



Serie: Atlas Nacional de Riesgos

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

Fenómenos Geológicos



SEGURIDAD
SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CNPC
COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL



CENAPRED
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

SECRETARÍA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA

Rosa Icela Rodríguez Velázquez

SECRETARIA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA

Laura Velázquez Alzúa

COORDINADORA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL

Enrique Guevara Ortiz

DIRECTOR GENERAL CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES (CENAPRED)

1ª edición, noviembre 2006

Versión electrónica, 2021

Ciudad de México

© **SECRETARÍA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA**

Avenida Constituyentes 947, edificio B, planta alta

Colonia Belén de las Flores

Álvaro Obregón, C. P. 01110, Ciudad de México

Teléfono: 55 1103 6000

<https://www.gob.mx/sspc>

© **CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

Av. Delfín Madrigal 665,

Col. Pedregal de Santo Domingo,

Coyoacán, C. P. 04360, Ciudad de México

Teléfono: 55 5424 6100

www.gob.mx/cenapred

Comentarios: editor@cenapred.unam.mx

©Autores:

Integración de información para la estimación del peligro sísmico.

Carlos Antonio Gutiérrez Martínez.

Elaboración de mapas de peligros volcánicos.

Alicia Martínez Bringas, Ángel Gómez Vázquez y Servando De la Cruz-Reyna.

Metodología para la evaluación de peligros por cenizas volcánicas.

Alicia Martínez Bringas y Ángel Gómez Vázquez.

Metodología para la evaluación de peligros por lahares.

Alicia Martínez Bringas, Ángel Gómez Vázquez y Teófilo Hernández Alcántara.

Estimación de la amenaza y el riesgo de deslizamientos en laderas.

Manuel J. Mendoza López y Leobardo Domínguez Morales.

Revisores: Roberto Quaas Weppen, Enrique Guevara Ortiz, Tomás A. Sánchez Pérez y

Carlos Gutiérrez Martínez.

ISBN: 970-628-902-X

Edición: La edición estuvo a cargo de los autores bajo la coordinación de

Violeta Ramos Radilla.

Portada: María José Aguas Ovando y Demetrio Vázquez Sánchez.

Derechos reservados conforme a la ley.

IMPRESO EN MÉXICO. PRINTED IN MEXICO

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE
LOS AUTORES.



Serie: Atlas Nacional de Riesgos

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

Fenómenos Geológicos



SEGURIDAD
SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CNPC
COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL



CENAPRED
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

CONTENIDO

PRÓLOGO.....	7
PRESENTACIÓN.....	11
I. INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO	
RESUMEN.....	13
1.1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1.1. Antecedentes.....	13
1.2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SISMICIDAD Y PELIGRO POR SISMO.....	14
1.2.1. Zonas sísmicas en México.....	14
1.2.2. Intensidad Sísmica.....	15
1.2.3. Magnitud Sísmica.....	16
1.3. PELIGRO Y RIESGO POR SISMO.....	17
1.4. ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO.....	18
1.5. PARÁMETROS BÁSICOS DE PELIGRO SÍSMICO.....	19
1.5.1. Instrumentación Sísmica.....	20
1.5.2. Tsunamis.....	20
1.5.3. Licuación de arenas.....	20
1.6. FUENTES ESENCIALES DE INFORMACIÓN.....	22
1.6.1. Observatorios Sismológicos y Centros de Investigación.....	22
1.6.2. Mapas.....	23
1.6.3. Investigaciones bibliográficas recomendadas.....	32
1.6.4. Catálogos de sismos y tsunamis.....	32
1.7. ESTUDIOS DE SITIO.....	37
1.7.1. Introducción.....	37
1.7.2. Estudios de geología superficial.....	38
1.7.3. Zonificación geotécnica de valles aluviales.....	39
1.7.4. Microzonificación sísmica.....	40
ALGUNAS APLICACIONES PARA EL ESTADO DE COLIMA.....	45
CONCLUSIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	50
GLOSARIO.....	53
ANEXOS.....	57
II. ELABORACIÓN DE MAPAS DE PELIGROS VOLCÁNICOS	
RESUMEN.....	123
2.1. INTRODUCCIÓN.....	123
2.1.1. Volcanes de México.....	124
2.2. IDENTIFICACIÓN DEL PELIGRO.....	128
2.2.1. Definiciones de conceptos relativos a los volcanes.....	128
2.2.2. Las erupciones volcánicas.....	129
2.2.3. Tipos de vulcanismo y erupciones.....	130

