



Serie: Atlas Nacional de Riesgos

# Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos

## Fenómenos Geológicos



## **V. ESTIMACIÓN DEL PELIGRO Y EL RIESGO DE DESLIZAMIENTOS EN LADERAS**

*Manuel J. Mendoza L. y Leobardo Domínguez M.*

### **RESUMEN**

En varios estados de la República Mexicana existen centros de población que con frecuencia están expuestos a la ocurrencia de movimientos repentinos pendiente abajo de masas de suelos y rocas en laderas, por lo que su atención recae en las autoridades de Protección Civil. Fenómenos geotécnicos como los deslizamientos con frecuencia tienen antecedentes o exhiben manifestaciones que permiten señalar la posibilidad de su ocurrencia futura. El desafío es entonces distinguir la amenaza y el peligro a que esté sometida la población de una comunidad y sus bienes, por esos eventos; establecida la vulnerabilidad de esa población y la de sus propiedades, es posible entonces evaluar el riesgo por la ocurrencia de estos fenómenos.

La identificación de los factores internos que hacen propicio el deslizamiento de una ladera y de los factores externos que los disparan, son aspectos que se discuten en este documento para estimar el peligro de esas inestabilidades; se distinguen factores topográficos, geotécnicos, históricos, hidrológicos, geomorfológicos y ambientales, que son los que determinan el estado de una ladera. Se presenta en este capítulo un método que permite estimar el peligro de deslizamiento en una ladera, basado en la asignación de valores numéricos a cada uno de esos factores influyentes. El objetivo es aportar un documento teórico-práctico que sirva como guía para elaborar mapas de peligros y riesgos ante el problema de la inestabilidad de laderas, así como establecer los lineamientos y los criterios generales a seguir para evaluar el peligro de estos fenómenos geotécnicos. Aún cuando se proporcionan ideas generales para la cuantificación del riesgo de deslizamiento de laderas, su desarrollo detallado está fuera del alcance de este documento.

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

Los eventos naturales son inevitables, pero lo que sí se puede evitar o al menos reducir, son los desastres que en ocasiones resultan de esos eventos. El problema de los deslizamientos de laderas en México es un fenómeno que ha cobrado un número considerable de vidas humanas y daños materiales cuantiosos, por lo que resulta necesario establecer los criterios que permitan a los ciudadanos y a las autoridades identificar y evaluar el riesgo asociado al deslizamiento de laderas. Este es un campo importante en el que deben estar preparados quienes atienden las actividades de Protección Civil del país, por lo que este documento está dirigido a ellos, principalmente, con miras a la integración de sus Atlas de Riesgos. El término genérico deslizamiento, dentro del contexto de laderas, se refiere (Cruden, 1991) “...al movimiento de una masa de roca, tierra o detritos pendiente abajo”.

Un deslizamiento ocurre cuando se rompe o pierde el equilibrio de una porción de los materiales que componen una ladera y se deslizan ladera abajo por acción de la gravedad. Aunque los deslizamientos usualmente suceden en taludes escarpados, tampoco es raro que se presenten en laderas de poca pendiente. Son primariamente ocasionados por fuerzas gravitacionales, y resultan de una falla por corte a lo largo de la frontera de la masa en movimiento, respecto a la masa estable; se alcanza un estado de falla cuando el esfuerzo cortante medio aplicado en la superficie potencial de deslizamiento, llega a ser igual a la resistencia al esfuerzo cortante del suelo o roca. Los

deslizamientos pueden ser desencadenados tanto por cambios en el ambiente natural, como por actividades humanas.

Las características intrínsecas y las debilidades inherentes en las rocas y en los suelos frecuentemente se combinan con uno o más eventos desestabilizadores, tales como lluvias intensas, actividad sísmica, actividad volcánica y, en menor proporción en México, por el deshielo. Los deslizamientos pueden ocurrir como fallas de laderas de cerros, cañadas, barrancas y riberas de ríos, lagunas o vasos de presas; en cortes y terraplenes de carreteras, minas a cielo abierto y bancos de materiales; también suceden deslizamientos o fallas de talud en terraplenes para presas, bordos y otras obras, así como en excavaciones para la construcción. Se reitera que dentro del ámbito de la protección civil, interesan primordialmente las inestabilidades de laderas que afecten a las personas y a sus bienes en núcleos de población; este es el enfoque al que está orientado este documento.

Los deslizamientos de laderas o taludes, así como las inundaciones, erupciones volcánicas y los temblores de tierra, son fenómenos naturales difíciles de predecir, en virtud de que son inciertos y tienen consecuencias serias para la población y sus bienes. “fenómeno”, “incertidumbre” y “consecuencias potenciales” necesitan ser identificados, a fin de definir el riesgo que representa el deslizamiento de una ladera natural. El orden en que se han mencionado los términos “fenómeno”, “incertidumbre” y “consecuencias potenciales”, es también la secuencia seguida por la mayoría de los procedimientos de evaluación del riesgo en el ámbito geotécnico; es posible que este enfoque no lo compartan en otras disciplinas por lo que más adelante se precisan términos. En este documento se enfatizan los aspectos referentes a la identificación y descripción de la amenaza (el “fenómeno”) y el peligro (la “incertidumbre”) que podría tener para la población y sus bienes, un posible deslizamiento de laderas; se dan no obstante, algunos lineamientos para la cuantificación del riesgo. El fenómeno tiene que ser descrito, luego es necesario tratar con su impredecibilidad y finalmente, tiene que ser relacionado con sus consecuencias.

Debe señalarse que la inestabilidad de laderas no es de modo alguno la única amenaza o fenómeno geotécnico sobre la población y sus bienes. Aunque no son abordados en este documento, existen otros fenómenos de naturaleza geotécnica que impactan a la población, a las construcciones y a la infraestructura de nuestro país. Entre otros, sin ser exhaustivos, podemos citar:

- a) Los agrietamientos del terreno y el hundimiento regional. La mayoría de las veces, ambos fenómenos están asociados a la explotación excesiva del acuífero, lo que se traduce en el abatimiento de la presión en el agua del subsuelo y con ello, la compresión volumétrica por el constante proceso de consolidación. Desde luego este fenómeno no afecta de manera directa a las personas, pero sí de manera significativa a sus bienes.
- b) La licuación de depósitos arenosos, ante la ocurrencia de sismos intensos. En diversas áreas del litoral mexicano tanto del Pacífico como del Golfo de México ha sucedido este fenómeno, aunque también se tienen evidencias de su ocurrencia en el Altiplano Central, relativamente cerca de la ciudad de Puebla. La licuación produce agrietamientos muy severos y grandes desplazamientos laterales, provocando la destrucción de caminos, edificaciones, muelles, conducciones, etc.;
- c) La presencia de suelos expansivos, o bien, la de suelos colapsables, que provocan movimientos indeseables del terreno, que afectan principalmente a las construcciones para vivienda; y
- d) La presencia de cavidades cercanas a la superficie del terreno, debidas a actividades de talleo para explotación minera, o bien la generación natural de cavidades cársticas (cavernas por disolución de las rocas) como en la península de Yucatán; tales huecos determinan verdaderos colapsos del terreno, afectando a personas y propiedades.

Desde luego, estos aspectos merecen atención; la identificación de estas amenazas geotécnicas en sitios específicos de nuestro territorio, debe ser el punto de partida para estimar el riesgo que representan para la población, y por ello son al menos mencionados en este capítulo. Así, de distinguirse su eventual ocurrencia, deben ser incluidos para la preparación de los Atlas de Riesgos en sus diferentes alcances.

### 5.1.1 Alcances y objetivos

La función esencial de la Protección Civil es reducir el número de víctimas humanas, de damnificados, de pérdida de propiedades y daños a la infraestructura de una región, poblado o ciudad por la ocurrencia de algún fenómeno natural o antropogénico; por ello, este documento tiene como finalidad proporcionar los medios y los criterios necesarios para la identificación clasificación y evaluación de las amenazas y los peligros para la población por el deslizamiento de laderas. Se reconocen cuatro métodos generales para realizar esta tarea; ellos son: a) con base en la evaluación de un experto; b) a partir de análisis estadísticos de eventos históricos; c) con base en el análisis de estabilidad que requiere la cuantificación de un factor de seguridad; y d) mediante la calificación de los factores físicos internos de la ladera. En este documento se proporcionan los lineamientos ingenieriles que permiten identificar los problemas asociados a la inestabilidad de laderas, y se dan los criterios para evaluar el peligro por el deslizamiento de laderas; para ello se propone una metodología que corresponde a un procedimiento del tipo d), antes citado. No obstante, se aportan comentarios e información sobre los tres primeros.

Además de la identificación del fenómeno, la evaluación del riesgo, incluso de manera cualitativa, requiere de información sobre los elementos en riesgo y el análisis de su vulnerabilidad. Es claro que un mismo peligro puede conducir a consecuencias totalmente diferentes dependiendo del uso del terreno afectado por el fenómeno. Existen sitios en el mundo en los que estos aspectos se han estudiado ampliamente a fin de administrar los riesgos por deslizamientos; tal es el caso de Hong Kong, por citar el de mayor desarrollo.

Las bases conceptuales, mecanismos de falla y metodologías para evaluar el riesgo por deslizamientos, son factores invariantes que pueden adoptarse en México, a partir de lo propuesto y experimentado en otros sitios del mundo; sin embargo, estas últimas deben alimentarse con la información adecuada. Por ejemplo, la relación entre las lluvias y los deslizamientos no es única, ya que depende de las condiciones locales como la geología, el régimen hidrológico y el clima. Así, cierto umbral de lluvia diaria con el que se tendrían problemas graves de inestabilidad de laderas en un sitio, podría no provocar ninguna inestabilidad en otro. De aquí que debe señalarse la importancia que tiene la generación y recopilación de información a nivel municipal y regional, con el fin de establecer la relación lluvia-deslizamientos para sitios o regiones particulares de México. Lo que se expone en este documento, entonces, está orientado a generar esa información indispensable para la aplicación local de las metodologías que aquí se presentan.

Los diferentes tipos de deslizamiento son descritos en el subcapítulo 5.2, reconociendo los caídos, los deslizamientos francos, los flujos de geomateriales en laderas y los desplazamientos laterales. A fin de alcanzar los objetivos planteados y pretendiendo conjuntar un documento completo sobre el tema, se ha considerado pertinente presentar en este capítulo desde los conceptos básicos de información, como son el reconocimiento de los tipos de deslizamiento. Así mismo, se juzgó conveniente exponer y precisar definiciones acerca de lo que es abordado en este capítulo; por ello, al final de este subcapítulo se explica la terminología que más aceptación tiene a nivel mundial, al ser consensuada por diversos autores de disciplinas diferentes, quienes son

representantes de comités técnicos de sociedades internacionales relacionadas con geomateriales y laderas o taludes artificiales.

En el subcapítulo 5.3 se hace un recuento de los factores que provocan los deslizamientos, distinguiendo los factores internos y los externos. En relación con uno de los factores externos más importantes se aporta información sobre datos estadísticos de umbrales de lluvia asociados con la inestabilidad de laderas. Así mismo, se exponen algunas ideas acerca de la acción sísmica como detonadora de fallas de laderas. En el subcapítulo 5.4 se discuten los criterios para llevar a cabo las investigaciones del sitio a fin de caracterizar geotécnicamente una ladera, y poder así identificar su peligro de deslizamiento. En el subcapítulo 5.5 se abordan los criterios para una estimación del peligro por deslizamiento de laderas, reconociendo las incertidumbres que ello conlleva, toda vez que la información disponible para un análisis de estabilidad es limitada, y que sin embargo se requieren tomar decisiones a corto plazo.

En el subcapítulo 5.6 se describen los enfoques, procedimientos y otras consideraciones necesarias para concluir con el análisis cuantitativo de riesgo de deslizamiento de laderas. Para ello, se recurre al concepto de intensidad de un deslizamiento, que resulta similar al enfoque de intensidad sísmica, aunque un tanto novedoso en el campo del peligro por laderas. Se analizan las consecuencias de los deslizamientos, poniendo particular atención a los impactos sobre vidas humanas. A fin de afianzar los conceptos descritos en los subcapítulos anteriores, en el 5.7 se presentan ejemplos de aplicación de la metodología expuesta, que corresponde al caso de la ciudad de Teziutlán, ubicada en la Sierra Norte del estado de Puebla. Finalmente, en el subcapítulo 5.8 se realiza una recapitulación de los temas anteriores.

## **5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS EN LADERAS Y CONCEPTOS SOBRE AMENAZA, PELIGRO Y RIESGO**

### **5.2.1 Los tres tipos básicos de deslizamientos**

Como se ha mencionado, el deslizamiento de una ladera es un término general que se emplea para designar a los movimientos talud abajo de materiales térreos, que resultan de un desplazamiento hacia abajo y hacia afuera de suelos, rocas y vegetación, bajo la influencia de la gravedad. Estas inestabilidades se caracterizan porque los materiales que componen la masa fallada se pueden mover por derrumbe o caída, deslizamiento, flujo y desplazamiento lateral. Algunos deslizamientos son rápidos porque ocurren en segundos, mientras que otros pueden tomar horas, semanas, meses, o aun lapsos mayores para que se desarrollen. Desde luego para la Protección Civil, fundamentalmente por lo que se refiere a la seguridad de las personas, son de particular preocupación los deslizamientos rápidos.

Con el fin de tener una concepción más amplia de los problemas de inestabilidad que pueden presentarse en las laderas naturales, en las secciones siguientes se da una descripción detallada de estos movimientos, haciendo énfasis en la forma en que ocurren y en el tipo de materiales o formaciones geológicas en los que son más frecuentes.

#### **5.2.1.1 Caídos o derrumbes**

Movimientos abruptos de suelos y fragmentos aislados de rocas que se originan en pendientes muy fuertes y acantilados, fig. 5.1a, por lo que el movimiento es prácticamente de caída libre, rodando y rebotando; incluye:

**Desprendimientos:** Caída de suelos producto de la erosión o de bloques rocosos, atendiendo a discontinuidades estructurales (grietas, planos de estratificación o fracturamiento) proclives a la inestabilidad.

**Vuelcos o volteos:** Caída de bloques rocosos con giro hacia adelante, propiciado por la presencia de discontinuidades estructurales (grietas de tensión, formaciones columnares, o diaclasas) que tienden a la vertical.

### 5.2.1.2 Deslizamientos

Movimientos de una masa de materiales térreos pendiente abajo, sobre una o varias superficies de falla delimitadas por la masa estable o remanente de una ladera, fig. 5.1b. Por la forma de la superficie de falla, se distinguen:

**Rotacionales:** Deslizamientos en los que su superficie principal de falla resulta cóncava hacia arriba (forma de cuchara o concha), definiendo un movimiento rotacional de la masa inestable de suelos y/o fragmentos de rocas con centro de giro por encima de su centro de gravedad. A menudo estos deslizamientos rotacionales ocurren en suelos arcillosos blandos, aunque también se presentan en formaciones de rocas blandas muy intemperizadas.

**Traslacionales:** Deslizamientos en los que la masa de suelos y/o fragmentos de rocas se desplazan hacia afuera y hacia abajo, a lo largo de una superficie de falla más o menos plana, con muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. Usualmente determinan deslizamientos someros en suelos granulares, o bien están definidos por superficies de debilidad en formaciones rocosas, tales como planos de estratificación, juntas y zonas de diferente alteración o meteorización de las rocas, con echado propicio al deslizamiento.



Figura 5.1 Principales tipos de deslizamientos en laderas

### 5.2.1.3 Flujos

Movimientos de suelos y/o fragmentos de rocas pendiente abajo de una ladera, en donde sus partículas, granos o fragmentos tienen movimientos relativos dentro de la masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla, fig. 5.1c. Los flujos pueden ser de muy lentos a muy rápidos, así como secos o húmedos; pueden distinguirse:

<b>Flujos de lodo:</b>	Masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50% de granos de arena y limo, y partículas arcillosas.
<b>Flujos de tierra o suelo:</b>	Masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50% de granos de grava, arena y limo.
<b>Flujos o avalancha de detritos:</b>	Movimiento rápido de una mezcla en donde se combinan suelos sueltos, fragmentos de rocas, y vegetación con aire y agua entrampados, formando una masa viscosa o francamente fluida que fluye pendiente abajo.
<b>Creep o flujo muy lento:</b>	A diferencia de los casos anteriores, es un movimiento constante pero muy lento de suelos y rocas pendiente abajo, en el que no se define con precisión la superficie de falla
<b>Lahar:</b>	Flujo de suelos o detritos que se origina en las laderas de un volcán, generalmente disparado por lluvias intensas que erosionan depósitos volcánicos, deshielo repentino por actividad volcánica, o bien por rotura o desbordamiento de represas de agua.

#### 5.2.1.4 Otros procesos de inestabilidad

Podrían reconocerse asimismo, los desplazamientos laterales que consisten en movimientos de masas térreas que ocurren en pendientes muy suaves, que dan como resultado desplazamientos casi horizontales; con frecuencia son causados por licuación, donde los sedimentos sueltos y saturados (arenas y limos) se transforman en un estado fluido, por las vibraciones de un sismo.

### 5.2.2 Terminología y conceptos usados en el campo de deslizamiento de laderas

En el campo de los deslizamientos o de la inestabilidad de laderas existe una amplia diversidad de términos, definiciones y conceptos utilizados por la prensa, autoridades de Protección Civil, profesores, investigadores y público en general para referirse al tema de los deslizamientos, y al riesgo que representan para la población. Diversos autores de disciplinas afines han propuesto definiciones y términos para el manejo de los deslizamientos de laderas y del riesgo asociado; sin embargo, con frecuencia no hay consenso ni consistencia en las definiciones.

Es importante precisar términos y significados para comprender mejor lo expuesto en este documento, por lo que se definen a continuación los términos más usados. Para el caso, se adoptan en gran medida los términos y definiciones propuestos por el Comité sobre Evaluación del Riesgo de Deslizamientos del Grupo de Trabajo de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS, por sus siglas en inglés), la cual reúne a los comités técnicos respectivos de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas y la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica. Es claro que las definiciones, términos y su interpretación deben ser en esencia los mismos para todas las disciplinas, con modificaciones menores para adecuarlas a situaciones particulares; atendiendo a este enfoque, se ha buscado consistencia con la terminología y significados que se manejan en otros capítulos de este libro relacionados con otros riesgos naturales.

- ✓ **Fenómeno o amenaza:** El fenómeno natural (el deslizamiento) geométrica y mecánicamente caracterizado.

Cabe aclarar, que para la palabra inglesa *danger*, originalmente asumida por la IUGS con el significado antes señalado, se ha adoptado el término “amenaza”, no obstante que su traducción literal es peligro. Adicionalmente, se precisa que la caracterización del fenómeno o la amenaza, no incluye ningún sentido predictivo.

- ✓ **Peligro:** Una condición con el potencial para causar una consecuencia indeseable. Las descripciones de peligros de deslizamiento, particularmente para fines de zonificación, deben comprender las características de los deslizamientos, las cuales pueden incluir los volúmenes o áreas de los deslizamientos y la probabilidad de su ocurrencia. Puede también ser valiosa la descripción de las velocidades del deslizamiento. Alternativamente, el peligro puede entenderse como la probabilidad con la que un deslizamiento particular ocurra dentro de un lapso dado.

Debe señalarse que la palabra inglesa originalmente adoptada por la IUGS con el significado antes descrito es *hazard*, cuya traducción también sería peligro, riesgo. Atendiendo al comentario referente a la consistencia en la terminología con otros capítulos y otros riesgos naturales tratados en este libro, se ha optado para ésta la palabra peligro. Se enfatiza el significado predictivo del peligro, aunque con una predictibilidad limitada; ello da pauta claramente a que su incertidumbre puede tratarse de manera formal, estimando probabilidades a un fenómeno particular.

- ✓ **Riesgo:** Una medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, a la salud, a la propiedad o al medio ambiente. Usualmente se estima como el producto de la probabilidad de que ocurra un evento, por las consecuencias que se deriven del mismo; dicho de otra forma, es el producto peligro por el valor potencial de pérdidas; también puede ser informativo el uso de los términos “daño” o “consecuencias”, en vez de “valor potencial de pérdidas”.
- ✓ **Elementos en riesgo (E):** Comprende a la población, los edificios y obras ingenieriles, las actividades económicas, la infraestructura y las instalaciones para el servicio público o privado ubicadas en el área potencialmente afectada por los deslizamientos.
- ✓ **Vulnerabilidad (V):** El grado de pérdida de un elemento dado o de un conjunto de elementos dentro del área afectada por el (los) deslizamiento(s). Se expresa en una escala de 0 (ninguna pérdida) a 1 (pérdida total). Para el caso de una propiedad, la pérdida será el valor de la propiedad; para personas, será la probabilidad de que una vida en particular (el elemento en riesgo) sea perdida, dada(s) la(s) persona(s) que sean afectadas por el deslizamiento.
- ✓ **Probabilidad (P):** La posibilidad de un resultado específico medido como el cociente de ese resultado específico, entre el número total posible de resultados. Se expresa como un número entre 0 y 1, correspondiendo el cero a la imposibilidad de ocurrencia, y el uno a la certeza.
- ✓ **Análisis del riesgo:** El uso de la información disponible para estimar el riesgo a individuos, poblaciones, propiedades, o medio ambiente, debido a cierto peligro. Los análisis de riesgo generalmente comprenden las tres etapas siguientes: identificación del fenómeno, identificación del peligro, y estimación del riesgo.

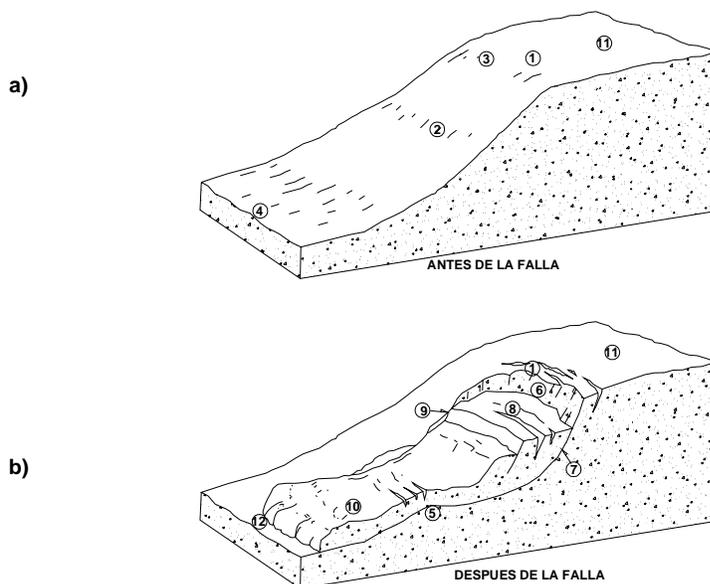
- ✓ **Estimación del riesgo:** El proceso usado para producir una medida del nivel de riesgo siendo analizado en relación a la salud, propiedad y el medio ambiente. La estimación del riesgo comprende las etapas siguientes: análisis de frecuencias, análisis de consecuencias, y su integración.
- ✓ **Valoración del riesgo:** La etapa en la que las valoraciones y los juicios entran en el proceso de decisiones, explícita o implícitamente, incluyendo consideraciones acerca de la importancia de los riesgos estimados y de las consecuencias asociadas de tipo social, ambiental y económica, a fin de identificar un rango de alternativas para el manejo de los riesgos.
- ✓ **Manejo de riesgos:** El proceso completo de valoración del riesgo y control del riesgo.
- ✓ **Control del riesgo:** El proceso de toma de decisiones para administrar el riesgo, y la implementación y puesta en ejecución, así como la re-evaluación de su efectividad de tiempo en tiempo, usando los resultados de la estimación del riesgo como una entrada.
- ✓ **Riesgo aceptable:** Un riesgo para el cual, para los fines de vida o trabajo, estamos preparados para aceptar sin preocupación acerca de su manejo. La sociedad generalmente no considera justificado gastar más en reducir tales riesgos.
- ✓ **Riesgo tolerable:** Un riesgo que la sociedad está dispuesta a vivir con él, a fin de asegurar ciertos beneficios netos, en la confianza de que está siendo controlado adecuadamente, mantenido bajo revisión. En algunas situaciones el riesgo puede ser tolerado en virtud de que los individuos en riesgo no puedan franquearlo, aun cuando ellos reconozcan que no sea controlado propiamente.
- ✓ **Riesgo individual:** El riesgo de fatalidad y/o de sufrir heridas de cualquier individuo identificable, quien vive dentro de la zona expuesta al deslizamiento, o quien sigue un patrón particular de vida que podría estar expuesto a las consecuencias del deslizamiento.
- ✓ **Riesgo social:** El riesgo a la sociedad como un todo: uno donde la sociedad tendría que soportar la carga de un accidente de deslizamiento, causando un número de muertes y heridos, y pérdidas económicas o ambientales.
- ✓ **Ladera segura:** Una ladera que es suficientemente estable como para no imponer riesgos inaceptables al público por su presencia.
- ✓ **Riesgo total (Rt):** El número esperado de pérdida de vidas, personas lesionadas, daños a la propiedad y perturbación a la actividad económica. Es el producto de un riesgo específico (Rs) y elementos en riesgo (E), sobre todos los deslizamientos y deslizamientos potenciales en el área de estudio.

La definición y la identificación de los términos utilizados para describir una ladera, así como los rasgos que distinguen a un deslizamiento se incluyen en la figura 5.2. Adicionalmente, se ha considerado conveniente incluir un glosario breve con algunos términos geotécnicos empleados en este capítulo, a fin de facilitar su comprensión.

**Cavidades cársticas.** Son huecos o cavernas que se generan en los mantos de rocas calizas por la disolución de la roca al entrar en contacto con aguas que contienen dióxido de carbono.

**Echado y rumbo.** Véase la figura 5.8

**Estereoscopio.** Instrumento óptico en el cual dos imágenes planas, como las de fotografías aéreas, sobrepuestas una a otra por la visión binocular, dan la sensación tridimensional del relieve.



**Figura 5.2** Definición de las características y partes que componen a) una ladera y b) eventualmente un deslizamiento

**Ingeniería geotécnica.** Se encarga de la aplicación de métodos científicos y principios

1. **Corona:** El material que aún permanece en su lugar, prácticamente no desplazado y adyacente a las partes más altas de la escarpa principal.
2. **Superficie original del terreno:** Es la superficie inclinada o talud de una ladera antes de que ocurra el movimiento o deslizamiento.
3. **Hombro:** Es la zona que se encuentra en la transición de la superficie inclinada o talud de una ladera y la corona.
4. **Pie de la ladera:** Parte más baja de la ladera.
5. **Pie de la superficie de falla:** La línea de intersección (en ocasiones cubierta) entre la parte inferior de la superficie de falla y la superficie original del terreno.
6. **Escarpa principal de falla:** Es el escalón o superficie abrupta localizada en la parte superior de la ladera y contigua a la corona; resulta del movimiento del talud pendiente abajo y forma parte de la superficie de falla.
7. **Superficie de falla o de ruptura:** Zona o lugar geométrico donde se rompe o pierde el equilibrio de una porción de los materiales que componen una ladera y se deslizan ladera abajo por la acción de la gravedad, separándose de la ladera remanente.
8. **Cuerpo principal:** Aquella parte del material desplazado sobre la superficie de ruptura; en ocasiones ese material permanece sobre la superficie de deslizamiento (falla contenida), pero otras veces se “vacía” totalmente, dando como resultado los flujos.
9. **Flanco:** El costado de un deslizamiento de tierras. Se indica derecho o izquierdo, refiriéndose al deslizamiento observado desde la corona.
10. **Zona de acumulación o base:** El área dentro de la cual el material desplazado queda encima de la superficie original del terreno; esto es el área cubierta por el material fallado, abajo del pie de la superficie de falla.
11. **Plataforma:** Porción superior del talud más allá de la corona.
12. **Punta o uña:** La base del deslizamiento que se encuentra más distante de la corona.

ingenieriles a la adquisición, interpretación y uso del conocimiento de los materiales de la corteza terrestre, a la solución de problemas de ingeniería civil.

