	52	78	--	130
	1.570	722	512	237	Area de deslizamientos 3.041
					Areas combinada ^{a/}
B	--	301	784	--	1.085
	--	1.776	2.327	--	Area de deslizamientos 4.103
					Areas combinada ^{a/}
C	78	--	351	180	609
	673	2.450	1.790	793	Area de deslizamientos 5.796
					Areas combinada ^{a/}

a/ Area combinada = Area de factor permanente combinado