2.3.	PELIGROS VOLCÁNICOS	134
2.4	DIAGNÓSTICO DE PELIGROS VOLCÁNICOS.....	138
2.4.1	Identificación de un volcán activo	139
2.5	EVALUACIÓN DE PELIGRO VOLCÁNICO	140
2.5.1	Probabilidad de ocurrencia del peligro	141
2.5.2	Mapas de peligros volcánicos.....	143
2.5.3	Criterios de evaluación de la vulnerabilidad	145
2.5.4	Riesgo volcánico	148
2.5.5	Metodología a seguir para determinar la peligrosidad volcánica en un área.....	148
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	156
	GLOSARIO	157
	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	162

III. EVALUACIÓN DE PELIGROS POR CENIZAS VOLCÁNICAS

	RESUMEN.....	165
3.1	INTRODUCCIÓN.....	165
3.2.	CENIZA VOLCÁNICA O TEFRA	166
3.2.1	Efectos de la ceniza volcánica.....	167
3.2.2	Características de la dispersión de cenizas volcánicas	175
3.3.	SIMULADORES DE DISPERSIÓN DE CENIZAS.....	176
3.3.1	Modelaciones o simulaciones por computadora.....	176
3.3.2	Aspectos cartográficos	177
3.3.3	Capas de información.....	178
3.3.4	Escenarios de depósitos de caída de ceniza.....	179
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	183
	BIBLIOGRAFÍA.....	184

IV. EVALUACIÓN DE PELIGROS POR LAHARES

	RESUMEN.....	187
4.1	INTRODUCCIÓN.....	187
4.2.	LOS LAHARES COMO DESASTRE NATURAL.....	188
4.3.	CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS LAHARES O FLUJOS DE LODO	189
4.3.1	Mecanismos de activación de los lahares	190
4.3.2	Volumen, velocidad y caudal de los lahares.....	194
4.3.3	Componentes de un lahar	196
4.4	MODELACIÓN NUMÉRICA: PROGRAMA LAHARZ	198
4.4.1	Cartografía base.....	199
4.4.2	Mapas de escenarios de peligro por lahares.....	200
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	203
	BIBLIOGRAFÍA.....	204

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

RESUMEN.....	207
5.1 INTRODUCCIÓN.....	207
5.1.1 Alcances y objetivos.....	209
5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS EN LADERAS Y CONCEPTOS SOBRE AMENAZA, PELIGRO Y RIESGO.....	210
5.2.1 Los tres tipos básicos de deslizamientos.....	210
5.2.2 Terminología y conceptos usados en el campo de deslizamiento de laderas.....	212
5.3 FACTORES QUE DETERMINAN LA INESTABILIDAD DE LADERAS.....	216
5.3.1 Factor de seguridad.....	216
5.3.2 Factores internos.....	217
5.3.3 Factores externos.....	219
5.3.4 Causas humanas o antrópicas.....	226
5.4 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA PARA IDENTIFICAR EL FENÓMENO DE DESLIZAMIENTOS.....	226
5.4.1 Incertidumbres y enfoque cualitativo de análisis.....	226
5.4.2 Investigación de la historia de desastres y reconocimiento de campo.....	228
5.4.3 Rasgos geológicos y geomorfológicos que propician inestabilidades.....	229
5.4.4 Reconocimiento de campo.....	230
5.5 CRITERIOS PARA ESTIMAR EL PELIGRO DE DESLIZAMIENTOS.....	234
5.5.1 Un criterio simple para identificar la amenaza de deslizamiento.....	234
5.5.2 Proceso para la estimación del peligro y del riesgo.....	234
5.5.3 Estimación de atributos geotécnicos, topográficos y ambientales.....	235
5.5.4 Estimación del peligro de deslizamiento de una ladera.....	238
5.5.5 Velocidad y distancia de recorrido.....	239
5.5.6 Intensidad del fenómeno de deslizamiento.....	240
5.5.7 Análisis de la probabilidad de deslizamientos y de su intensidad.....	240
5.5.8 Influencia de los factores externos en el peligro global.....	243
5.6 CONSIDERACIONES PARA ESTIMAR EL RIESGO DE DESLIZAMIENTO DE LADERAS.....	246
5.6.1 Enfoques del análisis del riesgo.....	246
5.6.2 Determinación de los elementos en riesgo.....	246
5.6.3 Estimación de vulnerabilidades.....	246
5.6.4 Análisis del riesgo.....	247
5.6.5 Administración del riesgo.....	247
5.7 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR EL PELIGRO Y EL RIESGO DE DESLIZAMIENTOS EN LADERAS: CASO TEZIUTLÁN.....	247
5.7.1 Consideraciones iniciales para la aplicación de la metodología.....	247
5.7.2 Deslizamientos ocurridos en Teziutlán, Pue. durante las lluvias intensas de octubre de 1999.....	248
5.7.3 Estimación del peligro y el riesgo de deslizamientos en cuatro colonias de Teziutlán, Pue.....	262
5.8 RECAPITULACIÓN.....	278
REFERENCIAS.....	279