**Planos de discontinuidad.** Superficies en una formación rocosa en donde se rompe la continuidad, tales como grietas, fisuras, juntas, y diaclasas (grietas sensiblemente verticales que delimitan formaciones rocosas de basaltos columnares).

**Presión de poro.** Presión en el agua que ocupa los poros o vacíos de un suelo.

**Suelos alterados o residuales.** Suelos no transportados producto de la descomposición química (meteorización) de las rocas, debida a las condiciones climáticas.

### 5.3 FACTORES QUE DETERMINAN LA INESTABILIDAD DE LADERAS

En términos generales se puede decir que los factores que propician los problemas de deslizamientos o de inestabilidad de laderas se dividen en internos y externos; y tienen que ver directa o indirectamente con los esfuerzos cortantes actuantes y resistentes que se desarrollan en la potencial superficie de falla o de deslizamiento. En no pocas ocasiones dichos factores se combinan, resultando difícil distinguir la influencia de cada uno de ellos durante la falla de una ladera. Los cambios en el ambiente y las perturbaciones al entorno natural por actividades humanas, son causas que también pueden desencadenar los deslizamientos de laderas.

En la medida que se conozca y se entienda cómo afectan estos factores la estabilidad o inestabilidad de una ladera, se tendrán más elementos para distinguirlos en campo, evaluar el grado o la magnitud del peligro, tomar medidas de prevención o de evacuación si fuera necesario y, de ser posible, prevenir su falla mediante la aplicación de métodos de estabilización. Debido a que existen casos en los que es difícil distinguir cómo dichos factores afectan la estabilidad de una ladera, resulta conveniente estudiarlos por separado. A continuación se presenta una descripción de los principales factores internos y externos que afectan la estabilidad de laderas. Antes, se considera pertinente definir el concepto de factor de seguridad de una ladera.

#### 5.3.1 Factor de seguridad

El factor de seguridad (FS) de una ladera, usualmente se expresa desde el enfoque clásico de un análisis de estabilidad global, como el cociente mínimo entre la resistencia media al esfuerzo cortante ( $\tau_f$ ), y el esfuerzo cortante medio que actúa en la potencial superficie de falla ( $\tau$ ); este esfuerzo actuante lo induce principalmente el peso del material adyacente al talud. Si se considera la existencia de una ladera, se debe asumir que  $\tau_f > \tau$ , y que por tanto el cociente FS es mayor que la unidad. La condición de falla inminente en una ladera se presenta cuando se cumple  $\tau_f = \tau$ , y por tanto  $FS = 1$ . Para que ello ocurra, el esfuerzo cortante medio actuante debe aumentar y/o la resistencia media al esfuerzo cortante del suelo debe disminuir, como se puede ver en la tabla 5.1. Los factores externos e internos a la ladera determinan los cambios que pueden sufrir estas dos variables ( $\tau_f$  y  $\tau$ ) debido a fenómenos naturales o artificiales. Entre los primeros, que inciden directamente en el valor de  $\tau$ , se pueden considerar las posibles cargas externas aplicadas, la modificación de la pendiente o de la altura de la ladera, etc. Por otro lado, entre los segundos se pueden englobar los mecanismos que provocan una reducción de la resistencia cortante,  $\tau_f$ ; tales como el intemperismo y la erosión, que generan disgregación y descomposición de materiales. Sin embargo, el mecanismo más simple y rápido para modificar la resistencia es la generación de presión de poro (presión en el agua que ocupa los intersticios del suelo o las grietas de formaciones

rocosas); ello ocurre cuando el agua se acumula en el material térreo de la ladera, tal como se explica en la sección 5.3.2.3.

**Tabla 5.1 Definición del factor de seguridad de una ladera**

Factor de seguridad	Ladera estable	Falla
$FS = \frac{\tau_f}{\tau}$	$FS > 1$ $(\tau_f > \tau)$	$FS = 1$ $(\tau_f = \tau)$

### 5.3.2 Factores internos

Los factores internos están directamente relacionados con el origen y las propiedades de los suelos que componen la ladera, así como por su distribución espacial y de manera muy particular, por la presencia de agua; la presión que ejerce dentro de la masa de suelo, provoca la disminución de su resistencia al esfuerzo cortante. El agua, ya sea por lluvias o cualquier otra fuente, es la principal causa que provoca una disminución de la resistencia de los suelos en la potencial superficie de falla.

#### 5.3.2.1 Propiedades de los suelos y rocas

Las características de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos y de las rocas que forman las laderas son variables que dependen principalmente de las condiciones geológicas y climáticas de una región, y varían en el espacio y en el tiempo. La resistencia al esfuerzo cortante de los suelos puede ser determinada mediante pruebas de campo o de laboratorio. Las fuerzas actuantes por peso propio y por cargas aplicadas se determinan con suficiente precisión a partir de sus condiciones geométricas y de pesos volumétricos. Con ello, es posible realizar el análisis cuantitativo de estabilidad en el que se determina un factor de seguridad global para cada caso.

Las debilidades inherentes en las rocas y en los suelos frecuentemente se combinan con uno o más eventos desestabilizadores (factores externos) tales como lluvias intensas, cambios en el nivel del agua dentro del terreno, actividad sísmica o actividad volcánica. La lluvia, por ejemplo, produce un aumento en la saturación del terreno y en el aumento del peso del suelo; y de manera más trascendente, en la elevación del nivel del agua, lo que se traduce en el incremento de su presión.

Las heladas y las bajas temperaturas constituyen otro factor de degradación y alteración que gradualmente reducen la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos y de las rocas. La formación de láminas o lentes de hielo dentro de la masa del suelo generan esfuerzos horizontales y un aumento de presión de poro durante el deshielo. Otras fuentes de ingreso de agua hacia las laderas las constituyen las fugas en los sistemas de drenaje y de distribución de agua potable en zonas urbanas asentadas en las laderas.

#### 5.3.2.2 Estratigrafía y estructuras geológicas

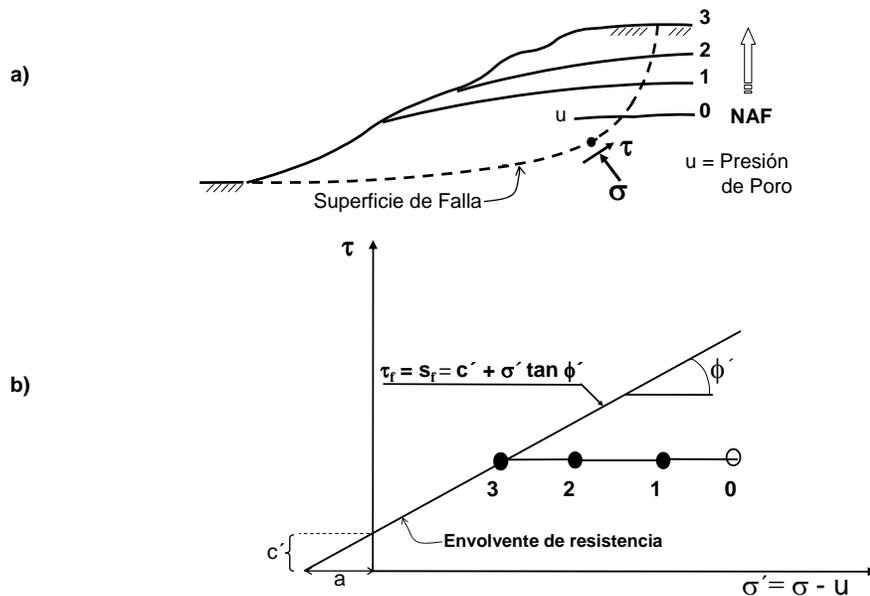
Existen muchos casos documentados sobre deslizamientos determinados por las condiciones estratigráficas y geológicas de las laderas. Los planos de estratificación, discontinuidades o zonas de contacto de estructuras geológicas, se convierten con frecuencia en potenciales superficies de falla en una ladera, principalmente cuando los planos de estratificación y las zonas de contacto resultan con pendientes inclinadas con lo que son proclives al deslizamiento.

En el territorio mexicano existen amplias zonas con materiales que deben su génesis a explosiones volcánicas ocurridas en tiempos geológicos relativamente recientes (miles de años), donde los materiales expulsados se han depositado en estado muy suelto con pendientes o echados paralelos a los taludes entonces existentes, atendiendo a la geomorfología que guardaban las laderas en sus etapas tempranas. Ello ha propiciado que los materiales sean especialmente susceptibles a deslizarse ante perturbaciones externas como las lluvias o los sismos.

Otros casos de inestabilidad de laderas asociados a planos de estratificación o contactos geológicos proclives a los deslizamientos, se presentan en depósitos de origen sedimentario que han sido plegados por esfuerzos tectónicos de la corteza terrestre. Ello ha dado como resultado la formación de montañas y cerros constituidos por materiales estratificados, cuyos planos de estratificación deformados son propicios a los deslizamientos, volviéndose la mayoría de las veces, en francas superficies de falla.

**5.3.2.3 Mecanismo de falla por aumento de la presión del agua**

En cada ladera ocurren fluctuaciones en los niveles del agua del terreno, de acuerdo con las variaciones estacionales y cambios climáticos a los que año con año está expuesta. Así, en la temporada de sequía el suelo se mantiene parcialmente saturado, generándose incluso tensión o presión negativa en el agua, lo que define temporalmente una resistencia cortante relativamente alta del material. Al ocurrir precipitaciones intensas y prolongadas esa succión se pierde e incluso se genera una presión positiva en el agua (también conocida como presión de poro); en la figura 5.3a se esquematiza el aumento del tirante de agua dentro del suelo de la ladera (niveles 0, 1, 2 y 3), que es lo que sucedería internamente ante lluvias intensas. El aumento de presión de poro ( $u$ ) en la superficie potencial de falla va en detrimento de la resistencia del suelo, atendiendo al principio de los esfuerzos efectivos. La ecuación incluida en la figura 5.3b establece que la resistencia al esfuerzo cortante ( $s_f$ ) es proporcional al esfuerzo normal efectivo ( $\sigma'$ , que es igual al esfuerzo total menos la presión de poro) dada su naturaleza friccional; los parámetros de resistencia son la cohesión efectiva ( $c'$ ) y el ángulo de fricción interna ( $\phi'$ ); así pues, cuando la presión de poro



**Figura 5.3 Efectos de la presión del agua sobre la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, atendiendo al nivel que alcanza dentro de la ladera**

aumenta (por la elevación del nivel de aguas freáticas, NAF) el nivel de esfuerzos efectivos disminuye, y consecuentemente también se reduce la resistencia efectiva del suelo. En la figura 5.3b aparece la trayectoria de esfuerzos efectivos al aumentar la presión de poro (secuencia 0, 1, 2 y 3), hasta tocar la envolvente de resistencia.

Lo antes expuesto resulta el único mecanismo en zonas no pobladas. Sin embargo, en centros urbanos o rurales desarrollados en los alrededores de una ladera, a las lluvias debe agregarse la muy frecuente ocurrencia de fugas de agua en los servicios de alcantarillado y suministro de agua potable. Los volúmenes escapados de agua generan a fin de cuentas, presiones de poro en los intersticios de los suelos de la ladera, equivalentes a las que induce el agua de lluvia, con lo que disminuyen la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos en forma similar.

### **5.3.3 Factores externos**

Los factores externos que propician la inestabilidad de laderas son aquellos sistemas ajenos a la ladera que perturban su estabilidad; usualmente producen un incremento de los esfuerzos cortantes actuantes, aunque de manera indirecta pueden producir un cambio en la resistencia al esfuerzo cortante del material que compone el talud. Los factores externos pueden ser originados ya sea por fenómenos naturales, tales como las lluvias intensas y prolongadas, los sismos fuertes y la actividad volcánica; o bien por actividades humanas.

#### **5.3.3.1 Lluvias intensas y prolongadas**

Uno de los factores externos que más contribuyen a la inestabilidad de laderas es la lluvia; por el efecto que tiene en la saturación del terreno, en el aumento del peso volumétrico del suelo y, de manera más trascendente, en la reducción de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos (por efecto de la presión de poro); asimismo, las corrientes extraordinarias por el pie propician socavación, deslaves y cambios en la geometría de las laderas. En México, la mayoría de los deslizamientos disparados por lluvias intensas y de larga duración se han presentado en laderas constituidas por suelos residuales y depósitos de origen sedimentario o aluvial. Estos deslizamientos han causado cuantiosos daños materiales y han cobrado cientos de vidas humanas, especialmente en los estados de Baja California, Chiapas, Colima, Durango, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Puebla y Veracruz.

En la literatura técnica existen múltiples casos documentados que relacionan a la intensidad o la cantidad de lluvia que cae en una zona o región con la ocurrencia de deslizamientos de laderas. Los umbrales de lluvia para los cuales han ocurrido deslizamientos en diferentes partes del mundo, han sido determinados a partir de la necesidad de mitigar los desastres relacionados con este tipo de fenómenos. En Hong Kong, por ejemplo, (uno de los sitios más estudiados del mundo dado su territorio tan sinuoso y lluvioso) han logrado acumular una gran cantidad de información histórica a través de varios años de monitorear la ocurrencia de deslizamientos y su relación con las lluvias, llegando a las siguientes conclusiones (Brand, 1985):

- Los deslizamientos en su gran mayoría son inducidos por lluvias cortas y localizadas de intensidad alta, y éstos ocurren prácticamente al mismo tiempo que se presenta el máximo de la lluvia horaria.
- La lluvia antecedente no es un factor mayor en la ocurrencia de deslizamientos, excepto en casos de deslizamientos menores que tienen lugar bajo lluvias de relativamente baja intensidad. En estos casos, sólo la lluvia antecedente de unos cuantos días parece ser significativa.

- Una intensidad de lluvia de aproximadamente 70 mm/hora parece ser el valor de un umbral arriba del cual ocurren los deslizamientos. El número de deslizamientos y la severidad de sus consecuencias aumenta dramáticamente conforme crece la intensidad horaria respecto a este umbral.
- La lluvia de 24 horas generalmente refleja lluvias cortas de intensidad alta, y ésta puede por tanto usarse como un indicador de la probabilidad de deslizamientos. Una lluvia de 24 horas de menos de 100 mm es muy improbable que provoque un deslizamiento mayor.

Los resultados de la correlación lluvia-deslizamientos los han resumido en la tabla 5.2. Muestran la frecuencia aproximada de deslizamientos en términos de las lluvias de 24 horas y de una hora. De hecho, esta simple información constituye en gran medida la base del sistema de alertamiento contra deslizamientos que utilizan en Hong Kong, donde se tienen suelos residuales y un clima tropical. Debe enfatizarse sin embargo, que los umbrales de lluvia mencionados, a partir de los cuales se tienen diferentes niveles de peligro, no son únicos. Los valores presentados son válidos para la región de Hong Kong, donde la media anual es de 2,225 mm, y más del 80% de la lluvia cae de mayo a septiembre; donde las intensidades de lluvia pueden ser tan altas como 50 mm/hora, y donde no son raras las precipitaciones de 200 mm en 24 horas. Es claro que los umbrales mencionados son distintos para otros sitios, con climas y ambientes geológicos diferentes.

**Tabla 5.2 Relación aproximada entre intensidad de lluvia y deslizamientos de laderas en Hong Kong (Brand, 1985)**

Efecto del deslizamiento		Frecuencia
100	Desastroso	1 en 5 años
70	Severo	1 en 2 años
40	Menor	3 en 1 año
0	Ninguno	---

Lluvia horaria, mm
Lluvia diaria, mm

No obstante, en algunas zonas del país han ocurrido deslizamientos ajenos a las temporadas de lluvias, pero relacionados con la presencia de agua. En la ciudad de Tijuana, por ejemplo, se tienen casos documentados donde se han presentado deslizamientos de laderas que han afectado vías de comunicación y zonas urbanas. En dichos casos, éstos han sido disparados principalmente por las fugas en los sistemas de drenaje y suministro de agua en laderas constituidas por materiales de origen sedimentario y aluvial, los cuales son muy propensos a disgregarse o desmoronarse al contacto con agua.

**5.3.3.1a La lluvia en los análisis de la evaluación del riesgo de deslizamientos**

Para tomar en cuenta el efecto de la lluvia en los análisis de evaluación del peligro de deslizamiento de laderas se requiere, en primer lugar, contar con información confiable sobre la intensidad y la duración de la lluvia que cae en una zona o región, y su relación con los deslizamientos de laderas y el tipo de suelos que las forman. También son importantes los datos sobre ubicación del sitio, altura y pendiente de la ladera, distancia de recorrido y velocidad del deslizamiento, fecha y hora de ocurrencia, límites de afectación, volumen removido y tipo de deslizamiento, así como información sobre los daños directos ocasionados por el deslizamiento (pérdida de vidas humanas y costos económicos).

El análisis de información histórica sobre los registros de lluvias y la ocurrencia de deslizamientos de laderas, en una ciudad o región, así como su correlación con el tipo de materiales que las forman, permitiría identificar los umbrales de lluvia (intensidad y duración) para los cuales se producen deslizamientos en una zona determinada y sus periodos de retorno. La lluvia acumulada en días también es un factor importante por conocer, ya que en muchas zonas los deslizamientos ocurren después de que una ladera ha estado sometida a varios días de lluvias, saturando el terreno y creando escurrimientos o flujos superficiales de agua.

#### **5.3.3.1b Fuentes de información: alcances y limitaciones**

Aun cuando en México los deslizamientos de laderas en zonas urbanas han ocurrido con cierta frecuencia y desde hace varias décadas, no se cuenta aún con una base de datos que reúna información histórica, documentos o informes con la descripción de tales acontecimientos. En ciertos casos, es muy probable que la información exista pero generalmente se encuentra dispersa en instituciones relacionadas con la atención de estas emergencias. Entre dichas instituciones se pueden citar a la Comisión Nacional del Agua (CNA) y sus filiales en los estados, las oficinas de Comunicaciones y Transportes, los departamentos de bomberos, las unidades estatales y locales de Protección Civil, etc. Otras fuentes muy importantes de información son las organizaciones no gubernamentales, los artículos en revistas o periódicos y las memorias de congresos organizados por sociedades técnicas o colegios de ingenieros.

Uno de los aspectos que más contribuyen a la falta de información es la escasez de instrumentos que permitan medir la intensidad, duración y cantidad de lluvia en las diferentes zonas del territorio nacional, así como la ubicación de comunidades o pequeños centros de población en zonas muy apartadas de las grandes ciudades que generalmente cuentan con estaciones hidrometeorológicas. Idealmente, los registros de lluvia que se deberían tener para correlacionar el efecto de ésta y la ocurrencia de deslizamientos, serían aquellos recabados en las mismas zonas de inestabilidad.

Existen instituciones gubernamentales en México que han realizado grandes esfuerzos para construir mapas regionales de igual intensidad de lluvia (mapas de isoyetas), los cuales son una fuente valiosa para tratar de establecer algunas correlaciones entre la ocurrencia de deslizamientos y la cantidad de lluvia que cae en una región para diferentes periodos de retorno. Obviamente, las mejores fuentes de información sobre la intensidad y la cantidad de lluvia que cae en una zona o localidad son las mediciones directas que se pueden tomar en el sitio con instrumentos diseñados para ello.

#### **5.3.3.1c Discusión de la relación lluvia-deslizamientos**

Para determinar los umbrales de lluvia aplicables a una región determinada, se debe contar con información de al menos dos deslizamientos que hayan ocurrido durante el lapso de una lluvia intensa, o durante los días u horas que la tormenta haya permanecido estacionada dentro de la zona por estudiar; con ello es posible asegurar que la lluvia jugó el papel principal para la ocurrencia de dichos deslizamientos. En un estudio realizado en la ciudad de Seattle, EUA, por ejemplo, se han documentado deslizamientos que ocurrieron en intervalos de 72 horas o menos para un mismo frente de lluvia y una misma región. Cabe resaltar que para establecer los umbrales de lluvia acumulada en una zona o región sólo interesan los registros con lluvia continua de los días previos a la ocurrencia de un deslizamiento.

Entre los casos mejor documentados en México se tienen los deslizamientos ocurridos en la Sierra Norte de Puebla, debido a las lluvias intensas que azotaron aquella región los últimos días de septiembre y los primeros de octubre de 1999. En tal ocasión se contabilizaron más de 100

problemas de inestabilidad entre pequeños caídos, derrumbes y francos deslizamientos que afectaron vías de comunicación y cobraron más de cien vidas humanas en zonas urbanas. En esta región se tuvieron deslizamientos prácticamente desde el 30 de septiembre hasta el día 5 de octubre, con intervalos de ocurrencia que oscilaron entre unas horas y menos de 72 horas; concentrándose la mayoría de ellos entre el 3 y el 5 de octubre.

**5.3.3.1d Umbrales para los cuales han ocurrido deslizamientos en algunas regiones de México**

**Caso Teziutlán:** El deslizamiento y flujo de suelos y rocas ocurrido el 5 de octubre de 1999 en la colonia “La Aurora” de la ciudad de Teziutlán, Puebla es uno de los pocos casos documentados en México, para el que se cuenta con registro pluviométrico diario y el conocimiento de las características geotécnicas de los materiales (Mendoza y Noriega, 2000). Se trata en general de rocas volcánicas blandas muy intemperizadas, principalmente tobas y brechas con cementación media, que han dado origen a pequeñas capas inestables de suelos residuales no consolidados, los cuales se reblandecen en contacto con agua. El deslizamiento ocurrió en una ladera de apenas 23° de inclinación y coincidió precisamente con el máximo de la precipitación acumulada para ese temporal. Se generó una superficie de falla poco profunda, generándose un flujo de suelos de aproximadamente 7,500 m³, arrasando las viviendas asentadas en la colina y provocando la muerte de 110 personas, por lo que fue reconocido como el desastre del decenio.

Con información proporcionada por la CNA, se conoció que los registros de precipitación diaria en Teziutlán fueron los que se indican en la figura 5.4a. Las lluvias que cayeron los días 4 y 5 de octubre de 1999 alcanzaron columnas de agua equivalentes a 300 y a 360 mm, respectivamente, contrastando con la media mensual para el mes de octubre en esta región que es de 183 mm. Dos días consecutivos de la semana anterior, se tuvieron precipitaciones diarias de más de 100 mm. Se tiene así, como se muestra en la figura 5.4b, que la precipitación acumulada en el lapso de diez días alcanzó poco más de un metro. Esta columna acumulada de agua en diez días casi representó lo que llueve en esta región en un año, ya que la media anual es de 1,229 mm. Sin duda, debe considerarse que estas precipitaciones extraordinarias se ubican entre las más altas de este siglo, aunque los lugareños reseñan que ya habían sucedido lluvias muy intensas en 1995, al igual que hace algunos decenios, con ocurrencia de pequeños deslizamientos de tierras.

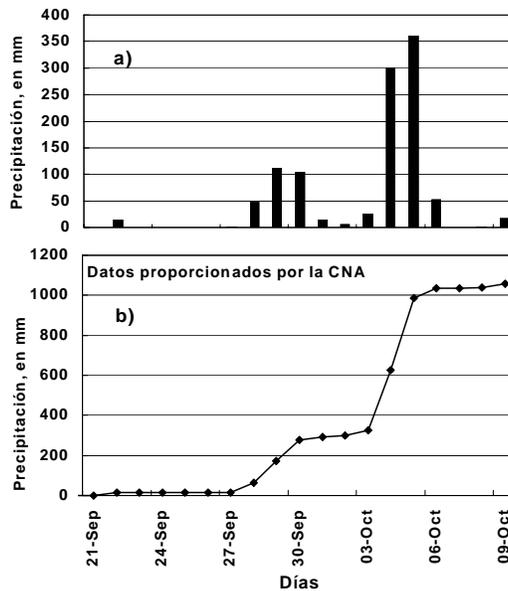


Figura 5.4 Precipitación a) diaria y b) acumulada en Teziutlán, Pue., septiembre-octubre 1999

**Caso Tijuana:** Otro sitio en el que frecuentemente ocurren deslizamientos es la ciudad de Tijuana, B. C., donde la mayor de las veces son disparados por lluvias moderadas, aunque no son extraños los deslizamientos ocasionados por fugas en los sistemas de drenaje y de abastecimiento de agua potable. En general se trata de laderas de poca pendiente (de 20 a 30°) constituidas principalmente por rocas sedimentarias blandas que se disgregan fácilmente en contacto con agua; ejemplos de estos deslizamientos son los ocurridos en las colonias México Lindo, Manuel Paredes e Ignacio Ramírez en febrero de 1998; o bien los de la Colonia Defensores de Baja California de abril de 2002.

De acuerdo con un estudio realizado por García y coautores (1999) en la ciudad de Tijuana, donde la lluvia media anual es de sólo 273 mm, los umbrales críticos para que sucedan inestabilidades son: 45 mm/día ó 16 mm/hora cuando el suelo se encuentra seco antes de la lluvia; o bien, de 35 mm/día ó 12 mm/hora cuando el suelo se encuentra saturado o parcialmente saturado antes de la lluvia.

Como se puede observar, estos umbrales son bastante menores a los de Hong Kong y Teziutlán, lo cual se debe principalmente al tipo de materiales que existen en cada zona y, por lo tanto, al diferente efecto que tienen en presencia de agua. Sin embargo, la información aportada da pautas de comportamiento y órdenes de magnitud de los umbrales de lluvia a partir de los cuales ocurren inestabilidades. Por ejemplo, si consideramos los umbrales de intensidad de lluvia (lluvia horaria) para los cuales han ocurrido deslizamientos en Hong Kong, Teziutlán y Tijuana, y los comparamos con sus valores medios de lluvia anual que cae en cada zona, se tiene que para cada caso los umbrales de intensidad de lluvia para los cuales podrían ocurrir deslizamientos son proporcionales al cociente entre el umbral de lluvia horaria que define inestabilidad de laderas y la precipitación media anual. Para los casos aquí mencionados se encontró que dicho cociente oscila entre 0.03 y 0.04. Obviamente, para cada caso los umbrales de lluvia determinados guardan cierta relación con el tipo de materiales que forman las laderas, y por lo tanto sólo serían aplicables a zonas con semejantes geomateriales.

### **5.3.3.2 Sismos**

Los sismos ocupan un lugar muy importante dentro de las causas naturales o factores externos que activan o disparan la inestabilidad de laderas. De acuerdo con una estadística mundial sobre los 25 deslizamientos más catastróficos ocurridos en el Siglo XX (Schuster, 1996), el 36 por ciento de ellos fueron disparados por acciones sísmicas; sólo 4 por ciento por abajo de las lluvias que son el principal factor detonante de inestabilidad de laderas. Ello muestra la gran importancia que representan los sismos como fuente detonadora de deslizamientos. Un ejemplo reciente de este tipo de eventos es el sucedido en la ladera conocida como “Las Colinas” en Santa Tecla, Nueva San Salvador, El Salvador, Centro América (Mendoza y coautores, 2002). El deslizamiento y flujo masivo de lodo arenolimoso fue disparado por el sismo del 13 de enero de 2001, de magnitud  $M_w = 7.6$  y distancia epicentral de 100 km, soterrando a una urbanización asentada al pie de la ladera, y provocando la muerte de aproximadamente 500 personas. Las fuerzas inerciales debidas al sismo determinaron esta falla de la ladera. Adicionalmente, los suelos volcánicos de la ladera y pie de naturaleza granular y sueltos, acusaron una reducción de resistencia por la generación de alta presión dinámica en el agua de sus poros. Sin embargo, pudo reconocerse que se había propiciado una condición poco favorable para su estabilidad, por una parte por la obstrucción al libre drenaje en la parte baja de la ladera –lo que condujo a su saturación–; y por la otra, por la deforestación de su cima y plataforma.

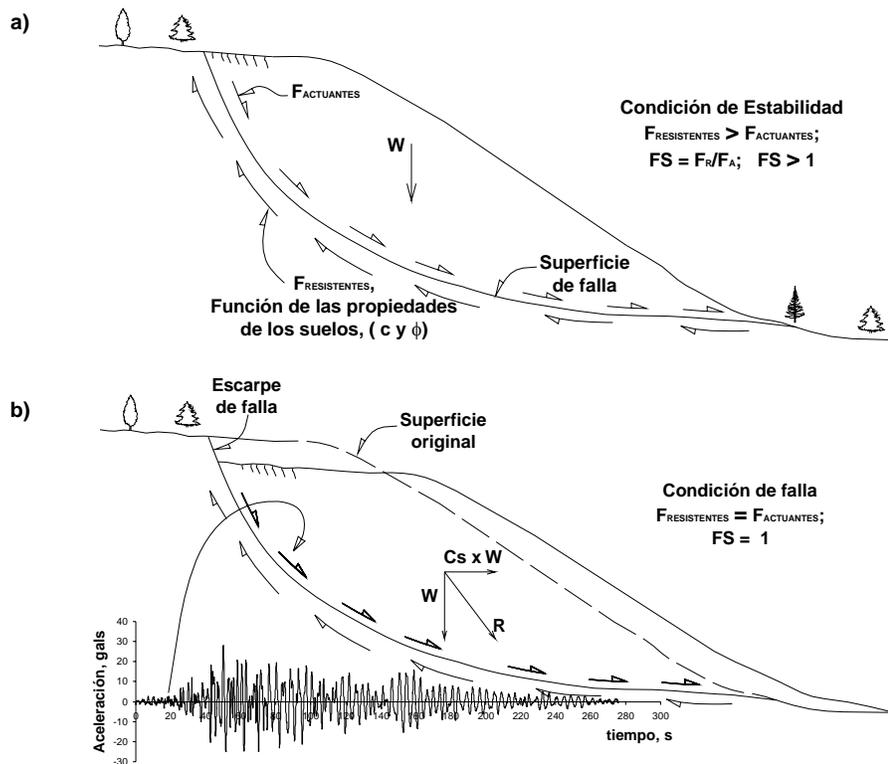
Cuando ocurre un evento sísmico se generan fuerzas inerciales dentro de la ladera, las cuales determinan el aumento de los esfuerzos cortantes actuantes en la potencial superficie de

deslizamiento. Una forma simple de visualizar este efecto es a través del esquema que se muestra en la figura 5.5, donde se representan las fuerzas que actúan a favor del deslizamiento y las fuerzas resistentes del subsuelo que se oponen al mismo.

Diversas actividades humanas pueden propiciar la inestabilidad de una ladera al momento de ocurrir un sismo; tal sucede cuando se modifican las condiciones naturales del entorno, por ejemplo, el aumento de cargas externas y/o la modificación de su geometría por la realización de obras, cortes y terrazas en el cuerpo de la ladera.

El efecto de las acciones sísmicas da como resultado una fuerza horizontal, a favor del deslizamiento, que equivale a una fracción del peso de la masa potencialmente deslizante delimitada por la superficie de falla; y que se calcula como el producto de un coeficiente sísmico ( $c_s$ ) multiplicado por el peso de la masa potencialmente inestable ( $W$ ). Así pues, para que ocurra un deslizamiento durante un sismo, es suficiente que las fuerzas actuantes y resistentes en la potencial superficie de falla se igualen.

Difícilmente puede pensarse en algún sistema de alertamiento dada la ocurrencia casi inmediata de los deslizamientos ocasionados por sismos, a menos que esté a cierta distancia y que no obstante, la impacte. Sólo cabe en los casos en que se distinga como un peligro la presencia de una ladera, en función de la condición de sus materiales y de su geometría, evitar los asentamientos humanos y las obras de infraestructura cerca del pie de la ladera. Deberá mantenerse una distancia prudente libre de edificaciones, o bien, diseñar obras de retención o encauzamiento de los posibles flujos.



**Figura 5.5** Representación esquemática de las fuerzas actuantes y resistentes que se desarrollan en una ladera: a) antes y b) durante un evento sísmico

### **5.3.3.3 Actividad volcánica**

Ante eventos volcánicos debe preverse la posibilidad de flujos o avalanchas de detritos, consistentes en movimientos masivos rápidos de mezclas de suelos y fragmentos de rocas, así como vegetación con aire y agua atrapados, que forman una masa viscosa o francamente fluida que fluye pendiente abajo, y que resulta muy destructiva. También es posible que se desarrolle un lahar, que se origina en el talud de un volcán por el deshielo repentino que provoca la actividad volcánica; o bien, por rotura o desbordamiento de represas de agua.

Un ejemplo dramático de una avalancha de detritos fue la provocada por la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985, estado de Tolimán en Colombia. Cuatro poblados y villas fueron destruidos; el flujo en el valle del río Lagunillas produjo la muerte de más de 20,000 personas en la ciudad de Armero. Se ha mencionado que esta cifra de fallecimientos fue posiblemente muy grande porque los alertamientos del peligro no fueron emitidos a la población; estas experiencias deben conocerse para no caer en situaciones similares de emergencia.

Otro proceso disparado por un volcán fue el deslizamiento de rocas y avalancha de detritos que provocó la erupción del Monte Santa Elena, estado de Washington, EUA en 1980. Ha sido el deslizamiento histórico más grande del mundo (volumen de aproximadamente 2,800 millones de metros cúbicos). A pesar de ese enorme deslizamiento, sólo perdieron la vida entre 5 y 10 personas, gracias a que la población fue alertada y evacuada de la región. El suceso se inició como un deslizamiento de rocas y se convirtió en una avalancha de detritos de 23 km de largo con velocidad media de 125 km/hora.

Estos hechos dejan varias reflexiones; entre ellas, la necesidad de reubicar a los pueblos que se localizan en valles cercanos a volcanes activos, e incluso en cañadas que son claramente los cauces por donde eventualmente fluirían esas avalanchas. Por otra parte, que pueden ser o no catastróficos, dependiendo de si falta o se cuenta, con un monitoreo *ad-hoc* con fines de alertamiento.

### **5.3.3.4 Cargas sobre la ladera**

La aplicación de cargas sobre la ladera, ya sea por la construcción de obras o por la acumulación de materiales, es un factor determinante en los incrementos de los esfuerzos cortantes actuantes en la potencial superficie de falla. El desarrollo de asentamientos humanos en el talud y en la corona de una ladera tiene aspectos negativos en la estabilidad, ya que además del peso que transmiten a la ladera por la construcción de viviendas y las fugas de agua ya mencionados, se realizan cortes y terrazas para la construcción de obras y se agregan cargas accidentales producidas por tránsito de vehículos y por la vibración de maquinaria.

La construcción de edificios pesados muy cerca del hombro de una ladera puede llegar a producir un problema de inestabilidad local, que puede convertirse en un peligro para las construcciones u obras de infraestructura ubicadas talud abajo, con la posibilidad de convertirse en un deslizamiento general de la ladera. En un trabajo realizado por Peck (1967) se mencionan varios casos donde pequeños cambios en las condiciones de estabilidad de antiguos deslizamientos, provocaron un proceso de reactivación de los movimientos y, posteriormente, un deslizamiento general de los materiales.

### 5.3.4 Causas humanas o antrópicas

Existen actividades humanas que agudizan o francamente causan de manera directa la ocurrencia de deslizamientos. Debe reconocerse un hecho bien establecido: bajo condiciones de altura, pendiente y geomateriales similares, una ladera con asentamientos humanos es más susceptible a los deslizamientos que un área rural. Tres son los factores globales de origen antrópico que causan deslizamientos en laderas; ellos son los que se detallan a continuación:

- I. Cambios en el régimen de la presión del agua del subsuelo
  - Concentración de infiltraciones por la rotura de drenajes o de los sistemas de abastecimiento de agua
  - Cambio en el régimen de las aguas superficiales
  - Cambio o incluso impedimento de cauces en cañadas
  - Construcción de vasos o tanques de almacenamiento
  - Infiltraciones por fosas sépticas
  - Impermeabilización para la urbanización, lo que reduce la evaporación e infiltración, y aumenta la escorrentía.
  
- II. Cambio en la topografía de la ladera y la imposición de sobrecargas
  - Aumento del ángulo del talud por la ejecución de cortes
  - Sobrecargas por la construcción de muros de retención, rellenos, casas y edificios
  - Vibraciones provocadas por maquinaria
  - Explosiones para la explotación de canteras, minas y bancos de material
  - Inyección de morteros cerca del talud.
  
- III. Deforestación
  - Tala de bosques
  - Agricultura, pastoreo y quema
  - Modificaciones del uso del suelo.

Debe señalarse que los cambios que se impongan a una ladera no necesariamente provocan su inestabilidad, por lo que la construcción de un muro, la colocación de un relleno o la realización de un corte son actividades que bien pueden ejecutarse, siempre y cuando haya una evaluación geotécnica pertinente. De entre los factores antes citados, se enfatiza que la vegetación en el talud de una ladera y en la plataforma más allá de su corona, juega un rol muy importante en su estabilidad. La deforestación disminuye la succión (presión de poro negativa) y con ello la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, propicia la infiltración masiva y rápida del agua de lluvia, y elimina la acción benéfica de las raíces.

## 5.4 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA PARA IDENTIFICAR EL FENÓMENO DE DESLIZAMIENTOS

### 5.4.1 Incertidumbres y enfoque cualitativo de análisis

La evaluación del fenómeno de deslizamiento de una ladera es típicamente un problema geotécnico, toda vez que la caracterización mecánica del fenómeno es un aspecto para el que la ingeniería geotécnica dispone de diferentes técnicas. La cuantificación tradicional del grado de seguridad ante la posible falla de una ladera, se realiza mediante la determinación del factor de

seguridad, FS, descrito en la sección 5.3.1. Se ha señalado que cuando  $FS = 1$ , la ladera está en una condición de falla inminente; en la medida en que el FS resulta mayor que la unidad, aunque no se conozca de manera explícita, la probabilidad de falla resultará cada vez menor.

Morgenstern (1997) llama la atención sobre el hecho de que los problemas de deslizamientos están dominados por la incertidumbre, tanto en laderas naturales como en taludes artificiales. Las incertidumbres provienen de las diversas etapas en que se afronta el problema, ya que se tienen en la caracterización del sitio y en la determinación de las propiedades de los materiales, así como en el análisis de la estabilidad de la ladera. Insiste en que se han encontrado diversas fallas de laderas que pudieron haberse evitado al recurrir a enfoques orientados a las consideraciones de incertidumbre, y por lo tanto nuevas preguntas se le hacen ahora al ingeniero geotécnico, las que se abordarán en el subcapítulo 5.6, que con el sólo factor de seguridad no se pueden responder.

Dada esta perspectiva, es claro que con mayor frecuencia se tendrá que recurrir en el futuro mediato a métodos probabilísticos, no sólo para evaluar el riesgo y el peligro de deslizamientos, sino incluso el fenómeno; esto es, el análisis probabilístico del factor de seguridad. Debe advertirse que los procedimientos para la cuantificación del FS requieren de medios e información que usualmente no se disponen; en particular, se necesitan conocer los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos o rocas que constituyen la ladera por evaluar. Así mismo, es menester estimar o medir la presión del agua del subsuelo. Los parámetros mencionados se determinan experimentalmente en un laboratorio de Mecánica de Suelos, para lo que se requieren muestras representativas e inalteradas de los materiales.

En la mayoría de los casos no se cuenta con los recursos humanos y materiales, ni el tiempo para llevar a cabo la cuantificación expresa del factor de seguridad, por lo que en primera instancia sólo se opta por una estimación de alcance cualitativo acerca del fenómeno de deslizamiento que podría representar una ladera. Las consideraciones que al respecto se deben adoptar se tratan en el resto de esta sección, poniendo énfasis en el reconocimiento e investigación de las condiciones geotécnicas y geomorfológicas del sitio de interés.

De acuerdo con experiencias en el tema de la evaluación del riesgo por inestabilidad de laderas que se practican en otros sitios del mundo como Japón, Hong Kong y Estados Unidos de América, la identificación de los atributos geotécnicos, geológicos y topográficos permite hacer una estimación cualitativa del peligro de un deslizamiento. Así, la distinción de los rasgos geotécnicos, geológicos y geomorfológicos que indican la posibilidad de un deslizamiento, pueden agruparse en una tabla o formato de evaluación de campo asignándoles valores numéricos cuya magnitud indique el grado del peligro o posibilidad de deslizamiento de una ladera. Para la aplicación de estos procedimientos se agrupan o jerarquizan cada uno de los rubros por evaluar, siendo la suma de todos ellos el valor final que proporcione el grado del peligro de un potencial deslizamiento de laderas.

Se llama la atención, sin embargo, que los valores que se asignan a cada rubro tienen un sustento empírico, por lo que se deben ir ajustando regionalmente para involucrar las experiencias que se hayan tenido en el pasado reciente o las que se vayan generando. Esto es, que en cada caso en que se desee utilizar esta metodología, deberá considerarse como uno más dentro del contexto de la información global disponible para esa zona o región. Así, las calificaciones asignadas a los diversos rubros y a los umbrales considerados en los diferentes peligros, deberán revisarse y ajustarse a la luz de las experiencias históricas del comportamiento de las laderas de una región. El desarrollo de metodologías para la evaluación del riesgo de laderas, requiere del estudio y de la documentación de casos historia que sirvan como sustento técnico para generar una base de datos confiable, con la cual se puedan reafirmar y recalibrar las metodologías propuestas.

En el subcapítulo 5.5 de este documento se incluye un formato de evaluación que toma en cuenta cada uno de los aspectos que se describen y explican en este subcapítulo. Con este fin, se han propuesto valores que toman en cuenta la importancia o peso relativo que cada uno de los rubros tiene en la inestabilidad de laderas. En cada caso se explican los alcances y las limitaciones de las evaluaciones, a fin de que sean tomadas en cuenta para los casos particulares que se analicen. Por lo antes señalado, los valores asignados son meramente indicativos y no deberán adoptarse sin antes considerar las experiencias de una localidad o región. De aquí que un aspecto muy importante que contribuye a la evaluación del fenómeno de deslizamiento de laderas en una localidad, región o ciudad, es la investigación de la historia de desastres ocurridos y la realización de recorridos de campo para identificar vestigios de antiguos deslizamientos. Debido a que en muchas ocasiones estos reconocimientos requieren de la inspección de áreas extensas es necesario acudir al apoyo de técnicos especializados, y recurrir al uso de fotografías aéreas, mapas topográficos, mapas de localización y cartas geológicas como material de auxilio. Cada uno de estos aspectos se discuten en los siguientes apartados de este subcapítulo.

#### **5.4.2 Investigación de la historia de desastres y reconocimiento de campo**

La recopilación de documentos o informes sobre deslizamientos ocurridos en el pasado son de gran ayuda ya que proveen información sobre las causas y consecuencias de los deslizamientos. Con esta información es posible reconstruir la relación entre los factores internos y las posibles causas naturales, o factores externos, que dispararon los deslizamientos. Ello permitirá tomar en cuenta dichos factores para la determinación de posibles áreas de deslizamientos en el futuro. La recopilación de información es valiosa, toda vez que permite la creación de un inventario que puede ser organizado por: localización del fenómeno, fecha de ocurrencia, tipo y extensión del deslizamiento, intensidad de lluvia o magnitud del sismo, etc. La información en hemerotecas, y de manera destacada la que provean de primera mano los habitantes de una localidad, será muy valiosa para la estimación del peligro.

Como una fuente y punto inicial de información muy valiosa deben citarse las cartas topográficas y geológicas con escala de 1:50,000 que dispone el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI, de todo el territorio nacional. La sobre posición de esta información proporciona elementos que conjugan los factores internos principales condicionantes de la estabilidad de una ladera; estos son, por una parte las alturas y pendientes de las laderas, y por la otra los geomateriales que constituyen las laderas, así como las discontinuidades que presentan. Debe sin embargo considerarse que la descripción geológica no es suficiente, por lo que más adelante se presentan algunas ideas de los atributos geotécnicos que deben investigarse.

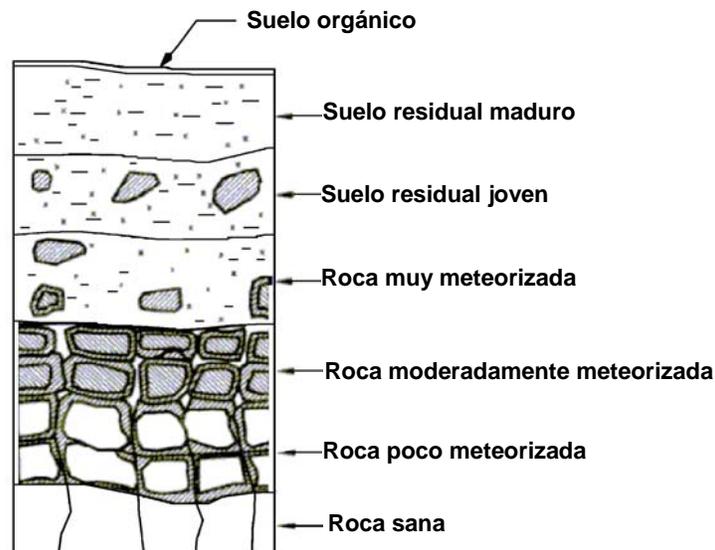
El uso de planos topográficos recientes permite observar la forma de la superficie del terreno identificando los accidentes topográficos, o posibles movimientos de tierra ocasionados por acciones humanas o por causas naturales. De esta manera es posible identificar los aspectos geomorfológicos de la zona de estudio y sus condiciones de drenaje, lo cual da una idea del tipo de materiales que se pueden encontrar en el sitio; se recomienda que los mapas topográficos sean de una escala entre 1:2,000 y 1:10,000. Por otra parte, las fotografías aéreas siempre serán valiosas para identificar casi puntualmente la existencia de antiguos deslizamientos y las zonas susceptibles a dicho problema. Por ello será deseable contar con mosaicos de fotografías aéreas, las que vistas con estereoscopio, proporcionan una visión tridimensional con la que pueden juzgarse zonas propensas al deslizamiento. El desarrollo de nuevos asentamientos humanos y los cambios geomorfológicos de una zona son fáciles de identificar con estos medios.

### 5.4.3 Rasgos geológicos y geomorfológicos que propician inestabilidades

La inestabilidad de laderas en nuestro país ocurre con gran frecuencia en suelos residuales y durante periodos de lluvias intensas. Los suelos residuales son aquellos materiales producto de la descomposición química de las rocas, resultado del intemperismo provocado por el clima; se trata de geomateriales no transportados, disgregables o de consistencia blanda que se mantienen en el mismo sitio en que fueron modificados a partir de la roca original. Con frecuencia exhiben incluso la misma apariencia que la roca original. Amplias zonas del territorio nacional están cubiertas con suelos residuales, destacando las localizadas en la vertiente del Golfo de México y en las porciones sureste y sur de la vertiente del Pacífico; en ellas pueden distinguirse estos suelos de colores rojizos.

El grado de alteración y la extensión a la que la estructura original de la masa de roca se destruye o meteoriza varía con la profundidad. Se da lugar así a perfiles de alteración que comprenden materiales con propiedades mecánicas muy diferentes (fig. 5.6) desde aquéllas propias de la roca franca que se encuentra a profundidad, hasta las de suelo completamente intemperizado o alterado, o simplemente residual, que se observa en la superficie del terreno. No es de extrañarse entonces, que con frecuencia las superficies de deslizamiento en materiales residuales se ubiquen relativamente cerca y paralelas a la superficie del terreno, como ocurrió en el deslizamiento de Teziutlán, Puebla.

Las características principales de los materiales residuales son: a) usualmente muy heterogéneos, lo que los hace difíciles de muestrear y ensayar; b) se encuentran casi siempre en una condición no saturada, esto es que sus poros contienen no sólo agua sino también aire; y c) invariablemente tienen altas permeabilidades, lo que determina que sus propiedades sean particularmente sensibles y de una respuesta muy rápida a las influencias hidráulicas externas. Sin embargo, debe advertirse que los deslizamientos no sólo ocurren en suelos residuales, sino que incluso suceden en formaciones rocosas, como resultado de una variedad de causas, por lo que en el campo deberán distinguirse las características indicadas en la tabla 5.3, que son síntomas de inestabilidad de laderas.



**Figura 5.6 Perfil de alteración de un suelo residual y de la roca basal**

**Tabla 5.3 Identificación de rasgos característicos que indican la posibilidad de un deslizamiento**

Rasgos característicos	Interpretación
Salientes, hendiduras y agrietamientos en la parte alta (corona) de una ladera.	Son causados por deslizamientos previos, o son signo de deslizamientos futuros.
Taludes con una superficie empinada o irregular.	Atestiguan los remanentes de depósitos de un deslizamiento ocurrido en el pasado; éstos tienen un potencial alto para convertirse en un flujo o avalancha.
Depresiones en cualquier zona de una ladera.	Generalmente están cubiertas por acumulaciones de suelos colectando agua superficial. En la corona de una ladera, las depresiones dibujan el contorno de una posible escarpa de falla.
Taludes con filtraciones de agua.	Éstas pueden estar influenciadas por agua proveniente del interior de la ladera, incluso resultado de fenómenos tales como tubificación y erosión interna.
Taludes con bloques rocosos o muchos cantos rodados.	Ante pendientes fuertes y con echados favorables, tienen un alto potencial para generar caídos de roca.
Presencia o ausencia de vegetación.	Los cambios bruscos de vegetación pueden estar asociados a la presencia o ausencia de agua en la ladera, la que influye en las propiedades mecánicas del terreno; o bien, una discontinuidad tal como una grieta o falla que favorezca una inestabilidad.
La inclinación de árboles o cercas (en el sentido del movimiento) ubicadas en el cuerpo de una ladera.	Indican un movimiento pendiente abajo de un espesor de materiales propensos a la falla; usualmente estos movimientos son lentos.
Agrietamientos en banquetas, muros y pisos de zonas urbanas desarrolladas en cañadas, cerros o montañas.	Indican el movimiento y la posibilidad de falla de una ladera, la cual puede ser acelerada por las fugas en los sistemas de drenaje y de abastecimiento de agua.

#### 5.4.4 Reconocimiento de campo

Los reconocimientos de campo consisten en verificar o modificar la información recopilada en los análisis de gabinete, identificar la ubicación de nuevos sitios con problemas de inestabilidad, verificar la magnitud del problema, identificar los estudios de campo por realizar de acuerdo con el tipo de materiales, y establecer los sitios donde se realizarán dichos estudios. Así mismo, se busca identificar los tipos de suelos y rocas de la zona, las estructuras geológicas de la región, los planos de discontinuidades o contacto y sus echados, la disposición estratigráfica de materiales, el grado de alteración de los suelos y rocas, y detectar la presencia de flujos de agua en cualquier parte de la ladera.

Hay dos componentes principales en la investigación geotécnica de una ladera; éstos son los estudios de su superficie y los del subsuelo. Los reconocimientos superficiales deben constituir la primera fase de las investigaciones del sitio; los estudios del subsuelo deberán planearse, de ser necesarios, sólo después de concluir esa primera fase; estas tareas las llevan a cabo las personas señaladas en la tabla 5.4 El examen de las características superficiales puede separarse en dos etapas: los estudios de gabinete y de campo. Los primeros deberán llevarse a cabo antes de los estudios detallados de campo, pero el ingeniero a cargo deberá visitar el sitio durante la fase inicial de la investigación. La planeación de los estudios de campo deberá basarse en los resultados de los estudios de gabinete, poniendo énfasis en las áreas con problemas potenciales de estabilidad.

Los requerimientos generales para la investigación del sitio con miras a juzgar la estabilidad de una ladera, incluyendo los posibles casos de construcción en la misma, se reúnen en la tabla 5.4, propuesta por las autoridades geotécnicas de Hong Kong (Geotechnical Control Office, 1984). Esta tabla relaciona la altura del talud, su ángulo y la categoría del riesgo del sitio, a las investigaciones geotécnicas necesarias, así como al señalamiento de cuándo es necesario recurrir a la asesoría de un ingeniero especialista. Para juzgar el nivel de riesgo para la vida o riesgo económico que debe considerarse en la tabla 5.4, se reúnen criterios al respecto en las tablas 5.5 y 5.6.

Otros aspectos que son muy importantes de identificar durante los reconocimientos de campo son la localización de rasgos geomorfológicos que indiquen la ocurrencia de antiguos deslizamientos en la zona. Para ello, se deberán observar huecos en forma de concha o de embudo, los cuales indican la ausencia de masas de suelos o rocas, como resultado del “vaciado” de un deslizamiento antiguo. Así mismo, la presencia de escalones, escarpas o hendiduras cerca de la corona de una ladera señalan el probable inicio de un deslizamiento o la reactivación de uno antiguo.

**Tabla 5.4 Guía para la investigación geotécnica del sitio**

Categoría del riesgo		Calificación de la ladera				Ángulo de la ladera natural en la vecindad del sitio		
Categoría	a). Pérdida de vida	Características	Suelo		Roca	0° a 20°	20° a 40°	Más de 40°
	b). Pérdida económica		Relleno	Corte		Descripción de la investigación del sitio		
Despreciable	a). Ninguna esperada (premisa de no ocupado).	Altura	<7.5 m	<5 m	<7.5 m	Estimación de la geología y topografía del entorno como indicativo de estabilidad. Examen visual del suelo y roca que forman el sitio.  <i>Requerimiento A de soporte técnico.</i>	Como para 0° a 20° Reconocimiento geológico y topográfico más detallado. Para las laderas más escarpadas, información sobre parámetros de resistencia del suelo o de las juntas en roca. Reconocimiento de características hidrológicas que afecten el sitio.  <i>Requerimiento B de soporte técnico.</i>	Como para 20° a 40°. El área fuera de los confines del sitio será examinada por inestabilidades de suelos, rocas y boleos sobre el sitio.  <i>Requerimiento B de soporte técnico.</i>
	b). Mínimo daño estructural. Pérdida de acceso a caminos menores.	Ángulo	< 50°	< 30°				
Baja	a). Pocos (sólo pocas personas amenazadas).	Altura	<15m	< 10 m	>7.5m	Reconocimiento geológico y topográfico del sitio y área circunvecina. Parámetros de resistencia de suelos y juntas de rocas para cimentaciones y cortes de taludes. Para terraplenes más escarpados de 1:3, parámetros del relleno compactado. Para cortes, información del nivel freático.  <i>Requerimiento B de soporte técnico.</i>	Como para 0° a 20°. Reconocimiento de las características hidrológicas que afecten el sitio.  <i>Requerimiento B de soporte técnico.</i>	Como para 20° a 40°. Extender fuera de los límites del sitio, para permitir el análisis de los taludes arriba y abajo del sitio.  <i>Requerimiento C de soporte técnico.</i>
	b). Daño estructural apreciable. Pérdida de acceso a sólo caminos de acceso.	Ángulo	< 60°	< 30°				

Continúa

Tabla 5.4 Guía para la investigación geotécnica del sitio

Categoría del riesgo		Calificación de la ladera				Ángulo de la ladera natural en la vecindad del sitio		
Categoría	a). Pérdida de vida	Características	Suelo		Roca	0° a 20°	20° a 40°	Más de 40°
	b). Pérdida económica		Relleno	Corte		Descripción de la investigación del sitio		
Alta	a). Más de unas cuantas.	Altura	> 15m	>10m	>15m	Reconocimiento geológico y topográfico detallado del sitio y área circunvecina. Parámetros de resistencia de suelos y juntas de rocas para cimentaciones y cortes del talud. Para rellenos, parámetros de resistencia del material compactado. Para cortes, información del nivel freático.	Como para 0° a 20°. Reconocimiento de las características hidrológicas que afecten el sitio. Investigación extendida fuera de los límites del sitio, a fin de permitir el análisis de taludes arriba y abajo del sitio.	Como para 20° a 40°. Reconocimiento extendido más ampliamente fuera de los límites del sitio, para permitir el análisis de estabilidad de los taludes arriba y abajo del sitio.
	b). Daño estructural excesivo a casas y edificios habitacionales e instalaciones industriales	Ángulo	> 60°	> 30°	--			

NOTAS:

- Esta tabla sólo tiene como intención servir como una guía de lo procedente. Cada situación debe ser valorada por lo que se refiere a sus condiciones y peculiaridades para decidir si son necesarios, o no, los procedimientos de investigación recomendados, o si situaciones particulares requieren incluso investigaciones o exploraciones más detalladas.
- Mientras lo anterior da una indicación de los requerimientos para la investigación geotécnica bajo ciertas condiciones generales, deben consultarse manuales geotécnicos para encontrar la información más precisa acerca de cómo se pueden cumplir los requerimientos anteriores.
- Para laderas en las que haya fragmentos rocosos o boleos inestables, los servicios de un ingeniero geotécnico experimentado o ingeniero geólogo serán siempre necesarios.
- Las categorías de riesgo deben ser estimadas con referencia tanto a los usos actuales como al potencial desarrollo futuro del área.
- La clasificación de la ladera debe basarse ya sea en su altura o ángulo, cualquiera que dé la categoría más alta de riesgo.
- Requerimientos para la asesoría de un especialista:
  - No son necesarios los servicios de un ingeniero geotécnico experimentado o de un ingeniero geólogo.
  - Los servicios de un ingeniero geotécnico experimentado o de un ingeniero geólogo dependen de la posición relativa del sitio de interés o del sitio por desarrollar.
  - Los servicios de un ingeniero geotécnico experimentado o de un ingeniero geólogo son esenciales.