PRÓLOGO

En la agenda nacional de la protección civil, la prevención de desastres ha tomado una gran relevancia, debido principalmente a la diversidad de fenómenos que pueden causar desastres en nuestro territorio. Así, se reconoce la importancia de establecer estrategias y programas de largo alcance enfocados a prevenir y reducir sus efectos, y no sólo focalizar recursos para la atención de las emergencias y la reconstrucción.

Sin duda en los últimos años se ha avanzado en este sentido; sin embargo, los logros son aún insuficientes y es indispensable invertir más recursos para transitar lo más pronto posible de un esquema fundamentalmente reactivo a uno preventivo. Esta nueva filosofía permitirá garantizar no sólo una sociedad más preparada y segura, sino un país menos vulnerable frente a los fenómenos potencialmente destructivos, sean éstos de origen natural o antropogénico.

La estrategia de la prevención establece tres pasos fundamentales. Primero, conocer los peligros y amenazas para saber dónde, cuándo y cómo nos afectan. Segundo, identificar y establecer en el ámbito nacional, estatal, municipal y comunitario, las características y los niveles actuales de riesgo ante esos fenómenos. Por último, diseñar acciones y programas para mitigar y reducir oportunamente estos riesgos a través del reforzamiento y adecuación de la infraestructura, mejorando normas y procurando su aplicación, y finalmente, preparando e informando a la población para que sepa cómo actuar antes, durante y después de una contingencia.

Modernas tecnologías, combinadas con nuevas visiones y esquemas de coordinación y comunicación, permiten ahora monitorear y detectar muchos de los fenómenos perturbadores y prevenir anticipadamente sus efectos, facilitando la toma de decisiones y la implementación de medidas para disminuir sus efectos, particularmente en evitar la pérdida de vidas humanas. Esta transición hacia la prevención se ha sustentado fundamentalmente en el conocimiento sobre el origen, manifestación e impacto de los fenómenos. Este conocimiento permite actuar para algunos fenómenos en forma temprana, con más eficacia operativa, buscando minimizar la pérdida de vidas humanas y bienes materiales. Sin embargo, apenas se han dado los primeros pasos en la prevención, aunque firmes, de ninguna manera son suficientes. El siguiente paso decidido que se tiene que dar es en la valoración más rigurosa del riesgo.