**Tabla 5.5 Ejemplos típicos de fallas de laderas en cada categoría de riesgo para la vida**

Ejemplo	Riesgo para la vida		
	Despreciable	Bajo	Alto
1. Las fallas afectan parques y áreas de recreación al aire libre poco frecuentadas.	✓		
2. Las fallas afectan caminos con baja densidad de tráfico.	✓		
3. Las fallas afectan bodegas que almacenan productos no peligrosos.	✓		
4. Las fallas afectan espacios abiertos densamente frecuentados (p. ej. áreas recreacionales, plazoleta de una localidad, estacionamientos, etc.).		✓	
5. Las fallas afectan caminos con alta densidad de tráfico		✓	
6. Las fallas afectan áreas de espera pública (por ej. andenes, paradas de autobuses).		✓	
7. Las fallas afectan edificios ocupados (p. ej. residenciales, educativos, comerciales o industriales).			✓
8. Las fallas afectan edificios que almacenan productos peligrosos.			✓

**Tabla 5.6 Ejemplos típicos de fallas de laderas en cada categoría de riesgo económico**

Ejemplo	Riesgo económico		
	Despreciable	Bajo	Alto
1. Fallas que afecten terrenos baldíos o sin cultivos.	✓		
2. Fallas que afecten a terrenos de labranza y a caminos locales que no sean de acceso único.	✓		
3. Fallas que afecten estacionamiento de vehículos al aire libre.	✓		
4. Fallas que afecten caminos primarios distribuidores, y que no sean de acceso único.		✓	
5. Fallas que afecten los servicios esenciales, las que podrían causar la pérdida de ese servicio por un período temporal (p. ej. subestaciones eléctricas, plantas para bombeo de agua y gas).		✓	
6. Fallas que afectan caminos troncales rurales o urbanos, de importancia estratégica.			✓
7. Fallas que afecten los servicios esenciales, las que podrían provocar la pérdida de ese servicio por un tiempo prolongado.			✓
8. Fallas que afecten edificios, las que podrían causar daños estructurales excesivos.			✓

Nota: Estos ejemplos son únicamente para guía. Quien o quienes tomen decisiones, deben decidir el grado de riesgo económico y debe balancear el riesgo económico potencial ante el evento de una falla, contra los mayores costos de construcción requeridos para alcanzar un factor de seguridad más alto.

Es importante enfatizar que la inclinación y la altura de una ladera no son los únicos factores que determinan si una ladera es peligrosa. El tipo de materiales y su grado de alteración juegan roles decisivos en ello. Se conocen casos en los que se pasó por alto lo anterior, juzgándose un peligro mayor en una ladera muy escarpada en rocas suaves poco alteradas, que otra ladera más tendida pero en suelos arcillosos de baja consistencia; esta última falló, y lo antes señalado condujo a decisiones equivocadas.

## 5.5 CRITERIOS PARA ESTIMAR EL PELIGRO DE DESLIZAMIENTOS

### 5.5.1 Un criterio simple para identificar la amenaza de deslizamiento

A reserva de abordar la estimación del peligro de deslizamiento de manera más formal, se exponen en la tabla 5.7 unos primeros criterios que permiten establecer el grado de amenaza al deslizamiento, que podrían ofrecer diversos tipos de laderas. En lo que resta de esta sección, se distinguen con mayor detalle cada uno de los factores que influyen en el problema, asignándoles una calificación relativa a cada uno de ellos.

**Tabla 5.7 Grados de amenaza en laderas**

Amenaza	Tipo de ladera
Muy alta	Laderas con agrietamientos, escarpas o salientes. Suelos muy alterados (véase la fig. 5.6), sueltos y / o saturados. Presencia de discontinuidades desfavorables. Antecedentes de deslizamientos en el área o sitio. Ladera deforestada.
Alta	Laderas que exhiben zonas de falla. Meteorización de moderada a alta. Posee discontinuidades desfavorables, donde han ocurrido deslizamientos. Ladera deforestada.
Moderada	Laderas con algunas zonas de fallas. Formaciones rocosas con alteración y agrietamientos moderados. Sin antecedentes de deslizamientos en el sitio o región.
Baja	Laderas en formaciones rocosas con alteración de baja a moderada. Planos de discontinuidades pocos favorables al deslizamiento. Ladera sin deforestación. Capa de suelos compactos de poco espesor.
Muy baja	Laderas en formaciones rocosas no alteradas, poco agrietadas o fisuradas. Sin planos de discontinuidad que favorezcan el deslizamiento. Ladera sin deforestación

### 5.5.2 Proceso para la estimación del peligro y del riesgo

En la tarea de estimar el riesgo por deslizamiento y tomar medidas para reducirlo participan dos grupos de personas: los analistas o consultores geotécnicos o geológicos, quienes definen la amenaza y el peligro, y los que toman decisiones (Protección Civil, dueños, administradores y políticos) quienes implementan las acciones relativas a la administración del riesgo. Con frecuencia se tienen problemas de comunicación entre estos dos grupos, como resultado de su diferente base de conocimientos y profesión, así como por su particular enfoque y perspectiva. Usualmente cada grupo percibe de manera diferente los beneficios potenciales y las responsabilidades dentro de un estudio de riesgos. Tradicionalmente, la práctica de estimar el peligro y el riesgo por deslizamientos recae en el grupo de profesionales de ciencias de la tierra, quienes cargan no sólo con su responsabilidad, sino con la de otros, que deberían fomar parte en la toma de decisiones. Tal procedimiento convencional se realiza con los pasos que se enlistan en la tabla 5.8.

**Tabla 5.8 Procedimiento para estimar la amenaza y el riesgo por deslizamiento, según la UNESCO (Fell, 1994)**

Paso	Acción
1	Reconocimiento de la amenaza (p. ej., hay posibilidad de deslizamientos de ciertos tipos)
2	Estimación de magnitudes (volúmenes)
3	Estimación de las probabilidades de ocurrencia correspondientes
4	Determinación de los elementos en riesgo
5	Estimación de vulnerabilidades
6	Cálculo de riesgos específicos
7	Cálculo del riesgo total
8	Estimación de la aceptabilidad del riesgo
9	Mitigación del riesgo (si es necesario)

Hungr (1997) distingue que existen casos en los que el consultor geotécnico solo, no puede completar el proceso más allá del paso 3, distinguiendo que es necesario el concurso de otras partes; tales casos ocurren para a) estudios de planeación donde los elementos en riesgo son todavía desconocidos; b) casos donde la estimación de la vulnerabilidad de estructuras existentes requiere conocimientos especializados (por ejemplo, tuberías); y c) estudios preliminares, detallados de manera insuficiente como para permitir la estimación cuantitativa del riesgo. Sin embargo, se reconoce que una vez que se ha definido e incluso mapeado la intensidad en el área de estudio, la derivación subsecuente de vulnerabilidades y riesgos requiere poco conocimiento geocientífico especializado. Estos enfoques encuentran cierto paralelismo con la tarea de un sismólogo, cuyo trabajo concluye en gran medida con la predicción de la intensidad de un sismo; los análisis adicionales y subsecuentes de daños potenciales, los realizan otros profesionales.

Con base en estas ideas, Hungr (1997) propone una modificación al procedimiento convencional que se detalló en la tabla 5.8, por el que presenta en la tabla 5.9, el cual incluye dos etapas. De esta manera, la primera etapa que comprende la identificación del fenómeno y la estimación del peligro, es hecha totalmente por un consultor en geociencias, y es su responsabilidad. Tal estimación depende de las condiciones del sitio y de procesos naturales; mismos que se han descrito en las secciones previas, y que son ajenos a la presencia de posibles elementos en riesgo. Como conclusión de estas actividades debería liberarse un reporte que incluiría un mapa de distribución de intensidades potenciales, y una tabla de probabilidades asociadas. En esta guía metodológica se ha adoptado el enfoque de Hungr, presentando entonces en esta sección los elementos necesarios para llevar a cabo los pasos 1 a 6 de la tabla 5.9, que corresponden a la estimación de el peligro. La descripción de las actividades que implica los pasos 7 a 12 para estimar el riesgo, se aborda en la sección siguiente.

**Tabla 5.9 Procedimientos para estimar el peligro y el riesgo por deslizamiento de laderas, usando el concepto de intensidad del peligro, según Hungr (1997)**

Acción	
<b>Paso</b>	<b>Etapas 1. Estimación del peligro</b>
1	Reconocimiento del fenómeno o amenaza (por ejemplo, hay posibilidad de deslizamientos de ciertos tipos)
2	Estimación de magnitudes (volúmenes)
3	Estimación de las probabilidades de ocurrencia correspondientes
4	Estimación de la distribución de la intensidad del peligro
5	Estimación de las probabilidades relacionadas con la intensidad
6	Reporte de la estimación del peligro
<b>Etapas 2. Estimación del riesgo</b>	
7	Determinación de los elementos en riesgo
8	Estimación de vulnerabilidades
9	Cálculo de riesgos específicos
10	Cálculo del riesgo total
11	Estimación de la aceptabilidad del riesgo
12	Mitigación del riesgo (si es necesario)

### 5.5.3 Estimación de atributos geotécnicos, topográficos y ambientales

A fin de estimar el peligro que puede representar el deslizamiento de una ladera, es necesario investigar las condiciones del sitio distinguiendo: a) los deslizamientos que hayan ocurrido en la zona; b) las peculiaridades topográficas y geomorfológicas; c) las características geotécnicas de los materiales; y d) las condiciones ambientales.

Ya se ha señalado que el análisis tradicional de la estabilidad de una ladera se realiza con la cuantificación del factor de seguridad. Ello exige la determinación de propiedades de resistencia de los suelos o rocas, lo que sólo en contadas ocasiones es posible realizar, ya que la mayoría de las veces que Protección Civil interviene en estos menesteres, es porque se ha iniciado ya la inestabilidad. Usualmente, las condiciones imperantes exigen la toma de decisiones a corto plazo para establecer incluso un posible desalojo, a fin de proteger la vida, salud y patrimonio de las personas; de aquí que se requiera un procedimiento, aunque sencillo, suficientemente sólido y sistemático para fundamentar decisiones.

Así pues, se plantean en la tabla 5.10 de esta guía algunos criterios para asignar calificaciones a los atributos que determinan la estabilidad de una ladera. Se trata de una metodología de naturaleza cualitativa y empírica para juzgar la susceptibilidad al deslizamiento, y con ello el peligro de deslizamiento en una ladera; es una versión modificada y ampliada de los criterios y calificaciones citados por Suárez (1998). Los valores que aquí se incluyen son meramente indicativos y deberán revisarse caso a caso, ajustándolos dentro de un contexto regional. Se califica así el grado de influencia relativa que los factores citados tienen en la ocurrencia de un deslizamiento, y podrán adoptarse valores intermedios a los señalados. Es claro que la asignación de valores a cada rubro requiere el concurso preferentemente de un ingeniero civil con especialidad en geotecnia.

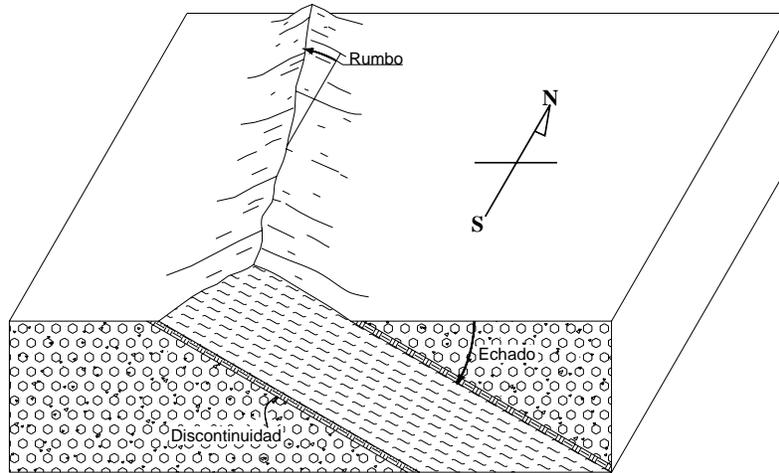
**Tabla 5.10 Formato para la estimación de el peligro de deslizamiento de laderas**

FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS				
Factor	Intervalos o categorías	Atributo relativo	Observaciones	Calificación
Inclinación de los taludes	Más de 45°	2.0	Estimar el valor medio. Úsese clinómetro.	
	35° a 45°	1.8		
	25° a 35°	1.4		
	15° a 25°	1.0		
	Menos de 15°	0.5		
Altura	Menos de 50 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Úsense nivelaciones, planos o cartas topográficas. Niveles dudosos con GPS.	
	50 a 100 m	1.2		
	100 a 200 m	1.6		
	Más de 200 m	2.0		
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños.	
	Algunos someros	0.4		
	Sí, incluso con fechas	0.6		

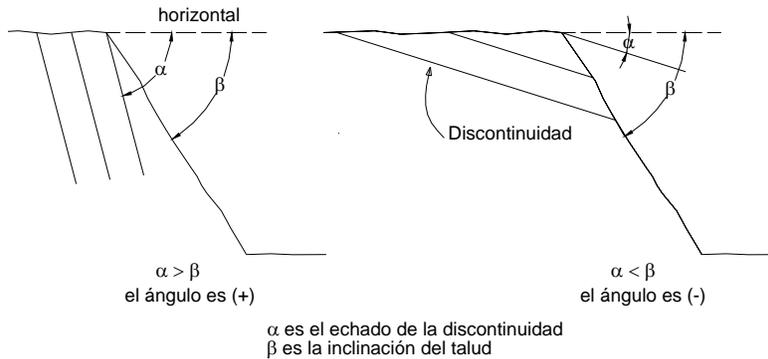
*Continúa*

Tabla 5.10 Continuation. Formato para la estimación del peligro de deslizamiento de laderas

FACTORES GEOTÉCNICOS					
Factor	Intervalos o categorías		Atributo relativo	Observaciones	Calificación
Tipo de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas.		1.5 a 2.5	Vulnerables a la erosión; o suelos de consistencia blanda.	
	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas.		1.2 a 2.0		
	Suelos arcillosos consistentes o arena limosos compactos.		0.5 a 1.0	Multiplicar por 1.3 si está agrietado.	
	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.) y tobos competentes.		0.3 a 0.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5, según el grado de meteorización.	
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc.).		0.2 a 0.4	Multiplicar por 2 a 4 según el grado de meteorización.	
	Espesor de la capa de suelo.	Menos de 5 m	0.5	Revisense cortes y cañadas; o bien, recúrrase a exploración manual.	
5 a 10 m		1.0			
10 a 15 m		1.4			
15 a 20 m		1.8			
Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Echado de la discontinuidad.	Menos de 15°	0.3	Considérense planos de contacto entre formaciones, grietas, juntas y planos de debilidad. Ver figura 5.7.	
		25 a 35°	0.6		
		Más de 45°	0.9		
	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud.	Más de 10	0.3	Ángulo diferencial positivo si el echado es mayor que la inclinación del talud. Ver figura 5.8.	
		0° a 10°	0.5		
		0°	0.7		
		0° a -10°	0.8		
	Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud.	Más de 30°	0.2	Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas.	
		10° a 20°	0.3		
		Menos de 5°	0.5		
FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES					
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas contiguas	Inexistentes		0.0	Formas de conchas o de embudo (flujos).	
	Volúmenes moderados		0.5		
	Grandes volúmenes faltantes		1.0		
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana		2.0	Considérense no sólo la ladera, sino también la plataforma en la cima.	
	Cultivos anuales		1.5		
	Vegetación intensa		0.0		
	Rocas con raíces de arbustos en sus fracturas		2.0		
	Vegetación moderada		0.8		
Área deforestada		2.0			
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático superficial		1.0	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud.	
	Nivel freático inexistente		0.0		
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma		1.0		
SUMATORIA					



**Figura 5.7 Rumbo y echado de una formación geológica**



**Figura 5.8 Relación entre el echado de discontinuidades y la inclinación de la ladera**

#### 5.5.4 Estimación del peligro de deslizamiento de una ladera

Calificados los diferentes factores que influyen en la estabilidad de una ladera, podrá hacerse su sumatoria, a fin de estimar el peligro de deslizamiento que pudiese adjudicársele a una ladera. En la tabla 5.11 se distinguen cinco niveles de peligro, desde el muy bajo hasta el muy alto.

Esta metodología podría ser la base para la generación del mapeo regional de peligros, zonificando las áreas del terreno con igual o semejante potencial de inestabilidad, en combinación con un sistema de información geográfica (SIG). Estos mapas de peligro están fuera del alcance de esta guía. Sin embargo, el procedimiento antes descrito sería prácticamente invariante de la escala en que se aplique; esto es, que tanto se puede aplicar para una ladera específica de cierta dimensión; o bien, a escala de una ciudad, municipio o región, haciendo uso de mapas topográficos y geológicos de un SIG. Atendiendo a la escala correspondiente de planos o mapas topográficos, y tomando en cuenta lo hasta aquí tratado, deberá estimarse el volumen potencial de un deslizamiento, a fin de cumplir con el paso 2 indicado en la tabla 5.9.

**Tabla 5.11 Estimación del peligro de deslizamiento**

Grado	Descripción	Suma de las calificaciones
1	Peligro muy bajo	Menos de 5
2	Peligro bajo	5 a 7
3	Peligro moderado	7 a 8.5
4	Peligro alto	8.5 a 10
5	Peligro muy alto	Más de 10

### 5.5.5 Velocidad y distancia de recorrido

Los daños que puede causar una inestabilidad de ladera no se concentran en la zona de falla o separación, sino que en muchas ocasiones éstos se propagan en una zona más amplia pendiente abajo, o incluso pendiente arriba tratándose de deslizamientos retrógrados; por ello, la correcta evaluación de las áreas en riesgo presupone la determinación de esas zonas de impacto o recepción. Debe reconocerse la dificultad para llevar a cabo esta tarea, debido a la complejidad del fenómeno involucrado y por el costo de los estudios sistematizados de las posibles trayectorias y sus escenarios. En efecto, la dificultad estriba en modelar la propagación de grandes masas, puesto que las leyes de su comportamiento varían con el tiempo; pueden cambiar de un comportamiento de un sólido a uno viscoso, entre el inicio y el fin de la propagación.

El estado actual del conocimiento (IUGS, 1997) para el análisis de los mecanismos de distancia de recorrido y velocidad varían considerablemente, dependiendo del tipo de inestabilidad. En un sentido general, pueden establecerse los siguientes hechos:

- Caídos y volcamientos: Se cuenta con métodos relativamente sofisticados, en los que las fases iniciales del movimiento están mejor modeladas que las etapas posteriores.
- Deslizamientos: Los modelos son pobres para después de que se inicia el movimiento. Es deseable poder estimar los movimientos diferenciales y la velocidad de su evolución.
- Flujos: Existen modelos del mecanismo, pero se tienen serias limitaciones debido a la dificultad de estimar parámetros de entrada, y a que varían las propiedades en diferentes porciones del flujo; por ejemplo, un flujo de detritos puede tener una parte frontal constituida por grandes boleos e incluso árboles, una masa principal de gravas, arenas y limo, y una capa en la base de suelo fino con alto contenido de agua. Las propiedades y el volumen del material se alteran frecuentemente durante el evento.

Es claro que cuanto mayor sea la velocidad de movimiento de un deslizamiento o flujo, su poder destructivo es mayor; en la tabla 5.12 se incluyen valores y términos que se adoptan para denotar la velocidad, y se asocian a su posible destructividad.

En la definición de estas velocidades, juega un papel relevante el monitoreo a través del tiempo, de la magnitud de los movimientos en grietas y otras manifestaciones, principalmente en las etapas tempranas de la inestabilidad. En otra publicación del CENAPRED (Mendoza y coautores, 2002) se reúnen los elementos y técnicas disponibles para poder llevar a cabo esta tarea.

**Tabla 5.12 Velocidad y destructividad de deslizamientos y flujos (Cruden y Varnes, 1996)**

Velocidad	Interpretación de la velocidad	Posible impacto destructivo
< 15 mm/año	Extremadamente lento	No hay daño a las estructuras construidas con criterios sanos de ingeniería.
1.6 a 0.015 m/año	Muy lento	En general, las estructuras edificadas con criterios ingenieriles no sufren daños; y si ocurren, son reparables.
13 m/mes a 1.6 m/año	Lento	Carreteras y estructuras bien construidas pueden sobrevivir si se les da el mantenimiento adecuado y constante.
1.8 m/hr a 13 m/mes	Moderado	Estructuras bien construidas pueden sobrevivir.
3 m/min a 1.8 m/hora	Rápido	Posible escape y evacuación. Construcciones y equipo destruidos.
5 m/s a 3 m/min	Muy rápido	Pérdida de algunas vidas. Gran destrucción.
> 5 m/s	Extremadamente rápido	Catástrofe de gran magnitud.

### 5.5.6 Intensidad del fenómeno de deslizamiento

Parece conveniente buscar un tratamiento similar al enfoque que se da a otros peligros naturales como el sísmico. Así, se ha considerado pertinente el enfoque de Hungr (1997), en el que los deslizamientos son caracterizados por su intensidad. La intensidad puede definirse como un conjunto de parámetros cuantitativos o cualitativos distribuidos espacialmente, con los que se puede determinar el potencial que tiene un deslizamiento para causar daños. La intensidad sísmica reúne a un conjunto de parámetros distribuidos espacialmente para descubrir la potencia destructiva de movimientos del terreno. Estos parámetros pueden ser cuantitativos, tal como la aceleración máxima o la velocidad máxima –ver capítulo 1–, o cualitativos como la escala de Mercalli modificada (MM).

Tratándose de la intensidad de un deslizamiento estaríamos refiriéndonos a los parámetros que describen su destructividad. Debe reconocerse que todavía no existe una escala como la de la intensidad sísmica (MM); en ello debe establecerse la dificultad para definir tal escala, en virtud de que los efectos de los movimientos masivos tóreos sobre las estructuras e infraestructura, son mucho más diversos que aquellos debidos a los temblores de tierra.

Uno de los parámetros más importantes para definir la intensidad de un deslizamiento, es la velocidad máxima de movimiento. Este dato junto con la estimación de la magnitud o volumen del deslizamiento, la profundidad de la masa en movimiento y el desplazamiento total ofrecen elementos para juzgar la posible destructividad de un deslizamiento.

### 5.5.7 Análisis de la probabilidad de deslizamientos y de su intensidad

#### 5.5.7.1 Probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento

Como se ha expuesto hasta aquí, la caracterización de deslizamientos potenciales deberá incluir su ubicación, tamaño, mecanismo de deslizamiento, composición, velocidad y distancia de recorrido. Para completar estos datos, es necesario analizar la distribución de probabilidad de deslizamiento, en términos del número y características de los taludes o laderas, y los deslizamientos en el entorno de interés; esto es,  $P_h$  [número y características de los deslizamientos]. Para ello, es frecuente separar el análisis, reconociendo por una parte la separación en sí de la masa deslizante; y por otra, su movimiento. Así, puede establecerse una probabilidad condicional tal que,

si sucede una separación, un deslizamiento pueda mantenerse como una masa única con cierto movimiento reducido, y una probabilidad de que se convierta en un flujo de detritos que se mueva con cierta velocidad.

La probabilidad de deslizamiento se puede expresar en términos de (IUGS, 1997):

- El número de deslizamientos de una cierta característica que podría ocurrir en el área de estudio, por año,
- la probabilidad de que una ladera en particular experimente deslizamiento en un periodo dado, por ejemplo un año, y
- las fuerzas motoras que exceden las fuerzas resistentes en términos de probabilidad o confiabilidad, sin relacionar el análisis a una frecuencia anual.

Existen diversas maneras de calcular estas probabilidades, las cuales se enumeran enseguida atendiendo a una complejidad y rigor crecientes:

- I) Datos históricos dentro del área de estudio, o incluso adoptando los de otros sitios con condiciones geotécnicas y geomorfológicas similares.
- II) Métodos empíricos basados en correlaciones relativas a sistemas con calificaciones de laderas inestables.
- III) Uso de evidencia geomorfológica (acoplada con datos históricos y juicio).
- IV) Relación a la frecuencia e intensidad del evento desencadenante; por ejemplo, lluvias intensas o sismo.
- V) Estimación directa basada en juicio experto, el cual puede ejecutarse con referencia a un modelo conceptual; como por ejemplo, con la técnica del árbol de eventos (Whitman, 1984).
- VI) Modelado de la variable básica; por ejemplo, las cargas piezométricas o alturas de carga hidráulica *versus* el evento disparador, en combinación con la geometría de la ladera y la resistencia cortante de los geomateriales.
- VII) Aplicación de métodos probabilísticos formales, tomando en cuenta la incertidumbre en relación con la geometría de la ladera, la resistencia cortante, mecanismo de deslizamiento, y las cargas piezométricas; y
- VIII) Una combinación de los métodos precedentes.

La metodología que se ha presentado en esta guía, resulta de la combinación de procedimientos del I) al IV). Aquí se quisiera ser enfático para señalar que el recurrir a métodos de análisis más rigurosos, no necesariamente conduce a una mayor precisión en la estimación de la probabilidad. Así mismo, como se puntualizó en el inciso 5.5.3, frecuentemente la mayor área de incertidumbre es la predicción de la presión de poro en una ladera, y ningún grado de sofisticación en el modelado de la incertidumbre para la resistencia cortante o la geometría puede dar respuestas realistas, a menos que se adopte una pertinente y bien modelada distribución de presiones de poro.

#### **5.5.7.2 Probabilidad de la intensidad de un deslizamiento**

Debe reconocerse que la intensidad del peligro por deslizamiento tiene usualmente una menor probabilidad de ocurrencia que la del deslizamiento en sí. Si reconocemos a  $P_i$  como la probabilidad de que se alcance cierto nivel de intensidad en un sitio y debido a un deslizamiento dado, entonces

ésta debe resultar de la multiplicación de la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento,  $P_h$ , y una función de probabilidad de impacto espacial,  $P_s$ ; así resulta:

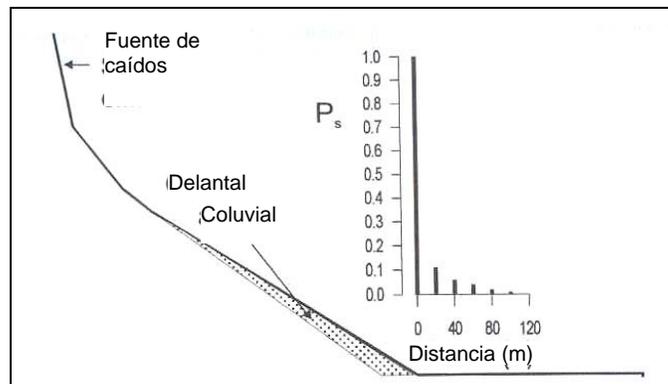
$$P_i = P_h \times P_s$$

En la figura 5.9 se presenta un ejemplo en el que la función  $P_s$  alcanzaría un valor unitario justo al pie de una ladera, ante un evento de caídos de fragmentos rocosos, e iría disminuyendo rápidamente en la medida que el punto de interés se ubique más distante del pie.

Una escala semicuantitativa de las probabilidades de deslizamiento  $P_h$  es la empleada en la provincia de Columbia Británica, Canadá, y que se reproduce en la tabla 5.13. Estos límites de clase fueron seleccionados para poseer cierto significado físico. Los términos incluidos en la tabla 5.13 podrían relacionarse con los términos “frecuente”, “probable”, “ocasional”, “remoto” e “improbable”, correspondientemente. Por otra parte, se estima que a los grados de peligro establecidos en la tabla 5.11, podrían asignárseles, respectivamente, las probabilidades señaladas en la tabla 5.13; así, al grado 5 le correspondería una probabilidad de más de 1/20, con el significado de que los deslizamientos para el caso analizado al que se le estimó un grado de peligro 1, ocurrirían con un periodo de retorno de 20 años, o menos.

**Tabla 5.13 Escala sugerida de probabilidades para la magnitud o intensidad de un deslizamiento (Hunggr, 1997)**

Término	Rango de frecuencia (1 / año)	Significado
Muy alta probabilidad	> 1/20	El deslizamiento puede ser inminente. Los eventos de deslizamiento ocurrirían con un periodo de retorno de 20 años, o menos, y dejarían signos claros de perturbación relativamente frescos.
Alta	1/100 ~ 1/20	Debe esperarse que ocurra un deslizamiento dentro del tiempo de vida de una persona, o de una estructura típica. Son identificables las perturbaciones, pero no parecen recientes.
Media	1/500 ~ 1/100	La ocurrencia de un deslizamiento en el término de un tiempo de vida no es probable, pero es posible.
Baja	1/2500 ~ 1/500	Una probabilidad anual de 1/2500 es de significado incierto.
Muy baja	< 1/2500	Este límite es comparable a la probabilidad asociada al sismo creíble máximo que se usa para el diseño de presas en Canadá.

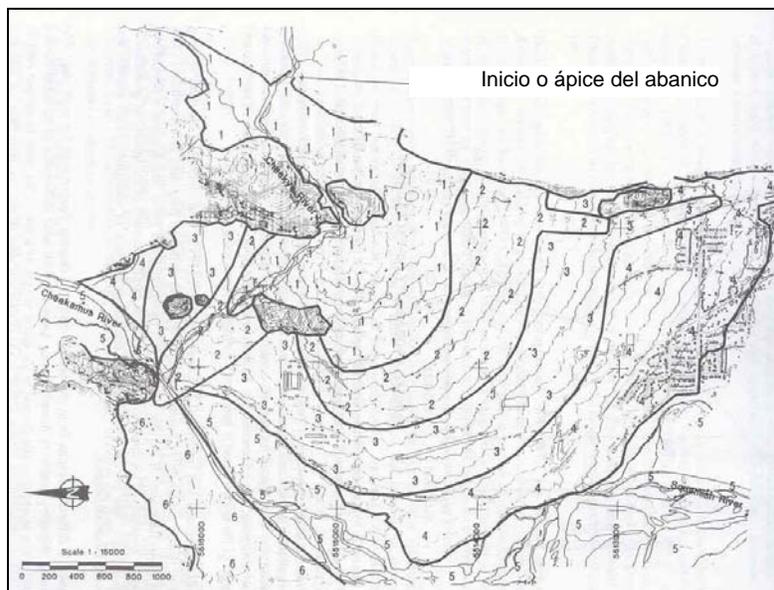


**Figura 5.9 Función de probabilidad espacial a lo largo de un perfil de un pie de monte**

Como ejemplo del análisis de intensidad de un deslizamiento, se presenta el caso de un flujo de detritos de origen volcánico que ha formado un abanico con pendiente moderada. En la figura 5.10 se presenta una planta en la que se han mapeado zonas con seis niveles de intensidad, acordes a las características definidas en la tabla 5.14. Como ya se señaló, un parámetro muy significativo acerca de la destructividad de un flujo como el evaluado, es su velocidad máxima  $V$ ; así está reconocido en esta tabla, distinguiendo también el espesor máximo de depósitos,  $D$ , que generaría el flujo. La escala de velocidades es la adaptada por el grupo de trabajo de la IUGS. El valor de la función de probabilidad espacial  $P_s$  se cuantificó estimando una anchura del corredor o canal potencial del flujo, dividida entre la total del abanico.

### 5.5.8 Influencia de los factores externos en el peligro global

En el caso de laderas naturales puede asumirse como premisa que son intrínsecamente estables, toda vez que así se han mantenido por muchos años. Sin embargo, por los estudios y experiencias de laderas falladas, se han establecido características y condiciones de suelos y rocas que hacen que ciertas laderas sean más susceptibles que otras a perder esa condición de estabilidad. El que una ladera sea estable o no, depende en gran medida de los factores internos que aquí se han expuesto y que se han pormenorizado y cuantificado relativamente en la tabla 5.10. Cabría finalmente tomar en cuenta la influencia que tienen los factores externos, a fin de definir una amenaza global. Es bien reconocido que los factores externos se convierten en francos disparadores de las inestabilidades, exacerbando precisamente a aquellas laderas más susceptibles y propensas al deslizamiento. Para el caso de las laderas calificadas con peligros de grado 4 ó 5, puede afirmarse que la probabilidad de la ocurrencia de deslizamiento sería la misma que la del agente perturbador externo, sean lluvias intensas o sismo.



**Figura 5.10** Ejemplo de una zonificación de la intensidad del peligro Caso: Abanico Cheekye, Columbia Británica (Hungr, 1997)

**Tabla 5.14 Distribución de la intensidad de el peligro para las zonas mostradas en la figura 5.10 del Abanico Cheekye (Hungr, 1997)**

Zona	Flujo de detritos A	Flujo de detritos B	Flujo de detritos C	Inundación de detritos
	M = 3 a 7 (10) <sup>6</sup> m <sup>3</sup> P <sub>h</sub> =0.0001 – 0.0004	M = 1 a 3 (10) <sup>6</sup> m <sup>3</sup> P <sub>h</sub> =0.004 – 0.001	M =100,000 a 1 (10) <sup>6</sup> m <sup>3</sup> P <sub>h</sub> =0.001 – 0.02	M < 100,000 m <sup>3</sup> P <sub>h</sub> =0.05 – 0.1
1	Movimiento sumamente rápido de flujos masivos; deposición profunda; la vegetación y la mayoría de edificios son destruidos, cambió de la topografía. V =7m/s, D =5m, P <sub>s</sub> =1.0	Flujo muy rápido y destructivo; depósitos de gran espesor en una parte del recorrido, grandes cambios en el patrón de drenaje. V =4m/s, D =4m, P <sub>s</sub> =1.0	Flujo muy rápido destructivos que surgen cerca del canal del río existente; Destrucción parcial en áreas abiertas. V =3m/s, D =3m, P <sub>s</sub> =0.5	Deposición de gravas y erosión debido al flujo de inundación en cauces nuevos.  P <sub>s</sub> =0.5
2	Movimiento muy rápido y destructivo, depósitos de espesor variables; flujo preferencial a lo largo de barrancas, la vegetación y la mayoría de edificios permanecen en pie. V =4m/s, D =3.5m, P <sub>s</sub> =0.5	Flujo muy rápido con profundidad moderada, la mayor parte de la vegetación y edificios se mantienen y no son destruidos; alguna destrucción concentrada en áreas abiertas. V =3m/s, D =2.5m, P <sub>s</sub> =0.23	Movimiento muy rápido pero relativamente poco profundo en áreas abiertas; depósitos discontinuos moderadamente gruesos; vegetación y edificios son alcanzados por el flujo o son destruidos. V =2m/s, D =2m, P <sub>s</sub> =0.17	Flujo difuso (excepto cerca del cauce del río Cheekye); deposición de grava en áreas bajas, erosión.  P <sub>s</sub> =0.17
3	Flujo muy rápido de profundidad moderada, edificios y vegetación son alcanzados o dañados, depósitos discontinuos en áreas bajas; algunos depósitos trabajados por el agua.  V =3m/s, D =2m, P <sub>s</sub> =0.25	Flujo muy rápido pero poco profundo, deposición de materiales de poco espesor controlados por detalles topográficos y obstrucciones. Daño estructural menor, erosión en cauces nuevos. V =2m/s, D =1m, P <sub>s</sub> =0.23	Daño por inundación; capas delgadas de depósitos de grava; erosión por flujo en cauces nuevos; acumulación de agua en depresiones. Sin daño estructural. V <1m/s, D =0.5m, P <sub>s</sub> =0.05	Similar a la zona 2  P <sub>s</sub> =0.05
4	Movimientos lentos, depósitos delgados discontinuos de suelos finos, fuertemente controlados por los detalles topográficos. Daño estructural menor; erosión por agua. V <1m/s, D =1m, P <sub>s</sub> =0.08	La mayoría del daño es ocasionado por el flujo de agua; depósitos de capas delgadas de gravas; erosión en cauces nuevos; agua y sedimentos se acumulan en depresiones. V <1m/s, D =0.5m, P <sub>s</sub> =0.04	Daño menor por inundación (deposición de grava, erosión); agua y sedimentos se acumulan en depresiones.  V <1m/s, D =0.5m, P <sub>s</sub> =0.04	Daño de inundación menor (deposición de grava, erosión); agua y sedimentos se acumulan en depresiones.  P <sub>s</sub> =0.04
5	Los flujos inundan algunos sitios de las planicies de inundación; cambio del curso de ríos; posible generación de olas.	Cambio temporal en la confluencia de los ríos. Cambio del flujo del río debido a sobrecarga de sedimentos.	Posible represa pequeña temporal en la confluencia de los ríos. Cambio moderado del flujo del río debido a la sobrecarga de sedimentos.	Erosión de la escarpa marginal del abanico. Incremento de la carga de sedimentos del río.
6	Desbordamiento del río Cheakamus.	Inundación en el río Cheakamus.	Inundación en el río Cheakamus.	Ningún efecto

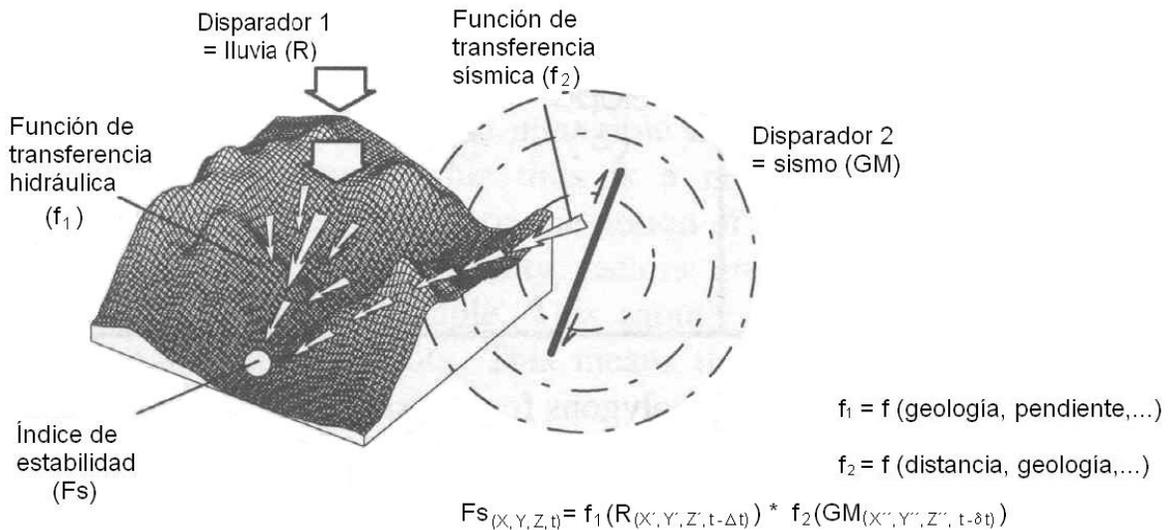
Notas: M = Magnitud, P<sub>h</sub> = Probabilidad anual, V = Velocidad máxima del deslizamiento, D = Espesor máximo de materiales, P<sub>s</sub> = Probabilidad espacial.

### 5.5.8.1 Funciones de transferencia

El modelado de la inestabilidad de una ladera debido a un agente agravante o disparador, está basado en el establecimiento de funciones de transferencia, con las ideas que se presentan en la figura 5.11. La función de transferencia se define como sigue (Leroi, 1997):

$$\text{mov} ( X, Y, Z, t ) = f [ D ( X', Y', Z', t - \Delta t ) ]$$

- $mov ( X, Y, Z, t )$  corresponde a un movimiento dado de una intensidad dada, en un punto específico en el espacio, y en una fecha  $t$ ;
- $D ( X', Y', Z', t - \Delta t )$  es el tipo de disparador en la fecha  $t - \Delta t$ , pero en otro punto en el espacio.
- $f$  es una función de transferencia que describe los cambios en el factor agravante, entre su fuente en el punto  $P' ( X', Y', Z' )$  y el sitio con coordenadas  $( X, Y, Z )$ .



**Figura 5.11 Representación de las funciones de transferencia**

Existen dos métodos diferentes para definir la función de transferencia para el disparador por lluvias intensas. La primera está basada en el análisis estadístico de la correlación entre los datos de lluvia y todos los movimientos del terreno presuntamente inducidos. El objetivo es no sólo ajustar las correlaciones, sino también identificar cualquier retraso o desfase en el tiempo, entre la fecha de un evento de lluvia dado, y cierto movimiento. Este análisis requiere una serie de datos relativamente grande, así como registros exhaustivos sobre los movimientos del terreno; como se ha reconocido en el subcapítulo 5.3, en el país no se cuenta con bases de datos hidrometeorológicos suficientes, y menos todavía de movimientos de laderas; sin duda, hay necesidad de implementar la adquisición y acopio de esta información. Este análisis de tipo caja negra hace difícil extrapolar sus resultados a otras zonas de estudio.

El segundo método está basado en el modelado determinístico de los modos de circulación y concentración del agua en el suelo, con las condiciones parcialmente saturadas y saturadas de la ladera que impone el régimen climático y las propiedades hidráulicas de los geomateriales. Exige su aplicación el conocimiento espacial detallado de la distribución de presiones en el agua del subsuelo, por lo que su aplicación parece sólo justificarse para casos particulares.

## **5.6 CONSIDERACIONES PARA ESTIMAR EL RIESGO DE DESLIZAMIENTO DE LADERAS**

### **5.6.1 Enfoques del análisis del riesgo**

En su forma más simple, el análisis cualitativo del riesgo de deslizamiento involucra la adquisición de conocimientos acerca de las amenazas y los peligros, los elementos en riesgo y la estimación de sus vulnerabilidades; todo ello de manera cualitativa, adjudicando típicamente atributos dentro de ciertos rangos. Este es el alcance de análisis para el que se establecen criterios en esta guía. Cuando se realizan valoraciones más sofisticadas, se aumentan las expresiones cuantitativas de los parámetros de entrada, aun cuando tales números puedan tener una base subjetiva y de criterio, se convierte entonces en una forma cuantitativa de la valoración del riesgo. En el subcapítulo previo se explicaron los criterios para identificar los peligros asociados a laderas, y se presentó una metodología para estimar el peligro de deslizamientos; en este subcapítulo se exponen las ideas básicas que llevan a estimar el riesgo.

Como ya fue reconocido en el inciso 5.5.2, una vez definido el riesgo, se toman decisiones para su administración, tarea en la que deben intervenir políticos, personal de Protección Civil, urbanistas, economistas e incluso sociólogos; todo ello, con la asesoría de un ingeniero geotecnista o geólogo. Este análisis del riesgo engloba las tareas o pasos del 7 al 12 que se indican en la tabla 5.8; a fin de mostrar un panorama completo, aquí se exponen sólo algunas consideraciones relativas a estas actividades.

### **5.6.2 Determinación de los elementos en riesgo**

El objetivo es determinar la distribución de la probabilidad para el número, naturaleza y características de los elementos en riesgo (personas, infraestructura, propiedades), que pudiesen ser afectados por el peligro; esto es,  $P$  [características de los elementos en riesgo]. En muchos casos esto simplemente involucrará la determinación del número y naturaleza de los elementos.

Las características relevantes que necesitan tomarse en cuenta son la ubicación del elemento con relación al peligro y su tamaño; por ejemplo, si se localiza en la ladera, en su cima, o a cierta distancia del pie. También, si ese elemento tiene una posición fija, por ejemplo una casa; o si es móvil, como podrían ser personas o un tren. Además, es importante conocer si existen algunas medidas de mitigación que pudieran afectar la probabilidad temporal. Lo anterior se ejecuta con base en cuestionarios o levantamientos de campo, tratándose de desarrollos o comunidades existentes; o bien, a partir de los planes de uso de la tierra para desarrollos futuros.

### **5.6.3 Estimación de vulnerabilidades**

El objetivo es estimar la probabilidad de pérdida de vidas y grado de daño dentro de los elementos en riesgo, mismos que caen dentro del peligro por el deslizamiento de una ladera; incluye el análisis de las disfunciones que pueden causar en la sociedad. Esta tarea se realiza en dos fases complementarias. Primeramente se definen las interacciones entre el fenómeno y los elementos en riesgo para establecer las funciones de daño; en la segunda, se determinan las perturbaciones que causan tales daños de forma directa o indirecta, y de manera inmediata o pasado algún tiempo. Desde luego, alternativamente al establecimiento de funciones de daño, puede recurrirse más simplemente a un valor único estimado, que puede ser adoptado con base en experiencias y juicios previos.

Para el caso de deslizamiento de laderas, no se han generalizado metodologías para determinar las funciones de daño; la dificultad estriba en que, a diferencia del fenómeno sísmico que adopta ya sea la velocidad o aceleración máxima como parámetro único, los problemas asociados a deslizamientos están dados en función de varios parámetros. Leroi (1997) distingue que dependiendo de cada tipo de movimiento considerado, el parámetro o los parámetros físicos que definen la vulnerabilidad, son diferentes.

#### 5.6.4 Análisis del riesgo

El objetivo es determinar la distribución de probabilidad por las consecuencias que surjan de el peligro del deslizamiento de laderas; o sea, P [consecuencias del peligro]. Existen varias formas de expresar el riesgo. Primordialmente por lo que toca a Protección Civil, sería necesario generar curvas f-N que relacionarán frecuencia versus número de personas fallecidas y lesionadas; o bien, curvas F-N de frecuencia de N o más víctimas. Sin embargo, las consecuencias deberán involucrar también el costo primario (directo e indirecto), impacto ambiental, impacto social e incluso imagen.

El cálculo de riesgo comprende primariamente un tratamiento matemático, basado en el peligro, los elementos en riesgo y la vulnerabilidad de éstos; para ello, se recurre al álgebra probabilista (como podrían ser árboles de eventos), o bien a métodos de confiabilidad o simulación. La evaluación del riesgo, R involucra la noción de amenaza, peligro, vulnerabilidad y costo; de manera formal podría establecerse como:

$$R = \sum_i A_i \times \left( \sum_j V_{ji} \times C_j \right)$$

donde:

$A_i$  es el peligro i;

$V_{ji}$  es la vulnerabilidad del elemento j expuesto a el peligro i; y

$C_j$  es el “costo” o valor del elemento j.

#### 5.6.5 Administración del riesgo

La estimación del riesgo debe llevar a determinar la mejor decisión de entre las opciones para mitigar el riesgo, considerando todos los objetivos. Las opciones de decisión deben tamizarse contra los requerimientos, tales como el nivel de riesgo aceptable, y luego revalorarse en términos de las consecuencias que pudieran surgir.

### 5.7 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR EL PELIGRO Y EL RIESGO DE DESLIZAMIENTOS EN LADERAS: CASO TEZIUTLÁN

#### 5.7.1 Consideraciones iniciales para la aplicación de la metodología

Se describen en este subcapítulo las consideraciones y experiencias obtenidas de la aplicación práctica de la metodología expuesta en el subcapítulo 5.5, a fin de evaluar el peligro y el riesgo de deslizamientos en laderas. Aun cuando se proporcionan ideas generales para la cuantificación del riesgo de deslizamientos, su desarrollo detallado está fuera del alcance de este documento.

El impacto de los deslizamientos de laderas es muy variado; incluye la pérdida de vidas humanas, la generación de daños materiales cuantiosos, y la interrupción de caminos y líneas de transmisión. Es un hecho bien identificado que en nuestro país las zonas de más alto riesgo, no sólo a los deslizamientos térrcos, sino también a las inundaciones y otras calamidades, son donde usualmente se asienta la población de menores recursos; sus necesidades les obliga invadir barrancas, laderas y zonas de reserva ecológica, con lo que ingresan elementos en riesgo (la población y sus bienes) a zonas con alto grado de peligro. A la gran demanda de vivienda y los escasos recursos de la población, se suman la ausencia o inoperancia de la ley respecto al uso del suelo, la falta de planes de desarrollo urbano y a la ausencia o escasez de mapas de peligro o de zonificación del riesgo. La metodología que se ha expuesto tiene por objetivo final contribuir a revertir la situación antes descrita.

Se insiste entonces que los elementos aportados en la tabla 5.10 están orientados a definir no sólo la amenaza que exhibe una ladera en función de sus factores internos, sino también el peligro al considerar las probabilidades de ocurrencia del agente perturbador externo, sean lluvias intensas, sismo, o actividad volcánica, tratándose de fenómenos naturales. Así, al evaluar el peligro, no puede pasarse por alto la presencia de los asentamientos humanos en las laderas, mismos que como ya se ha reconocido, agudizan los factores detonadores de las inestabilidades.

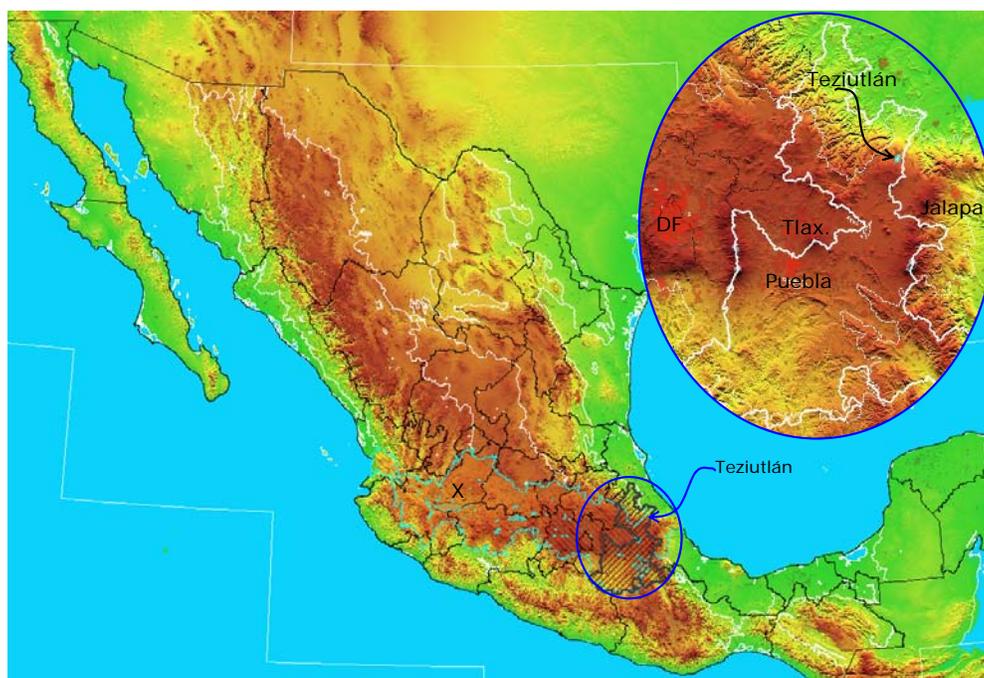
Aun cuando en México los deslizamientos de laderas en zonas urbanas han ocurrido con cierta frecuencia y desde hace varias décadas, no se cuenta aún con una base de datos que reúna información histórica, documentos o informes con la descripción de tales acontecimientos (ubicación, mecanismo de falla, volumen deslizado, etc.), ni de los daños que éstos han causado. Uno de los casos mejor documentados y estudiados por lo que se refiere a la protección civil es el deslizamiento y flujo ocurrido en la colonia La Aurora de la ciudad de Teziutlán, Puebla, el 5 de octubre de 1999, durante las lluvias intensas de finales de septiembre y principios de octubre de ese año. En este evento, desafortunadamente perdieron la vida 110 personas, oficialmente decretándose que se trataba del desastre del decenio. Esa región ubicada en la Sierra Norte de Puebla (SNP), reúne condiciones geotécnicas, climáticas, topográficas y geomorfológicas proclives para la ocurrencia de los deslizamientos. Es por ello, que se ha elegido a esta ciudad como proyecto piloto para poner en práctica la metodología para estimar el peligro y el riesgo de deslizamientos en laderas, expuesta en el subcapítulo 5.5. Antes de exponer lo referente a la aplicación de la metodología, se describen con cierto detalle las peculiaridades geotécnicas de la zona, a fin de aportar elementos que coadyuven a la puesta en marcha de la multicitada metodología. Si el lector prefiere ir directamente a los ejemplos de aplicación, se le remite al inciso 5.7.3.

### **5.7.2. Deslizamientos ocurridos en Teziutlán, Pue. durante las lluvias intensas de octubre de 1999**

En este apartado se describen los deslizamientos térrcos y rocosos ocurridos en la ciudad de Teziutlán, Puebla, dentro del marco de las lluvias intensas que a principios de octubre de 1999 azotaron, entre otras, a la Sierra Norte de ese estado, que colinda con Veracruz. La precipitación acumulada en esta ciudad en un lapso de diez días alcanzó poco más de un metro de columna de agua, lo que representa la lluvia de casi un año en esa región (véase la fig. 5.4). Como resultado de estas precipitaciones extraordinarias, sucedieron inestabilidades de laderas e inundaciones en otras regiones del mismo estado, así como en los estados de Hidalgo, Veracruz, Tabasco, Chiapas, Estado de México, y la propia ciudad de México.

### 5.7.2.1 Ubicación de la ciudad de Teziutlán

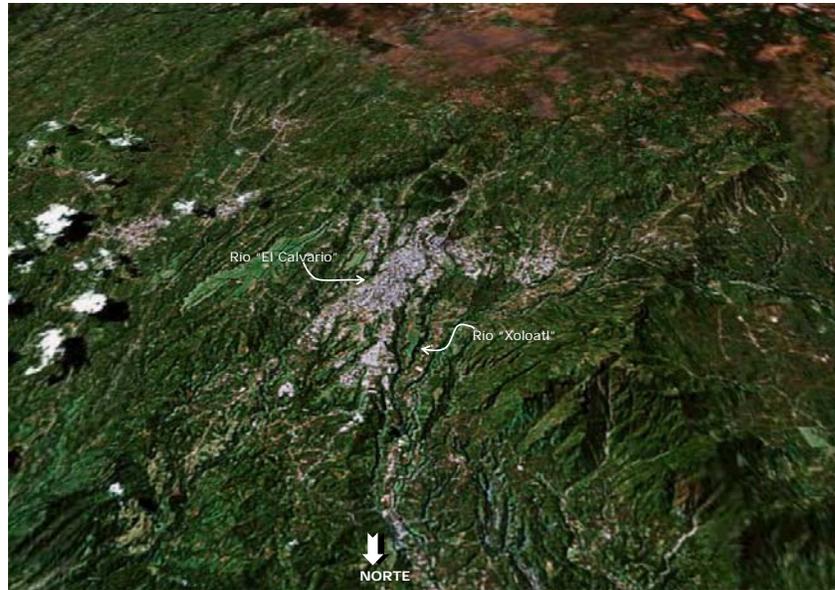
La cabecera municipal de Teziutlán se localiza al noreste de la ciudad de Puebla, fig. 5.12, a una altitud media de 1,940 m.s.n.m., y coordenadas  $19^{\circ} 49' 01''$  de latitud norte y  $97^{\circ} 21' 37''$  de longitud oeste. De acuerdo con información geológica y geográfica del INEGI, el municipio de Teziutlán se asienta en la vertiente del Golfo de México sobre el Eje Neovolcánico Transmexicano. Colinda al norte con el municipio de Hueytamalco, al sur con los municipios de Chignautla y Xiutetelco, al oriente nuevamente con Xiutetelco y una parte del municipio de Jalacingo que pertenece al estado de Veracruz, y al poniente con los municipios de Chignautla y Tlatlauqui. Su superficie aproximada es de 2,400 km<sup>2</sup> y cuenta con 81,156 habitantes, según datos del INEGI del Censo General de Población y Vivienda del año 2000.



**Figura 5.12 Ubicación de la ciudad de Teziutlán, Puebla**

La topografía en la región es muy accidentada, véase la fig. 5.13, por lo que la ciudad y sus pueblos vecinos están situados entre dos cuencas principales con cauces hacia el norte, por lo que corren dos ríos que desembocan en el Golfo de México. Por el oriente de la ciudad, el río denominado Xoloco, también conocido como “El Calvario”, que junto con otros es tributario del río Nautla que desemboca en la barra del mismo nombre en el Golfo de México. Por el poniente, se forman dos ríos principales y algunas barrancas, siendo el más importante el Xolóatl que tiene su nacimiento en las faldas del Cerro de Chignautla. Este río cambia de nombre de acuerdo con el lugar que va atravesando, como Atenco, La Ventilla y Cedro Viejo cuyas aguas tributan al río Apulco y, junto con otros, forman el río Tecolutla que descarga sus aguas al Golfo, en la barra que lleva el mismo nombre.

El clima en la región es semicálido y húmedo con lluvias prácticamente todo el año, aunque en invierno la parte alta de la zona se torna fría y húmeda, con cambios bruscos de temperatura y presión debidos a las frecuentes perturbaciones atmosféricas del Golfo. El promedio de lluvia anual en la región es de 1,229 mm (Mendoza y Noriega, 2002) y los vientos dominantes durante el día son



**Figura 5.13 Vista satelital de la ciudad de Teziutlán**

usualmente del Norte, con cambios frecuentes por la noche a vientos del Sur. El municipio está dividido en diez secciones urbanas: Cohuaco, San Francisco, El Carmen, El Camposanto, La Gloria, El Centro, Los Lavaderos, Los Caracoles, La Merced y San Rafael; 12 secciones rurales: Ahuateno, Chignaulingo, Taxcala, Xoloco, Ixticpan, Ixtahuiata, Huehuetmico, Calchualco (Francia), Texcal, Xoloateno, La Garita e Ixtlahuaca; más cinco pueblos o juntas auxiliares que son Atoluca, San Diego, San Juan Acateno, San Sebastián y Mexcalcuautla.

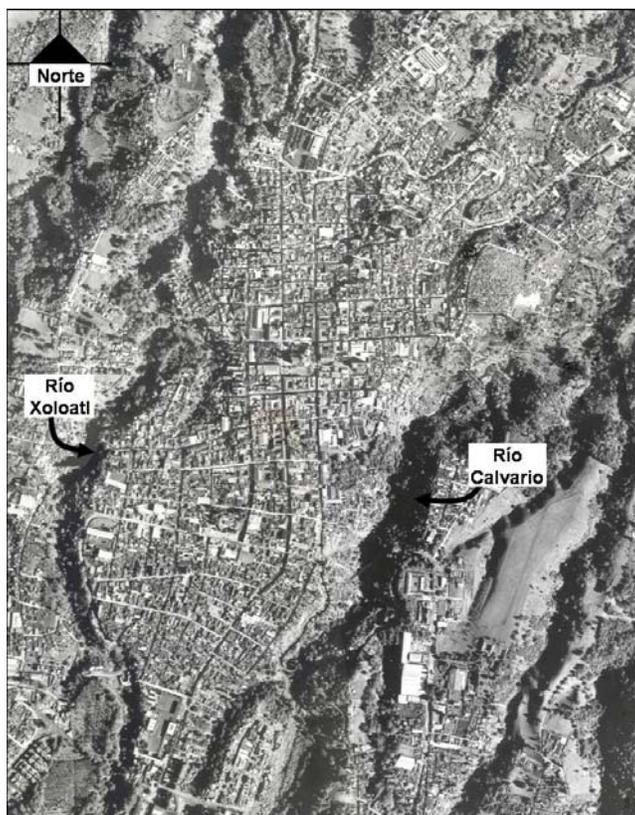
### **5.7.2.2 Descripción geológica y geomorfológica de la zona**

De manera simplificada puede decirse que la ciudad de Teziutlán está asentada en su parte céntrica en una meseta ligeramente inclinada hacia al norte, dentro de un entorno de barrancas y lomeríos con pendientes variables. Hacia el oriente y hacia el poniente de la ciudad la porción más o menos plana se convierte en laderas naturales con pendientes moderadas, en algunos casos, y en acantilados francos con pendientes muy escarpadas, en otros.

En la zona prevalecen materiales rocosos de origen volcánico, principalmente tobas y brechas, las que se aprecian con una cementación media (rocas suaves). Se trata en general de rocas ígneas extrusivas del Cuaternario, que pertenecen al Eje Neovolcánico Mexicano. Se aprecian también derrames basálticos provenientes de conos volcánicos ubicados al sur de la ciudad. De manera diferencial, estas rocas suaves dan origen a suelos residuales, que son el resultado de la descomposición de esos productos rocosos jóvenes, debido al clima templado y húmedo que prevalece en toda la región. Precisamente estos materiales residuales de espesores relativamente delgados (6 a 8 m de profundidad), que se extienden por el oriente y norte de la ciudad, son los que presentan mayores problemas de inestabilidad, ya que resultan propensos a deslizarse por el efecto que tienen las lluvias intensas y prolongadas en la disminución de su resistencia cortante.

Hacia el oeste de la ciudad se aprecian acantilados en tobas y brechas que exhiben pseudoestratificación, atendiendo a los secuenciales eventos eruptivos de los conos volcánicos mencionados. En general estas rocas blandas son de grano fino a medio (arenas limosas, al disgregarlas), aunque también se encuentran estratos con proporción importante de fragmentos

rocosos y gravas, empacadas en esa misma matriz granular fina. Otras capas son de granos pumíticos, vidrio volcánico y fragmentos de obsidiana. En la vecindad de esos cantiles, incluso en su borde mismo, y en la de laderas un tanto menos escarpadas, así como en el fondo de las barrancas, se observan gran cantidad de construcciones pertenecientes a las colonias La Gloria, Siete Sabios, Cruz Verde y El Carmen, fig. 5.14, entre otras ubicadas a lo largo del río Xoloatl.



**Figura 5.14** Traza urbana de la ciudad de Teziutlán

Hacia el noreste de la ciudad, los taludes naturales son de pendientes relativamente más suaves. Los materiales ahí encontrados son también de origen volcánico, pero se encuentran *diferencialmente más alterados*. Esto último obedece a la *naturaleza básica* que se presume tienen sus constituyentes mineralógicos; eso parece que los hace más susceptibles a la descomposición química que las tobas ácidas que se encuentran hacia el sur y el poniente. Las laderas hacia el sureste de la ciudad (colonias Ávila Camacho, Benito Juárez y Campo Verde, principalmente) se tornan más escarpadas que las del noreste (colonias El Calvario y La Aurora). Como resultado del intemperismo, en algunas zonas de la ciudad se han producido suelos residuales que tienen características de andosols (Birkeland, 1974; Morin y Todor, 1975) con propiedades mecánicas peculiares; es decir, muestran una gran sensibilidad al secado y variaciones importantes en su resistencia debido al régimen de succión mátrica (Marsal y Mendoza, 1985), que explican en parte los deslizamientos que ahí se produjeron (colonias Benito Juárez y La Aurora, principalmente).

En el apartado 5.3.3.1d se han expuesto los histogramas de las lluvias intensas ocurridas en la zona en 1999. De acuerdo con información de la CNA, estas tormentas se originaron al formarse un "nudo" meteorológico que cubría la zona norte del estado de Puebla, y grandes extensiones de los estados de Hidalgo y Veracruz, y en menor proporción en Tlaxcala. Tal "nudo" se debió a que ondas

tropicales (frentes de humedad que surgen de los océanos) que venían unas tras otras desde el Este, chocaron y se fusionaron con una baja presión, convirtiéndose en una gran depresión tropical.

### 5.7.2.3 Descripción de los deslizamientos

De acuerdo con información de las autoridades y de los registros tomados durante la visita a las zonas de deslizamientos ocurridos en esa temporada, se estimó que en aquella ocasión ocurrieron cerca de cien deslizamientos -sólo en la ciudad de Teziutlán-, con diferentes volúmenes de suelos y rocas removidos. En las figuras 5.15 se presentan vistas panorámicas de la ladera sureste de la ciudad tomadas en octubre de 1999 y una vista reciente, distinguiéndose todavía una cantidad considerable de viviendas habitadas pertenecientes a la colonia Benito Juárez, no obstante los antecedentes de deslizamientos y flujos que ocurrieron en esas laderas. Se describirán a continuación algunos de los deslizamientos más importantes ocurridos en Teziutlán durante ese temporal, los cuales fueron reconocidos por personal del CENAPRED (Mendoza y Noriega, 1999).



Figura 5.15 Panorámica de la colonia B. Juárez (a) en octubre de 1999, y (b) en noviembre de 2004

### 5.7.2.3.1 Colonia La Aurora

La mañana del martes 5 de octubre de 1999 ocurrió un deslizamiento y flujo de suelos que abarcó unos 15 m del panteón ubicado cerca del hombro del deslizamiento y la zona urbana que se asentaba en el cuerpo y al pie de la ladera; el volumen estimado fue de 7,350 metros cúbicos (Mendoza y coautores, 2000). Se trataba de una ladera con una pendiente moderada de  $23^\circ$ , aproximadamente, que finalmente se vació en forma de un flujo de suelos, fig. 5.16. Más allá del pie de esta ladera y después de una ligera pendiente se ubica un cantil vertical, al fondo del cual corre el río Xoloco; así, el flujo lodoso del deslizamiento corrió por ese “escalón” y cayó finalmente hacia el río, fig. 5.17. Debido a que en esas fechas llovía de manera ininterrumpida desde la noche del domingo 3 de octubre, y dado que se había establecido la suspensión de clases escolares así como otras actividades en la ciudad, la gran mayoría de las viviendas se encontraban habitadas, ello ocasionó que en el deslizamiento perdieran la vida poco más de cien personas.

Como resultado del deslizamiento la superficie de falla quedó totalmente expuesta y visible; notándose un movimiento con componentes de rotación cerca del hombro, de unos 40 m de ancho, y de traslación en el resto de la ladera para terminar en el pie con un ancho de 20 m, aproximadamente. La superficie de deslizamiento tuvo una forma similar a la de una mitad de embudo (característica de las fallas en las que se “fluidifica” el suelo), y se redujo pendiente abajo por donde se “vacío” la masa fallada. La escarpa principal de falla cerca de la corona de la ladera cortó al terreno del panteón con un ángulo de  $75^\circ$ , aproximadamente, y la longitud del deslizamiento, del hombro al pie de la falla, fue de un poco más de 100 m.

Durante el recorrido de campo por la zona de deslizamiento se tuvo oportunidad de recuperar algunas muestras de suelo, justo en la superficie de falla, con el fin de llevarlas al Laboratorio de Dinámica de Suelos del CENAPRED para determinar sus propiedades índice, así como las de resistencia cortante y de deformabilidad. Aun cuando se han realizado diversas pruebas en estos materiales (Noriega 2005) en este apartado sólo se presenta un análisis de los resultados en las pruebas índice, ya que estos resultados por si solos permiten explicar de manera cualitativa el fenómeno que ahí ocurrió. En la tabla 5.15 se muestra un resumen de dichas propiedades índice, las cuales sirvieron para clasificar e identificar las muestras recuperadas apenas a 10 cm de la superficie de falla; el contenido natural de agua de las muestras estudiadas alcanzó un valor medio  $w_n=97.8\%$ . Al comparar este valor con los consignados en la tabla, puede constatar que el suelo del talud tenía un contenido natural de agua ligeramente superior al límite líquido; es decir, que en condición remoldeada este suelo se encontraría con una consistencia propia del estado semi-líquido, equivalente a una resistencia cortante muy baja, casi nula. Sin embargo, estos suelos en su condición natural inalterada guardan cierta consistencia, dada la estructura adquirida durante su vida geológica. Tal estructura fue rota con las fuertes distorsiones que tuvo la masa deslizada, en virtud de su alta sensibilidad al remoldeo, lo que provocó finalmente que se fluidificara y que se vaciara seguramente con gran velocidad.

**Tabla 5.15 Resumen de las propiedades índice de las muestras recuperadas en la superficie de falla del deslizamiento en la colonia La Aurora**

Propiedad índice	A partir de su contenido natural de agua, $w_n$	Muestras secadas previamente al horno
Límite líquido, $w_L$ , %	97.0 %	61.1 %
Límite plástico, $w_p$ , %	59.1 %	49.3 %
Índice plástico, PI, %	37.9 %	11.8 %



**Figura 5.16** Vista aérea del deslizamiento, en la Col. La Aurora, cuya corona abarcó una parte del panteón que se ubica en la plataforma



**Figura 5.17** Vista del deslizamiento en La Aurora y la zona por donde cayó el flujo hacia el río Xoloco

Una muestra de este suelo se sometió a tamizado por vía húmeda, encontrándose que 94% del total en peso pasa la malla No. 200 (0.074 mm), y que el 100% de sus partículas es de dimensiones menores a 1 mm. Atendiendo a estos datos y los resultados obtenidos a partir de sus propiedades índices, puede señalarse que el material de la ladera es un suelo fino que se clasifica según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), como un limo de alta compresibilidad (MH). No obstante esta clasificación ingenieril, se estima que mineralógicamente hablando se trata de una arcilla y posiblemente con cierta proporción de alófanos, a juzgar por la sensibilidad que exhibe al secado; en efecto, adviértase en la columna 3 de la tabla 5.15 que si se seca el suelo antes de realizar los ensayos de límites de plasticidad, se reduce considerablemente el índice plástico, debido principalmente a la drástica caída del límite líquido. La densidad de sólidos en la muestra fue  $G_s = 2.71$ , y su peso volumétrico total natural,  $\gamma_t = 1.326 \text{ g/cm}^3$ .

Es claro que la falla de la ladera no se explica sólo por la baja resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, aunque sin duda la sola identificación de estos materiales y los antecedentes de inestabilidades en la región, debieron ser motivo de alerta, y deben ser motivo de preocupación para el futuro. En efecto, el fenómeno disparador de la inestabilidad fue el agua, ya que debido a la alta precipitación ingresó a la masa interna del talud, aumentando el grado de saturación (cociente entre el volumen de agua y el volumen de los huecos o vacíos) del suelo que inicialmente se encontraba parcialmente saturado. Así, en la porción cercana a la que habría de ser la superficie de deslizamiento, o al menos en parte de ella, el suelo se saturó; y con ello, no sólo se perdió la succión (presión de poro negativa), sino que se generó presión de poro positiva, reduciendo la magnitud de los esfuerzos efectivos. Por ello, la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos se vio también disminuida, dada su proporcionalidad con los esfuerzos efectivos.

Adicionalmente, pudo ser que en este proceso se hayan desarrollado algunas grietas que, al llenarse con agua, estuvieron sujetas a una presión hidrostática que ejerció cierto empuje sobre bloques potencialmente susceptibles al deslizamiento, coadyuvando así a la inestabilidad del talud. La falla sobrevino cuando los esfuerzos cortantes generados en la cercanía del talud no los pudo contrarrestar la resistencia disminuida del suelo, según el mecanismo antes descrito. Al producirse la falla, el suelo remoldeado perdió su estructura natural (sensibilidad alta), su resistencia ya en movimiento fue menor, y así adquirió una condición viscosa; ello provocó el flujo ladera abajo, dejando al descubierto -como se ha señalado- la superficie de falla.

### 5.7.2.3.2 Colonia La Gloria

Varias casas desplantadas en la ladera contigua a la colonia La Gloria, fig. 5.18, sufrieron su total destrucción o serios daños; algunas de ellas se movieron masivamente con el material fallado. Como se señaló, los taludes de las laderas en esta zona son más escarpados, aunque constituidos por rocas blandas poco cementadas y suelo intemperizado poco plástico. Los deslizamientos que aquí ocurrieron fueron clasificados principalmente como caídos y desprendimientos, constituidos por volúmenes relativamente reducidos. En estos casos el material producto de los desprendimientos no se fluidificó como en La Aurora, debido a la naturaleza granular de los materiales. Las autoridades municipales desalojaron a los habitantes de esta ladera, por lo que no hubo víctimas por los deslizamientos ocurridos; al parecer, la percepción del peligro era mayor aquí, juzgando sólo la pendiente de la ladera. Debe reconocerse que el aspecto geométrico de una ladera es, si bien muy significativo para su estabilidad o inestabilidad, no es menos importante lo relacionado con su resistencia al esfuerzo cortante. Llama la atención que en esta zona varios de los deslizamientos ocurrieron en zonas donde existían tubos de drenaje que desembocaban en las laderas de las barrancas, fig. 5.19. Es posible que los drenajes en estas zonas de deslizamientos estuvieran rotos, propiciando la inestabilidad del terreno al aportar localmente y a profundidad una cantidad

considerable de agua. La pérdida de succión y el aumento de presión en el agua del subsuelo provocaron las fallas reseñadas, con un mecanismo semejante al explicado para el de la colonia La Aurora.



**Figura 5.18** Vista de los deslizamientos y sus efectos en la colonia La Gloria



**Figura 5.19** Deslizamientos de tierra provocados por fugas en los sistemas de drenaje

### 5.7.2.3.3 Fraccionamiento Circuito Siete Sabios

Hacia el norte de la colonia La Gloria, la ladera alcanza una altura mayor (del orden de 50 m) y se hace más escarpada; antes de este temporal sus taludes tenían ángulos de aproximadamente  $70^\circ$ . Se trata de una zona densamente poblada (fig. 5.20a) en la que se han erigido construcciones, de hasta de tres pisos, cercanas al borde mismo de la barranca, si no es que francamente en la ladera. Después de los desprendimientos o caídos, en algunas porciones se formaron de hecho cantiles verticales, como se distingue en la figura 5.20b.



**Figura 5.20** Caídos en los cantiles del Fraccionamiento Circuito Siete Sabios

Los materiales de la ladera están constituidos por tobas de grano fino -más cementadas que en ningún otro sitio de la ciudad-, pseudoestratificadas con brechas volcánicas y otras capas de piroclastos; esto es, se trata de rocas, así sean blandas, que explican el por qué de los ángulos tan escarpados de las laderas de esta colonia. Precisamente por este factor interno de la ladera por lo que se refiere a la constitución y naturaleza de sus materiales fue que no se generó ahí ningún deslizamiento franco, y menos un flujo de rocas o suelos. Las precipitaciones excepcionales provocaron los caídos mostrados, sin generar ninguna catástrofe, toda vez que la zona fallada incluso no involucró a las porciones construidas, aun cuando éstas se encontraban en el borde mismo del cantil. Algunos daños sí produjeron esos caídos en la zona de depositación, ubicados precisamente al pie de la ladera, los que obedecen a una situación de máxima exposición al daño, tal como se muestra en la figura 5.9. Este es un ejemplo claro de que tanto más cerca esté una construcción del pie de una ladera escarpada, su probabilidad de ser dañada por una inestabilidad es mayor, al punto de llegar a la certidumbre de ser afectada.

#### 5.7.2.3.4 Barrio Campo Verde

En la ladera oriente de la ciudad y al sur de la colonia La Aurora, se ubica el barrio de Campo Verde, en el que numerosas casas-habitación fueron construidas en zonas aledañas a las laderas de la barranca que también reconoce el río Xoloco, incluso algunas desplantadas muy cerca del cauce del río. Como resultado de las fallas de talud o directamente por la corriente, varias viviendas sufrieron daños muy serios o su destrucción total, fig. 5.21. Al pie de esta ladera pudieron distinguirse afloramientos basálticos masivos que subyacen a las coberturas de suelo residual. Pudo apreciarse también que a una semana de que ocurrieron las inestabilidades, cerca del pie del talud seguía fluyendo (“llorando”) agua; ello pone de manifiesto la acumulación de agua en el interior de la ladera, con el consiguiente mecanismo que conduce al deslizamiento.



**Figura 5.21** Destrucción de viviendas tanto por deslizamientos de laderas como por corrientes de agua en áreas aledañas al cauce del río Xoloco, Barrio Campo Verde

### 5.7.2.3.5 Colonia Benito Juárez

En la misma ladera oriente de la ciudad, por cuyo pie corre el río Xoloco, y a su vez al sur del Barrio Campo Verde, está asentada la colonia Benito Juárez. Las laderas en esta zona tienen una pendiente de hasta  $40^\circ$  y sobre ellas se construyó un número considerable de casas, que hoy en día se encuentran habitadas en su mayoría. Aquí, las fallas de talud ocurrieron primordialmente en las capas de rocas alteradas, provocando muchos colapsos de casas, así como un deterioro severo de otras tantas que quedaron en una condición muy precaria de estabilidad; por ejemplo, los restos de la vivienda de dos niveles que se aprecia en el cauce, primer plano de la figura 5.22a, se encontraba en la parte alta del talud fallado, al lado de las viviendas que permanecieron estables después del deslizamiento, como se observa en la misma fotografía. En otras casas de esa misma ladera, fig. 5.22b, se perdió parte del terreno de apoyo por el deslizamiento; en esta fotografía se puede apreciar lo erosionable que resulta el suelo en la superficie de deslizamiento.

Poco más hacia el sur de esta colonia, se pudieron apreciar verdaderos desafíos a la naturaleza, fig. 5.23a, al construirse un conjunto apiñado de viviendas que concentran esfuerzos, aguas servidas y otras actividades perturbadoras del talud; afortunadamente para sus moradores, el deslizamiento contiguo no abarcó estas construcciones. En la figura 5.23b se presenta una vista reciente de la misma zona habitada que se muestra en la figura 5.23a. Como se puede observar esta zona de la Colonia Benito Juárez aún permanece habitada, y es posible que el número de viviendas haya aumentado, no obstante los acontecimientos de 1999. Otros retos a la naturaleza son los casos en los que en un afán de ganar espacio, se han realizado construcciones con voladizos sobre el talud, o en las que esas porciones salientes las han apoyado en columnas esbeltas de longitudes diferentes, fig. 5.24, desplantando someramente sus cimientos, por cierto en las capas más alteradas de las tobas.



**Figura 5.22** Destrucción de viviendas por los deslizamientos ocurridos en la Col. Benito Juárez



**Figura 5.23** Ladera en la colonia Benito Juárez, (a) días después de los sucesos de 1999, y (b) en noviembre de 2005



**Figura 5.24** Viviendas en voladizo o con columnas de apoyo en las laderas de la colonia Benito Juárez

### 5.7.2.3.6 Barrio Xoloco

El único acceso a Teziutlán que se conservó abierto después de los deslizamientos de septiembre y octubre de 1999, fue la carretera a Perote, Ver., ya que las carreteras a Tlapacoyan, Ver. y a Puebla -vía Zaragoza- sufrieron cortes. Sin embargo, la falla en dos porciones de la ladera en el barrio conocido como Xoloco, estuvo a punto de cortar aquella vía, fig. 5.25. El deslizamiento en esta zona puso al descubierto suelos rojizos residuales en la superficie de falla, fig. 5.26; la pendiente de la ladera era de aproximadamente 45° y altura de unos 60 m.



**Figura 5.25** Deslizamiento contiguo a la carretera Perote-Teziutlán, en el tramo que cruza el barrio Xoloco

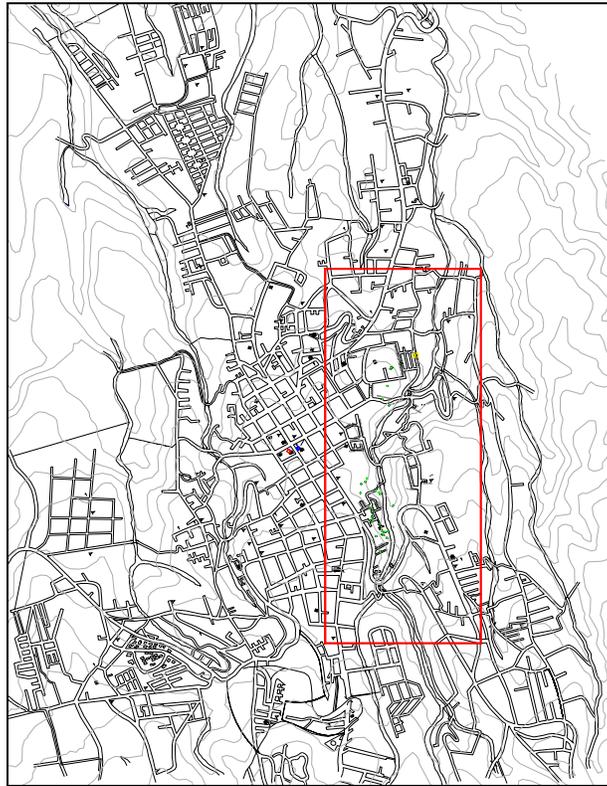


**Figura 5.26** Vista frontal del deslizamiento contiguo a la carretera Perote-Teziutlán, en el tramo que cruza el barrio Xoloco

### 5.7.3 Estimación del peligro y el riesgo de deslizamientos en cuatro colonias de Teziutlán, Pue.

En el subcapítulo 5.5 se expuso la metodología para estimar el fenómeno y el peligro de deslizamientos en laderas, dentro del contexto de las actividades inherentes de Protección Civil. Se llegó así a distinguir dentro del formato de evaluación de campo incluido en la tabla 5.10, los rasgos geotécnicos, geológicos y/o geomorfológicos que deben ser calificados. Al sumar los puntajes asignados a cada uno de estos factores determinantes de la estabilidad de una ladera, se llega a establecer finalmente el peligro a su deslizamiento. En este y el siguiente subcapítulo se discute la aplicación práctica de esta metodología en cuatro colonias de la ciudad de Teziutlán, Puebla. Con este ejercicio se pretenden aclarar dudas y enfoques en su aplicación, así como también ganar experiencias al analizar su aplicabilidad por parte de diferentes usuarios, con miras a retroalimentar el método para su mejora.

Las cuatro colonias de la ciudad de Teziutlán seleccionadas para este proyecto piloto están ubicadas al oriente de la ciudad, en las laderas que forman la margen izquierda del río Xoloco; ellas son: Ávila Camacho, Benito Juárez, El Calvario y La Aurora, mencionadas de sur a norte, fig. 5.27. Se trata de laderas con inclinaciones que van de los 70° al sureste de la ciudad (Col. Ávila Camacho), hasta los 12° al noreste (Col. La Aurora). De acuerdo con mediciones directas realizadas en campo con equipo portátil (como distanciómetro, brújula e inclinómetro) y con información tomada de la carta topográfica E14B15 del INEGI, se estimó que las alturas y las pendientes medias de las laderas en las colonias donde se aplicó la metodología fueron como se indica en la tabla 5.16.



**Figura 5.27** Ubicación de las colonias estudiadas en Teziutlán

**Tabla 5.16 Alturas y pendientes aproximadas de las laderas estudiadas**

Sitio o colonia	Pendiente, (°)		Altura, (m)	
	máxima	mínima	máxima	mínima
Ávila Camacho	70	45	75	50
Benito Juárez	45	20	60	50
Campo Verde	40	30	60	50
El Calvario	40	25	65	50
La Aurora	35	12	60	40

Durante la evaluación en campo se observó que en algunos casos las laderas habían sido modificadas por cortes y terrazas para la construcción de caminos y viviendas. En tales casos, se determinó que la mejor forma de evaluar la altura y la pendiente de las laderas era dividiéndolas en tramos o secciones según la naturaleza del corte. Así mismo, hubo casos en los que debido a los cambios en las características topográficas y geomorfológicas de la zona, hubo que dividir a una colonia en tramos independientes y evaluarlos en forma separada.

### 5.7.3.1 Investigación geotécnica y geomorfológica para identificar el fenómeno de deslizamientos

Con el fin de conocer el tipo, identificar y clasificar los materiales que componen las laderas en los sitios estudiados, se recuperaron muestras alteradas de suelo a diferentes profundidades, fig. 5.28, mediante equipo manual de perforación por rotación; o bien se labraron muestras inalteradas someras; en esta publicación no se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio. Adicionalmente, a fin de allegarse información acerca de sus propiedades mecánicas probó su utilidad y pertinencia un equipo portátil ligero de penetración dinámica, fig. 5.29; se trata de un penetrómetro dinámico de energía variable que determina la resistencia que ofrece el suelo a la penetración de una punta cónica. No requiere ninguna maquinaria para su uso, tal como se constata en las vistas de la fig.5.29.



**Figura 5.28 Recuperación de muestras de suelo alteradas e inalteradas en dos laderas de la Colonia B. Juárez**

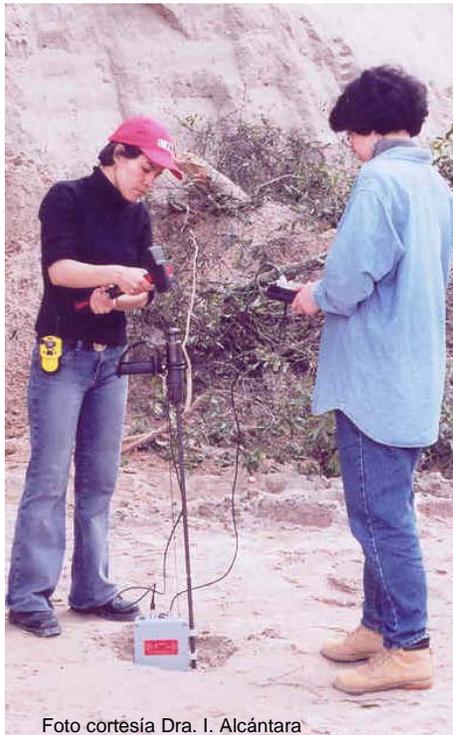


Foto cortesía Dra. I. Alcántara



**Foto 1 : Conjunto PANDA 2**

El conjunto Panda 2 contiene:

- Ⓐ Maleta hermética
- Ⓑ Terminal De Dialogo
- Transformador de sector
- Cordón de enlace en serie
- Ⓒ Unidad Central de Adquisición
- Ⓓ Cabeza a extensímetros
- Ⓔ Cargador de batería
- Ⓕ Martillo
- Ⓖ 10 barras de 50cm
- Ⓗ 2 porta puntas
- Ⓘ 6 puntas fijas de 2cm<sup>2</sup>
- Ⓝ 10 puntas perdidas de 4cm<sup>2</sup>
- Ⓚ Extractor de barras
- Ⓛ 2 llaves de 10
- Ⓜ 1 par de gafas de protección.



**Foto 2 : PANDA 2 armado**

**Figura 5.29** Uso y componentes del penetrómetro portátil empleado en la exploración de los suelos que constituyen las laderas estudiadas

La profundidad de exploración que alcanza este equipo resultó muy apropiada para los estudios de campo realizados, dado el espesor de los suelos de unos cuantos metros en los sitios de interés. La fácil operación del equipo, misma que prácticamente puede hacerla una sola persona, y su peso ligero, permiten transportarlo a las zonas de difícil acceso como las relativas a barrancas y cañadas, en las que otros equipos de exploración geotécnica difícilmente podrían ser llevados. La prueba con este penetrómetro consiste en hincar en la masa del suelo una punta cónica unida a una sarta de barras de perforación metálicas. El conjunto se hinca aplicando golpes con un martillo de peso conocido, a un cabezal instrumentado que va unido a las barras. El equipo está instrumentado y diseñado de tal forma que durante la ejecución de la prueba es posible observar en tiempo real la profundidad de avance y la resistencia del suelo para cada tramo penetrado, el cual, por especificación del fabricante debe ser menor a 2 cm. Al final del proceso es posible obtener una gráfica continua de la resistencia del suelo a la penetración de la punta y su variación con la profundidad, con lo que es fácil detectar las capas y espesores de suelos blandos.

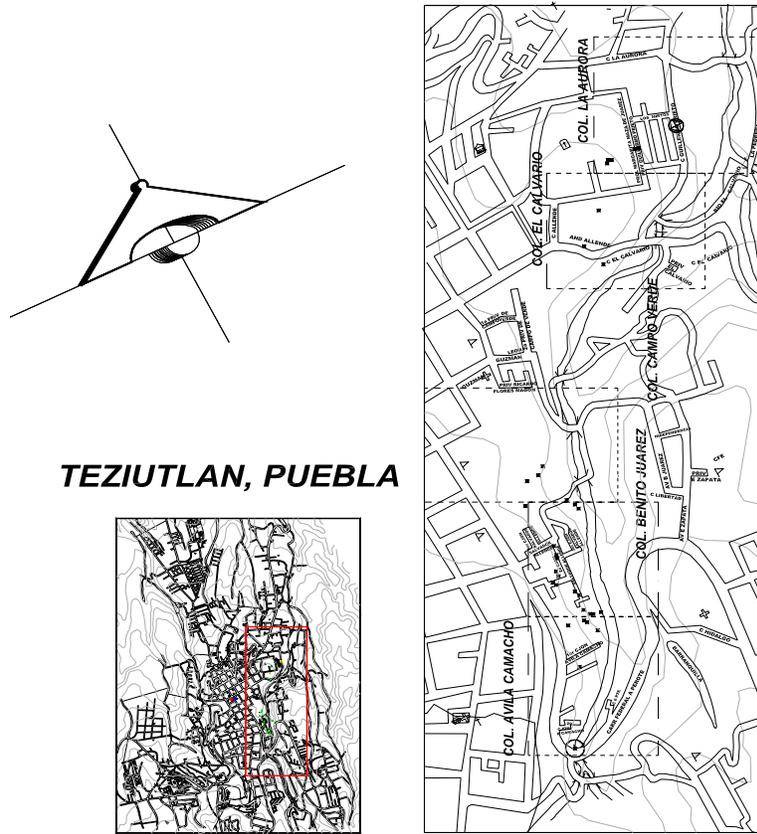
Cabe advertir que el uso de este equipo, si bien es conveniente para los fines de estudio en esta zona, no forma parte de los elementos necesarios para poner en práctica esta metodología. Los lineamientos generales para llevar a cabo la investigación geotécnica de un sitio deben atender a los criterios establecidos en la tabla 5.4.

Sólo se presentan algunos de los gráficos representativos de las resistencias a la penetración obtenidos en las colonias Ávila Camacho, Benito Juárez, El Calvario y La Aurora. Los sitios estudiados fueron georeferenciados y ubicados en la traza urbana que se muestra en la figura 5.30. Los gráficos de las figuras 5.31a, b, y c indican que en sectores de las colonias Á. Camacho, B. Juárez y El Calvario existen materiales superficiales muy resistentes, asociados a las tobas volcánicas de cementación media descritas al inicio de este inciso; no obstante, también se detectaron otros sitios de estas colonias con capas delgadas de suelos blandos (Figs. 5.32a, b y c), los cuales al parecer son producto de los cortes y rellenos realizados para la construcción de terrazas y caminos. Por otra parte, en la colonia La Aurora se detectaron suelos someros mucho más blandos con espesores de 4 a 6 m de profundidad (Figs. 5.33a, b y c). Se trata de formaciones de suelos residuales producto de la alteración físicoquímica de las rocas originales, las cuales se encuentran alteradas hasta unos 5 m de profundidad, misma que corresponde precisamente al fondo de la porción que se deslizó y fluidificó en octubre de 1999.

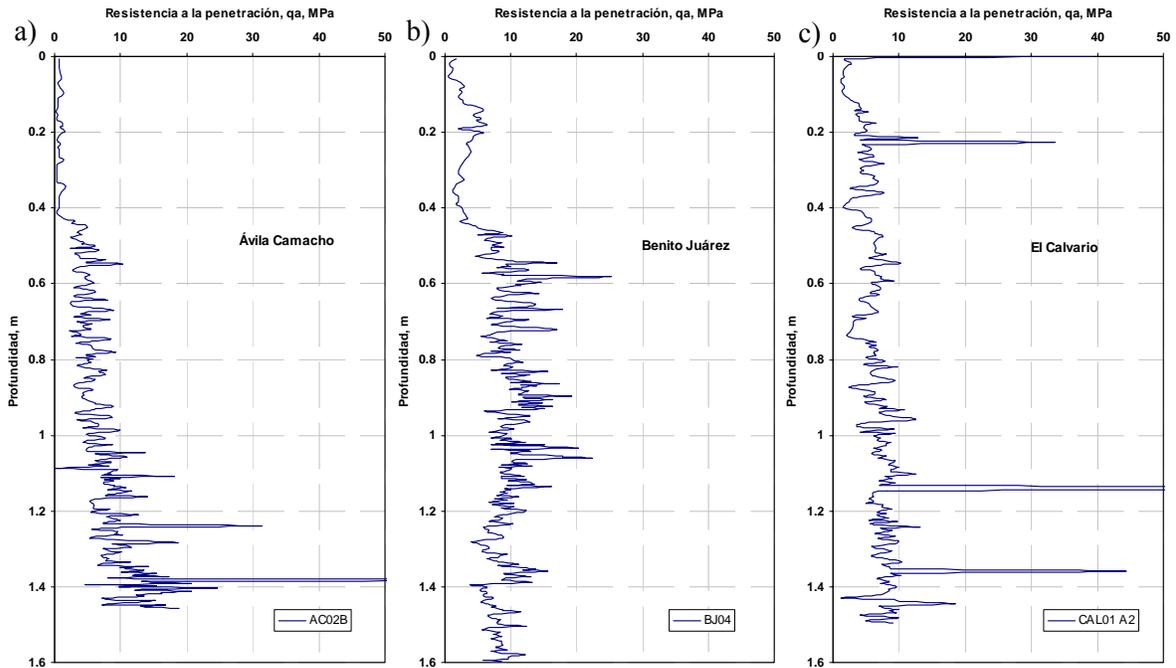
Siguiendo los criterios establecidos en la guía para estimar el peligro de deslizamientos, se verificó la existencia de huecos o volúmenes faltantes que indicaran la ocurrencia de antiguos deslizamientos. Prácticamente en todos los sitios se encontraron evidencias de antiguos deslizamientos de diversos tamaños y volúmenes. Así mismo, se tomó nota de que en amplias zonas de las colonias estudiadas se tienen asentamientos humanos, situación que provoca que las laderas sean más susceptibles a sufrir problemas de inestabilidad, debido a las condiciones adversas que impone el ser humano al construir sus viviendas en las laderas.

### **5.7.3.2 Organización de las labores para las aplicaciones**

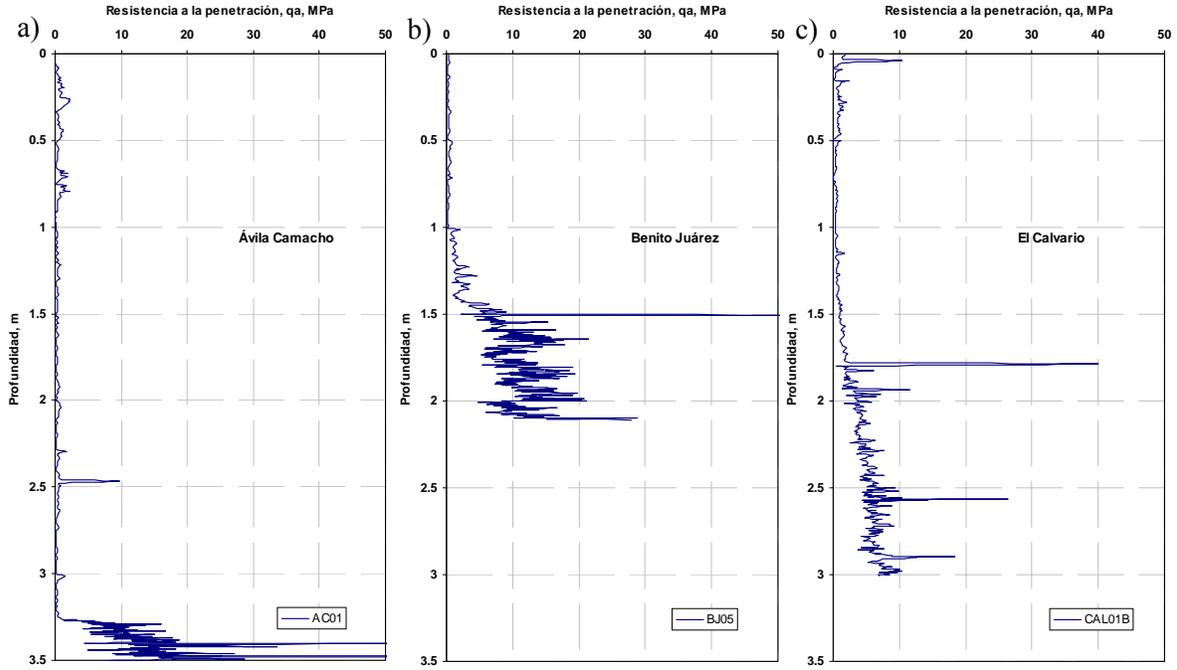
Con la finalidad de verificar la pertinencia del método por diferentes personas con preparaciones distintas, se llevó a cabo la evaluación de los sitios identificados en las cuatro colonias seleccionadas, mediante seis personas. Se contó con la participación de tres pasantes (P1, P2 y P3) de la carrera de Ingeniería Civil, un ingeniero con experiencia en el campo de los deslizamientos de laderas, y para algunos sitios se contó también con la colaboración de dos operativos de Protección Civil de Teziutlán (un licenciado en informática, LI, y un comandante del cuerpo de bomberos, CB).



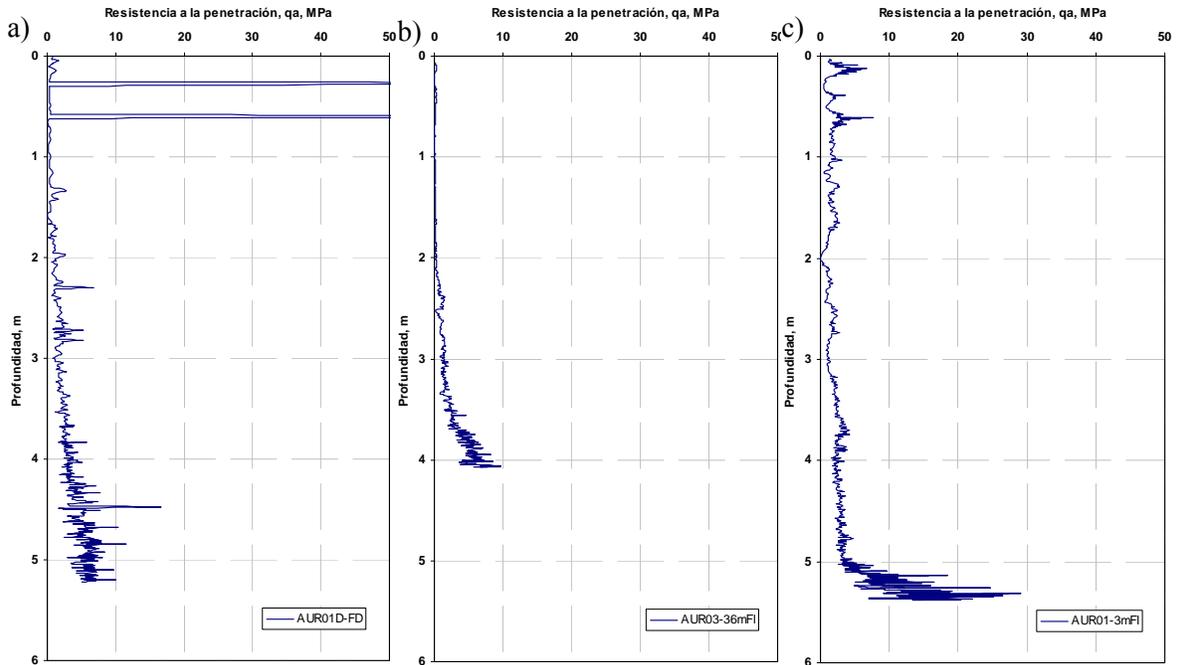
**Figura 5.30** Ubicación de los sitios estudiados en las cuatro colonias analizadas de Teziutlán



**Figura 5.31** Registros de la resistencia a la penetración, que muestran estratos de suelos resistentes, prácticamente superficiales, en las colonias Ávila Camacho, Benito Juárez y El Calvario



**Figura 5.32 Registros de la resistencia a la penetración que muestran capas delgadas superficiales de suelos blandos en las colonias Ávila Camacho, Benito Juárez y El Calvario**



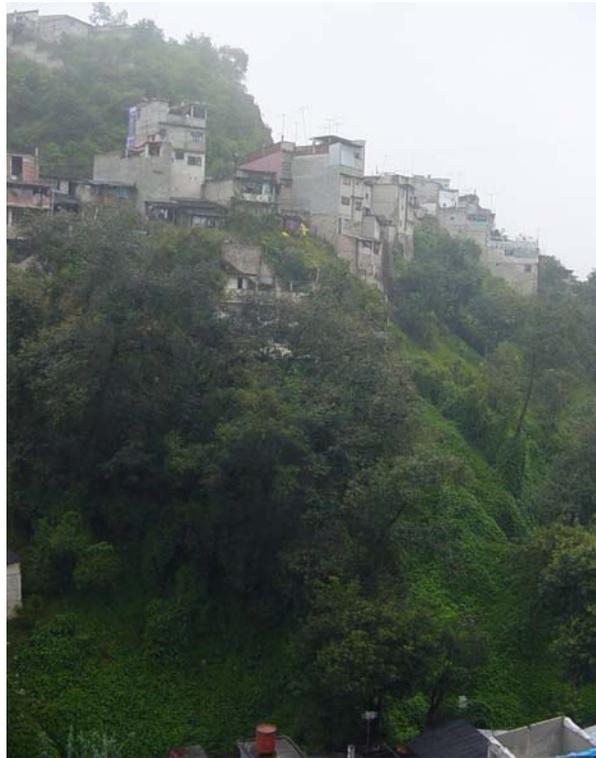
**Figura 5.33 Registros de la resistencia a la penetración obtenidos en la colonia La Aurora**

Antes de salir a campo para aplicar los formatos de evaluación se preparó a los integrantes del grupo explicándoles los aspectos que se toman en cuenta en la metodología y la forma de aplicar el formato de evaluación. Así mismo, se les instruyó en el uso de los sistemas GPS, brújula, distanciómetro y clinómetro para efectuar algunas mediciones directas en el campo, además de la información que se podría recopilar de las cartas topográficas y geológicas a escala 1:50,000 del INEGI. En los apartados siguientes se muestran las evaluaciones colonia por colonia, para luego presentar un análisis comparativo de las evaluaciones personales de cada sitio.

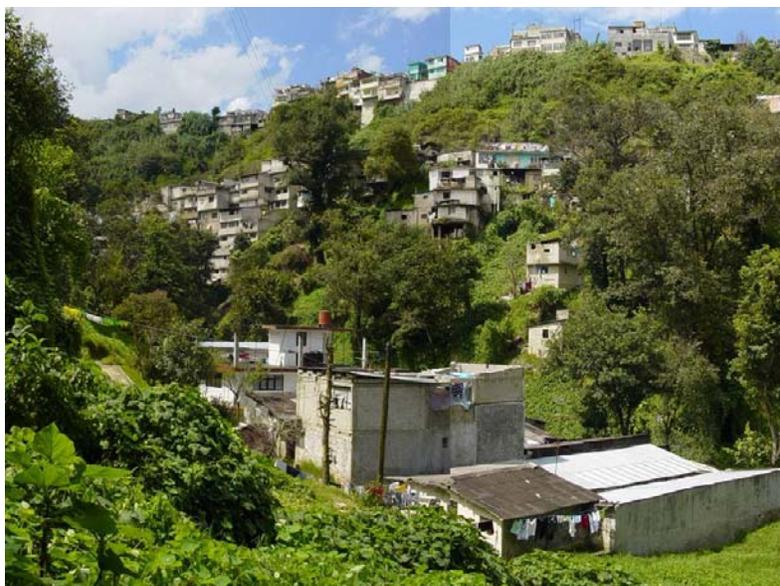
### **5.7.3.3 Evaluaciones en las cuatro colonias**

#### **5.7.3.3.1 Colonia Ávila Camacho**

La ladera es abrupta y con abundante vegetación hacia la parte baja, fig. 5.34. No obstante, existen ahí varios asentamientos humanos, fig. 5.35. Pudieron practicarse algunas pruebas con el penetrómetro portátil cerca de la corona y del hombro de las laderas; así mismo, desde la ladera opuesta (menos abrupta) se realizaron mediciones de alturas y pendientes. En la tabla 5.17 se muestran los resultados de tres evaluaciones realizadas en una ladera de la colonia Ávila Camacho por dos pasantes (P1 y P2) y el ingeniero especialista (IE). Los resultados fueron similares, aunque con algunas diferencias en los aspectos geotécnicos que determinan la diferencia en el resultado final, el cual ubica a la ladera con un peligro que va de alto a muy alto. Dos de los evaluadores (el especialista y un pasante, P1) coinciden en el intervalo que ubica a la ladera con un peligro alto, en tanto que el otro pasante califica a la ladera con el grado más alto de peligro, tabla 5.18. Esta información sería relevante para el personal de Protección Civil de la localidad, ya que permitiría identificar a esta zona como prioritaria para su atención, precisamente ante lluvias intensas.



**Figura 5.34** Ladera en la margen izquierda del río Xoloco, a la altura de la colonia A. Camacho



**Figura 5.35** Vista panorámica de la ladera en la colonia A. Camacho y una fracción de la B. Juárez

**Tabla 5.17** Formato de evaluación para estimar el peligro de deslizamientos en Col. A. Camacho

FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS							
Factor	Intervalos o categorías	Atributo relativo	Observaciones	Calificación			
				P1	P2	IE	
Inclinación de los taludes	Más de 45°	2.0	Estimar el valor medio. Úsese clinómetro.	2.0	2.0	2.0	
	35° a 45°	1.8					
	25° a 35°	1.4					
	15° a 25°	1.0					
	Menos de 15°	0.5					
Altura	Menos de 50 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Usense nivelaciones, planos o cartas topográficas. GPS, niveles dudosos.	1.2	1.2	1.2	
	50 a 100 m	1.2					
	100 a 200 m	1.6					
	Más de 200 m	2.0					
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños.	0.4	0.4	0.4	
	Algunos someros	0.4					
	Sí, incluso con fechas	0.6					
FACTORES GEOTÉCNICOS							
Tipo de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas.	1.5 a 2.5	Vulnerables a la erosión; o suelos de consistencia blanda.	1.0	1.5	1.0	
	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas.	1.2 a 2.0					

Continúa

**Tabla 5.17 Formato de evaluación para estimar el peligro de deslizamientos en Col. A. Camacho**

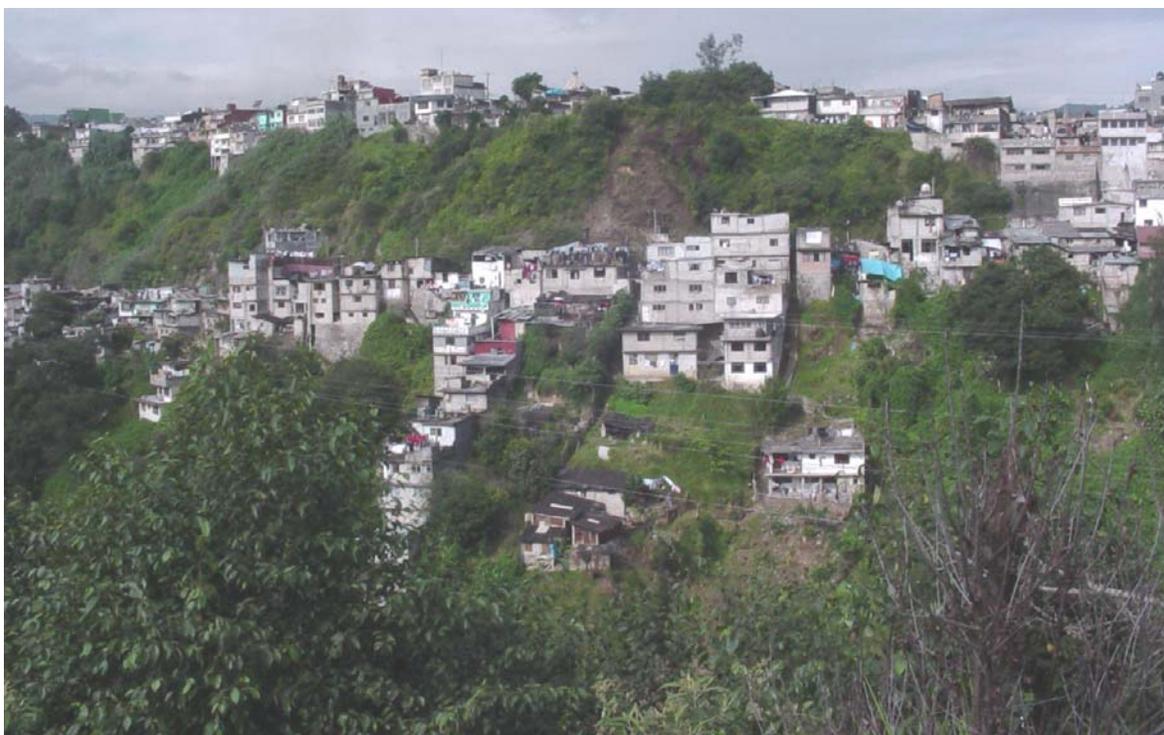
	Suelos arcillosos consistentes o arenos limosos compactos.	0.5 a 1.0	Multiplicar por 1.3 si está agrietado.						
	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.) y tobas competentes.	0.3 a 0.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5, según el grado de meteorización.						
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc.).	0.2 a 0.4	Multiplicar por 2 a 4 según el grado de meteorización.						
	Espesor de la capa de suelo.	Menos de 5 m	0.5	Revisense cortes y cañadas; o bien, recúrrase a exploración manual.	0.5	0.5	0.5		
5 a 10 m		1.0							
10 a 15 m		1.4							
15 a 20 m		1.8							
Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Echado de la discontinuidad.	Menos de 15°	0.3	Considérense planos de contacto entre formaciones, grietas, juntas y planos de debilidad. Ver figura 5.8.5.8.	0.0	0.3	0.3		
		25 a 35°	0.6						
		Más de 45°	0.9						
	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud.	Más de 10°	0.3	Ángulo diferencial positivo si el echado es mayor que la inclinación del talud. Ver figura 5.8.5.9.	0.0	0.3	0.3		
		0° a 10°	0.5						
		0°	0.7						
		0° a -10°	0.8						
	Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud.	Más de 30°	0.2	Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas.	0.2	0.0	0.0		
		10° a 20°	0.3						
		Menos de 5°	0.5						
<b>FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES</b>									
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas contiguas	Inexistentes	0.0	Formas de conchas o de embudo (flujos).	0.5	0.5	0.5			
	Volúmenes moderados	0.5							
	Grandes volúmenes faltantes	1.0							
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana	2.0	Considérense no sólo la ladera, sino también la plataforma en la cima.	2.0	2.0	2.0			
	Cultivos anuales	1.5							
	Vegetación intensa	0.0							
	Vegetación moderada	0.8							
	Área deforestada	2.0							
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático superficial	1.0	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud.	1.0	1.0	1.0			
	Nivel freático inexistente	0.0							
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma	1.0							
SUMATORIA				8.8	10.2	9.2			

Aquí cabe comentar que la presencia de asentamientos humanos en la corona o en el cuerpo de la ladera y la deforestación influyen considerablemente en el resultado final de la evaluación, en relación con los factores geomorfológicos y ambientales. Existen casos documentados (Mendoza y Domínguez 2001 y Mendoza y coautores 2002) en los que estos factores fueron determinantes en dos deslizamientos de laderas ocurridos uno en la ciudad de Tijuana, B. C., y el otro en El Salvador, Centro América.

### 5.7.3.3.2 Colonia Benito Juárez

La topografía del terreno en esta zona es menos abrupta, aunque existen tramos de difícil acceso. Se trata de una de las colonias más densamente pobladas con viviendas desde la corona hasta el pie de las laderas, fig. 5.36. En esta colonia en particular existen áreas con materiales muy resistentes y también capas de suelos blandos. Aquí coincidieron cinco integrantes del equipo de evaluación y se obtuvieron resultados muy interesantes; en la tabla 5.18 se reúnen sus evaluaciones. Si bien existe una ligera diferencia en los criterios adoptados para calificar los factores geotécnicos, el resultado final de la evaluación es muy parecido. Es claro que las diferencias, aunque pequeñas en este apartado, se deben principalmente a que sólo personal con algún conocimiento en el campo de las ciencias de la tierra puede evaluarlo de manera más detallada; pone en evidencia que es deseable que para la aplicación de la metodología se busque la participación de las universidades o institutos de educación superior quienes pueden brindar grupos de trabajo conformados por estudiantes o pasantes de las carreras de ingeniería, topografía, geología o alguna otra relacionada con las ciencias de la tierra. Por otra parte, también llama la atención que en la calificación de los factores topográficos e históricos prácticamente todos coincidieron en las calificaciones, ello se debe principalmente a que son rubros que se pueden determinar de manera directa con equipos de medición portátiles, o con la ayuda de cartas topográficas, y raramente habría discrepancias en las determinaciones de alturas y pendientes.

Pese a las diferencias ya comentadas, los resultados obtenidos por los pasantes de ingeniería fueron muy similares y ubican a los sitios evaluados como de peligro alto, tabla 5.21, en tanto que los operativos de Protección Civil ubican a los sitios en el rubro de peligro muy alto. Como sea que se quieran ver estos resultados, pueden considerarse como aceptables ya que no arrojan discrepancias mayores.



**Figura 5.36** Viviendas en la ladera de la Col. Benito Juárez

**Tabla 5.18 Formato de evaluación para estimar el peligro de deslizamientos en la Col. B. Juárez**

FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS									
Factor	Intervalos o categorías	Atributo relativo	Observaciones	Calificación					
				CB	LI	P1	P2	P3	
Inclinación de los taludes	Más de 45°	2.0	Estimar el valor medio. Úsese clinómetro.	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	
	35° a 45°	1.8							
	25° a 35°	1.4							
	15° a 25°	1.0							
	Menos de 15°	0.5							
Altura	Menos de 50 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Úsense nivelaciones, planos o cartas topográficas. GPS, niveles dudosos.	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
	50 a 100 m	1.2							
	100 a 200 m	1.6							
	Más de 200 m	2.0							
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños.	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	
	Algunos someros	0.4							
	Sí, incluso con fechas	0.6							
FACTORES GEOTÉCNICOS									
Tipo de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas.		1.5 a 2.5	Vulnerables a la erosión; o suelos de consistencia blanda.	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0
	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas.		1.2 a 2.0						
	Suelos arcillosos consistentes o arena limosos compactos.		0.5 a 1.0	Multiplicar por 1.3 si está agrietado.					
	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.) y tobos competentes.		0.3 a 0.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5, según el grado de meteorización.					
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc.).		0.2 a 0.4	Multiplicar por 2 a 4 según el grado de meteorización.					
	Espesor de la capa de suelo.	Menos de 5 m	0.5	Revisense cortes y cañadas; o bien, recúrrase a exploración manual.					
5 a 10 m		1.0							
10 a 15 m		1.4							
15 a 20 m		1.8							
Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Echado de la discontinuidad.	Menos de 15°	0.3	Considérense planos de contacto entre formaciones, grietas, juntas y planos de debilidad. Ver figura 5.8.5.8.	0.6	0.6	0.3	0.3	0.6
		25 a 35°	0.6						
		Más de 45°	0.9						
	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud.	Más de 10	0.3	Ángulo diferencial positivo si el echado es mayor que la inclinación del talud. Ver figura 5.8.5.9.	0.3	0.5	0.5	0.3	0.3
		0° a 10°	0.5						
		0°	0.7						
		0° a -10°	0.8						
		Menos de -10°	1.0						
	Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud.	Más de 30°	0.2	Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas.	0.3	0.3	0.3	0.5	0.3
		10° a 20°	0.3						
Menos de 5°		0.5							

Continúa

**Tabla 5.18 Formato de evaluación para estimar el peligro de deslizamientos en la Col. B. Juárez**

FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES								
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas contiguas	Inexistentes	0.0	Formas de conchas o de embudo (flujos).	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0
	Volúmenes moderados	0.5						
	Grandes volúmenes faltantes	1.0						
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana	2.0	Considérese no sólo la ladera, sino también la plataforma en la cima.	2.0	2.0	1.5	2.0	2.0
	Cultivos anuales	1.5						
	Vegetación intensa	0.0						
	Vegetación moderada	0.8						
	Área deforestada	2.0						
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático superficial	1.0	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud.	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0
	Nivel freático inexistente	0.0						
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma	1.0						
SUMATORIA				10.8	10.5	9.2	9.7	9.3

### 5.7.3.3 Colonia El Calvario

Las laderas en esta colonia son de pendiente moderada, con materiales arenosos medianamente compactos y cementados que presentan una resistencia alta en estado natural. Los asentamientos urbanos no son tan densos aquí, pero sí se han extendido hacia la corona de la ladera; se observa vegetación abundante en la misma, fig. 5.37, lo que contribuye a su estabilidad. Por la configuración del terreno se aplicó el formato de evaluación en dos secciones de esta misma colonia, tabla 5.21. Los resultados obtenidos por cada integrante fueron muy similares y ubicaron a la zona como de peligro bajo a moderado, tabla 5.19.

**Figura 5.37 Vista panorámica de la Col. El Calvario**

**Tabla 5.19 Formato de evaluación para estimar el peligro de deslizamientos en la Col. El Calvario**

FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS									
Factor	Intervalos o categorías		Atributo relativo	Observaciones	Calificación				
					P2	IE		P2	IE
Inclinación de los taludes	Más de 45°		2.0	Estimar el valor medio. Úsese clinómetro.	1.8	1.8		1.4	1.4
	35° a 45°		1.8						
	25° a 35°		1.4						
	15° a 25°		1.0						
	Menos de 15°		0.5						
Altura	Menos de 50 m		0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Usense nivelaciones, planos o cartas topográficas. GPS, niveles dudosos.	1.2	1.2		1.2	1.2
	50 a 100 m		1.2						
	100 a 200 m		1.6						
	Más de 200 m		2.0						
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	No se sabe		0.3	Reseñas verosímiles de lugareños.	0.6	0.4		0.6	0.4
	Algunos someros		0.4						
	Sí, incluso con fechas		0.6						
FACTORES GEOTÉCNICOS									
Tipo de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas.		1.5 a 2.5	Vulnerables a la erosión; o suelos de consistencia blanda.	0.6	0.8		0.6	0.3
	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas.		1.2 a 2.0						
	Suelos arcillosos consistentes o arenos limosos compactos.		0.5 a 1.0	Multiplicar por 1.3 si está agrietado.					
	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.) y tobos competentes.		0.3 a 0.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5, según el grado de meteorización.					
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc.).		0.2 a 0.4	Multiplicar por 2 a 4 según el grado de meteorización.					
	Espesor de la capa de suelo.	Menos de 5 m	0.5	Revisense cortes y cañadas; o bien, recúrrase a exploración manual.					
5 a 10 m		1.0							
10 a 15 m		1.4							
15 a 20 m		1.8							
Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Echado de la discontinuidad.	Menos de 15°	0.3	Considérense planos de contacto entre formaciones, grietas, juntas y planos de debilidad. Ver figura 5.8.5.8.	0.4	0.0		0.3	0.0
		25 a 35°	0.6						
		Más de 45°	0.9						
	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud.	Más de 10	0.3	Ángulo diferencial positivo si el echado es mayor que la inclinación del talud. Ver figura 5.8.5.9.	0.5	0.0		0.5	0.0
		0° a 10°	0.5						
		0°	0.7						
		0° a -10°	0.8						
	Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud.	Menos de -10°	1.0						
		Más de 30°	0.2	Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas.	0.5	0.0		0.5	0.0
		10° a 20°	0.3						
	Menos de 5°	0.5							

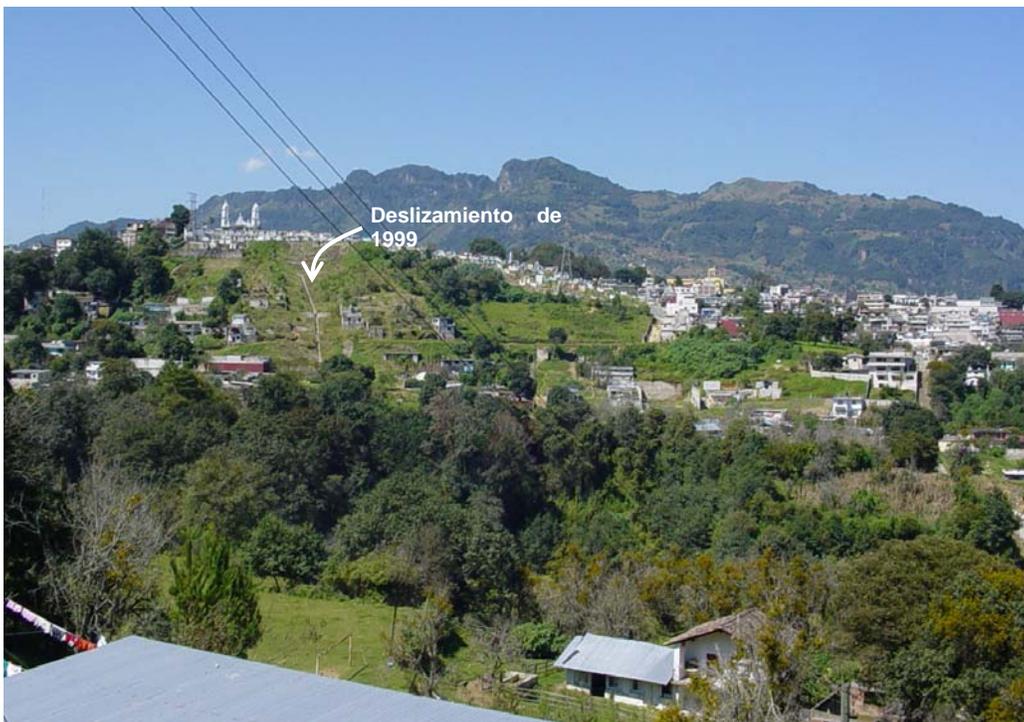
Continúa

**Tabla 5.19 Formato de evaluación para estimar el peligro de deslizamientos en la Col. El Calvario**

FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES									
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas contiguas	Inexistentes	0.0	Formas de conchas o de embudo (flujos).	0.0	1.0		0.0	0.5	
	Volúmenes moderados	0.5							
	Grandes volúmenes faltantes	1.0							
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana	2.0	Considérese no sólo la ladera, sino también la plataforma en la cima.	2.0	2.0		2.0	2.0	
	Cultivos anuales	1.5							
	Vegetación intensa	0.0							
	Vegetación moderada	0.8							
	Área deforestada	2.0							
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático superficial	1.0	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud.	0.0	0.0		0.0	0.0	
	Nivel freático inexistente	0.0							
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma	1.0							
SUMATORIA				8.1	7.7		7.6	6.3	
				CAL02		CAL01			

#### 5.7.3.3.4 Colonia La Aurora

Como en los otros casos la colonia está ubicada en la margen izquierda del río Xoloco, en una zona que transita hacia terrenos menos inclinados. Los materiales son más blandos y están formados por capas de suelos residuales. La densidad de viviendas es alta, encontrándose éstas en casi toda la ladera, fig. 5.38, excepto en la porción contigua al sitio donde ocurrió el deslizamiento y flujo de octubre de 1999, tal como se distingue en esta fotografía.

**Figura 5.38 Vista panorámica de la ladera en la Col. La Aurora**

Las evaluaciones realizadas se reúnen en la tabla 5.20. Aunque la ladera es menos inclinada que en el resto de las colonias evaluadas, los resultados indican que el peligro es de alto a muy alto, tabla 5.21. Ello está determinado por el tipo y condiciones de los materiales térreos que forman la ladera, fundamentalmente por su naturaleza residual de la superficie del terreno y hasta una superficie sensiblemente paralela a ésta; Dicha masa es la que no sólo deslizó sino que se fluidificó, vaciándose pendiente abajo; su contenido natural de agua muy cercano al límite líquido. Este es un ejemplo de que en este tipo de suelos, las superficies de deslizamiento se ubican con frecuencia relativamente cerca y paralelas a la superficie original del terreno.

**Tabla 5.20 Formato de evaluación para estimar el peligro de deslizamientos en la Col. La Aurora**

FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS														
Factor	Intervalos o categorías	Atributo relativo	Observaciones	Calificación										
				P2	IE									
Inclinación de los taludes	Más de 45°	2.0	Estimar el valor medio. Úsese clinómetro.	1.4	1.4									
	35° a 45°	1.8												
	25° a 35°	1.4												
	15° a 25°	1.0												
	Menos de 15°	0.5												
Altura	Menos de 50 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Usense nivelaciones, planos o cartas topográficas. GPS, niveles dudosos.	1.2	1.2									
	50 a 100 m	1.2												
	100 a 200 m	1.6												
	Más de 200 m	2.0												
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños.	0.6	0.6									
	Algunos someros	0.4												
	Sí, incluso con fechas	0.6												
FACTORES GEOTÉCNICOS														
Tipo de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas.		1.5 a 2.5	Vulnerables a la erosión; o suelos de consistencia blanda.	0.8	1.2								
	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas.		1.2 a 2.0											
	Suelos arcillosos consistentes o areno limosos compactos.		0.5 a 1.0	Multiplicar por 1.3 si está agrietado.										
	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.) y tobas competentes.		0.3 a 0.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5, según el grado de meteorización.										
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc.).		0.2 a 0.4	Multiplicar por 2 a 4 según el grado de meteorización.										
	Espesor de la capa de suelo.	Menos de 5 m	0.5	Revisense cortes y cañadas; o bien, recúrrase a exploración manual.						0.5	0.5			
		5 a 10 m	1.0											
10 a 15 m		1.4												
15 a 20 m		1.8												

Continúa

**Tabla 5.20 Formato de evaluación para estimar el peligro de deslizamientos en la Col. La Aurora**

Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Echado de la discontinuidad.	Menos de 15°	0.3	Considérense planos de contacto entre formaciones, grietas, juntas y planos de debilidad. Ver figura 5.8.5.8.	0.9	0.6					
		25 a 35°	0.6								
		Más de 45°	0.9								
	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud.	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud.	Más de 10	0.3	Ángulo diferencial positivo si el echado es mayor que la inclinación del talud. Ver figura 5.8.5.9.	0.5	0.7				
			0° a 10°	0.5							
			0°	0.7							
			0° a -10°	0.8							
	Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud.	Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud.	Más de 30°	0.2	Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas.	0.5	0.5				
			10° a 20°	0.3							
			Menos de 5°	0.5							
<b>FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES</b>											
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas contiguas	Inexistentes		0.0	Formas de conchas o de embudo (flujos).	0.5	0.5					
	Volúmenes moderados		0.5								
	Grandes volúmenes faltantes		1.0								
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana		2.0	Considérense no sólo la ladera, sino también la plataforma en la cima.	2.0	2.0					
	Cultivos anuales		1.5								
	Vegetación intensa		0.0								
	Vegetación moderada		0.8								
	Área deforestada		2.0								
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático superficial		1.0	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud.	1.0	1.0					
	Nivel freático inexistente		0.0								
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma		1.0								
SUMATORIA					9.9	10.0					

En la tabla 5.21 se han reunido los resultados de las evaluaciones en cuatro colonias de Teziutlán, Puebla, que corresponden a las calificaciones incluidas en las tablas 5.17 a 5.20. Puede comprobarse la muy razonable consistencia de éstos, a pesar de ser realizados por individuos con preparaciones diferentes; no obstante, se reitera la conveniencia de la participación de profesionales o estudiantes de ingeniería civil o de otras disciplinas de ciencias de la tierra.

**Tabla 5.21 Resumen de las evaluaciones del peligro de deslizamiento de laderas en Teziutlán, Pue.**

Peligro	Col. Á. Camacho			Col. B. Juárez					Col. El Calvario				Col. La Aurora		
	P1	P2	IE	CB	LI	P1	P2	P3	CAL02		CAL01		P2	IE	
									P2	IE	P2	IE			
1 Muy bajo															
2 Bajo													6.3		
3 Moderado									8.1	7.7	7.6				
4 Alto	8.8		9.2			9.2	9.7	9.3						9.9	10.0
5 Muy alto		10.2		10.8	10.5										

## 5.8 RECAPITULACIÓN

La estimación del peligro de deslizamientos en laderas requiere del conocimiento de los factores que contribuyen a su ocurrencia. Éstos pueden englobarse en internos y externos, siendo los primeros los relativos a las propiedades de los suelos y rocas que constituyen la ladera, incluyendo sus discontinuidades o planos de debilidad, así como su inclinación y altura. Las lluvias intensas y prolongadas, los sismos, la actividad volcánica, la erosión... y el hombre, son los factores externos y juegan el papel de detonadores de caídos, deslizamientos y flujos de materiales térreos en laderas.

Las formaciones rocosas muy intemperizadas que por ello se convierten en suelos residuales, son con frecuencia proclives a los deslizamientos y flujos, ante lluvias muy intensas y prolongadas. Se expuso en este capítulo información disponible acerca de los umbrales de lluvia horaria o lluvia diaria, más allá de los cuales ocurren deslizamientos en laderas de México y otros sitios del mundo. Ante sismos intensos, los depósitos volcánicos de suelos granulares, particularmente en condición saturada y suelta, son susceptibles de generar flujos de lodo muy destructivos. La identificación de materiales y la estimación de características geotécnicas juegan un papel relevante en la definición de la amenaza y el peligro de deslizamiento de laderas. Influyen también los rasgos geomorfológicos, los factores ambientales y los antecedentes regionales de deslizamientos; se describieron aquí las actividades de campo y los criterios para investigar estos aspectos.

Se propuso en este capítulo una metodología para estimar cualitativamente el peligro de deslizamiento basada en la asignación de valores numéricos a cada uno de los factores influyentes. Tales factores reúnen aspectos topográficos, geotécnicos, históricos, geomorfológicos y ambientales, y han sido englobados en un formato de evaluación de campo que los toma en cuenta según sus atributos. En ese formato se resume la metodología que surgió como una necesidad de las autoridades de Protección Civil y de la sociedad en general, de contar con un documento teórico-práctico que les sirviera como guía para elaborar sus mapas de peligros y riesgos ante el problema de la inestabilidad de laderas. En función de la suma total de las calificaciones asignadas a cada uno de los factores, se establecen cinco grados del peligro de deslizamiento, que van desde uno muy bajo hasta uno muy alto.

Los ejemplos de aplicación que se han mostrado en este capítulo indican que la metodología es pertinente y coherente. Se puso en práctica en la ciudad de Teziutlán, Puebla como proyecto piloto, dado que ahí los deslizamientos de laderas han ocurrido con cierta frecuencia y han ocasionado pérdida de vidas humanas y daños materiales de consideración. Quizás unos de los aspectos más relevantes en la aplicación de este método es que diferentes personas, con formaciones académicas distintas, pueden llegar a resultados muy similares. Ello se debe a la fácil aplicación del formato de evaluación, previo a un entrenamiento en el que se instruye a las personas que harán uso de la metodología. No obstante, se recomienda que las personas designadas para aplicar el método, sean ingenieros civiles, profesionistas o estudiantes que tengan algún conocimiento de geología o de ciencias de la tierra. Si bien el desarrollo de esta metodología se basó en las experiencias de deslizamientos de laderas ocurridos tanto en México como en otras partes del mundo, los valores propuestos para calificar los diversos atributos de una ladera deben considerarse sólo indicativos, y deberán revisarse regionalmente para irse adecuando atendiendo a las experiencias de deslizamientos pasados y los que ocurran en el futuro.

Se estima que esta metodología puede ser parte de la que deberá adoptarse para generar mapas regionales de peligros y riesgos, en combinación con sistemas de información geográfica. Para producir los mapas de riesgo deberán involucrarse los elementos en riesgo, así como el análisis de su vulnerabilidad al impacto de los deslizamientos posibles; en este capítulo se han descrito los fundamentos y consideraciones necesarias para generar esa información.

## REFERENCIAS

- Alonso, E. E., Lloret, A. y Romero, E., “Rainfall induced deformations of road embankments”, *Landslides, Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. and Field Trip on Landslides*, Granada, España, Balkema, pp. 97-108, 1996.
- Brand, E. W., “Predicting the performance of residual soil slopes”, *Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechs. and Foundation Engrg.*, San Francisco, Balkema, Vol. 5, pp. 2541-2578, 1985.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, SEGOB, Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, Serie: Atlas Nacional de Riesgos, CENAPRED, México 2004.
- Cruden, D. M., “A simple definition of landslide”, *Bull. Int. Assoc. of Engrg. Geology*, No. 43, pp. 27-29, 1991.
- Cruden, D. M., y Varnes, D. J. “Landslide types and Processes”, Cap. 3 “Landslides: Investigation and Mitigation”, Eds. Turner, A. K. y Shuster, R. L. *Reporte Especial*, No. 247, Transport Research Board, National Research Council, Washintong D.C. 1996.
- Fell, R., “Landslide risk assessment and acceptable risk”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 261-272, 1994.
- García, F., Fuentes, O. A. y Navarrete, S. L., “Análisis semicualitativo del comportamiento de las laderas en la ciudad de Tijuana durante la temporada de lluvias”, Informe RH/02/99 del CENAPRED, México, 1999.
- Geotechnical Control Office, Engineering Development Department, *Geotechnical Manual for Slopes*, Government Publication Centre, Hong Kong, 295 pp, 1984.
- Hungr, O., “Some methods of landslide hazard intensity mapping”, *Landslide risk assessment*, Cruden & Fell (eds), Balkema, pp. 215-226, 1997.
- IUGS Working Group on Landslides, “Quantitative risk assessment for slopes and landslides – The State of the Art”, *Proc. of the Int. Workshop on Landslide Risk Assessment*, Honolulu, Balkema, pp. 3-12, 1997.
- Leroi, E., “Landslide risk mapping: Problems, limitations and developments”, *Landslide risk assessment*, Cruden & Fell (eds), Balkema, pp. 239-250, 1997.
- Mendoza, M. J. y Noriega, I., Deslizamientos de suelos y rocas en Teziutlán, Puebla, provocados por las intensas lluvias de inicios de octubre de 1999, Informe del CENAPRED a la Coordinación General de Protección Civil, SEGOB, noviembre de 1999.
- Mendoza, M. J. y Noriega, I., “Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Puebla, provocados por las lluvias intensas de octubre de 1999”, *Memorias de la XX Reunión Nal. de Mec. de Suelos*, Puebla, Pue., SMMS, Vol. 1, pp. 49-58, México, 2000.
- Mendoza, M. J., Domínguez, L. y Melara, E. E., “Deslizamiento y flujo de tierras en una ladera debidos a un sismo: el caso de “Las Colinas”, Santa Tecla, El Salvador C. A., del 13 de enero del 2001”, *Memorias de la XXI Reunión Nal. de Mec. de Suelos*, Querétaro Qro., SMMS, Vol. 1, pp. 399-408, México, 2002.
- Mendoza, M. J., Domínguez, L., Noriega, I. y Guevara, E., Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento, Informe Técnico del CENAPRED, 78 pp., México, 2002.

Mendoza M. J., Domínguez L. y Alcocer, S., “Deslizamientos de tierras en las laderas de la colonia Defensores de Baja California, Tijuana B. C.”. Sustento técnico para la declaratoria de desastre natural, Informe preparado por el CENAPRED para la Coordinación General de Protección Civil, 15 pp., México, 2002.

Mendoza, M. J., Noriega, I., y Domínguez, L. "Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Pue., provocados por las lluvias intensas de octubre de 1999". Informe Interno del CENAPRED, preparado para la Subdirección de Estructuras y Geotecnia, 2002.

Morgenstern, N. R., “Toward landslide risk assessment in practice”, *Proc. of the Int. Workshop on Landslide Risk Assessment*, Honolulu, Balkema, pp. 15-23, 1997.

Peck, R. B., “Stability of natural slopes”, *Journal of the Soil Mechs. and Foundations Div.*, ASCE, Vol. 93, No. SM4, pp. 403-417, 1967.

Schuster, R. L., “The 25 most catastrophic landslides of the 20<sup>th</sup> Century”, *Landslides, Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. and Field Trip on Landslides*, Granada, España, Balkema, pp. 53-62, 1996.

Smith G. N. & Pole, E. L., *Elements of foundation design*, Garland STPM press, 1980.

Suarez, J., *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, Instituto de Investigaciones Sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda., Bucaramanga Colombia, 548 pp., 1998.

Whitman, R., “Evaluating calculated risk in geotechnical engineering”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No. 2, pp. 145-187, 1994.



**Secretaría de Gobernación**  
Centro Nacional de Prevención de Desastres  
Dirección General de Protección Civil

Av. Delfín Madrigal No. 665,  
Col. Pedregal de Sto. Domingo,  
Del. Coyoacán  
México D.F., C.P. 04360

[www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)