Equivocadamente se tiene la percepción de que los desastres se deben exclusivamente a los peligros. Se suele señalar, por ejemplo, al huracán o al sismo como el responsable de las pérdidas durante un desastre o emergencia. En realidad es la sociedad en su conjunto la que se expone con su infraestructura física, organización, preparación y cultura característica al encuentro de dichos fenómenos, manifestando usualmente diversos grados de vulnerabilidad en estos aspectos. Se concluye por tanto, que los desastres no son naturales, es decir, son producto de condiciones de vulnerabilidad y exposición derivados en gran medida por aspectos socioeconómicos y de desarrollo no resueltos, como elevados índices de construcciones informales, marginación, pobreza, escaso ordenamiento urbano y territorial, entre otros.

Hablar de prevención necesariamente es hablar de riesgo. Los desastres se dan por la presencia de una condición de riesgo, como resultado de la acción de un fenómeno perturbador sobre un bien expuesto.

El riesgo de desastres, entendido como la probabilidad de pérdida, depende de dos factores fundamentales que son el peligro y la vulnerabilidad. Comprender y cuantificar los peligros, evaluar la vulnerabilidad y con ello establecer los niveles de riesgo, es sin duda el paso decisivo para establecer procedimientos y medidas eficaces de mitigación para reducir sus efectos. Es por ello prioritario desarrollar herramientas y procedimientos para diagnosticar los niveles de peligro y de riesgo que tiene nuestro país a través de sistemas organizados de información como se plantea en la integración del Atlas Nacional de Riesgos, ANR, basado éste en los atlas estatales y municipales.

Como brazo técnico del Sistema Nacional de Protección Civil, al Centro Nacional de Prevención de Desastres se le ha encomendado el desarrollo del ANR. Éste se concibe como una herramienta estratégica que permita la integración de información sobre peligros y riesgos a nivel estatal y municipal en una plataforma informática homogénea, dinámica y transparente.

Por analogía con un atlas geográfico, el ANR pudiera entenderse como un conjunto de mapas o cartas encuadradas en un voluminoso libro que muestra de una manera gráfica información de peligro o amenaza para una cierta área o región. El primer atlas que se publicó en 1994 por la Secretaría de Gobernación, tenía estas características el cual fue ampliado en 2000 por el Cenapred en una publicación más completa con un diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México.

El riesgo es una variable muy compleja y continuamente cambiante en el tiempo que es función de la variabilidad de las amenazas que nos circundan y de la condición también dinámica de la vulnerabilidad y grado de exposición. Por tanto, para la mayoría de los fenómenos, no es posible representar al riesgo mediante una simple gráfica o mapa, éste debe ser estimado de acuerdo con las circunstancias y condiciones específicas del lugar o área de interés. Por lo anterior, conceptualmente el ANR ha evolucionado de un conjunto estático de mapas, a un sistema integral de información sobre riesgos de desastres, empleando para ello bases de datos, sistemas de información geográfica, cartografía digital, modelos matemáticos y herramientas para visualización, búsqueda y simulación de escenarios de pérdidas.

Bajo este nuevo enfoque, el Cenapred continúa promoviendo diversas investigaciones y publicaciones vinculadas con el Atlas Nacional de Riesgos con el objetivo de transmitir a los usuarios, particularmente del ámbito de la protección civil, información y orientación relativos a los avances, conocimientos y desarrollos tecnológicos en la materia. Busca asimismo, guiar a los interesados en el tema sobre cómo proceder metodológicamente para establecer sus atlas locales y motivándolos a utilizarlos como un instrumento cotidiano de trabajo y consulta, indispensable para valorar el riesgo y establecer las medidas de mitigación y preparación necesarias.

En este sentido, el presente documento encabeza una nueva serie de publicaciones titulada “Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos” que engloba, como su nombre lo indica, diversas herramientas metodológicas para orientar y ayudar a evaluar los peligros y riesgos a los que estamos expuestos. En este primer conjunto de publicaciones se discuten y analizan conceptos generales sobre riesgos y cartografía, evaluación de la vulnerabilidad y análisis de peligros y riesgos de algunos fenómenos geológicos, hidrometeorológicos y también químicos. Estos documentos integran las recientes experiencias y trabajos de investigación desarrollados en el Centro, así como revisiones y ampliaciones de documentos anteriores.

Los documentos son una contribución orientada a clarificar conceptos, formular esquemas sencillos y accesibles utilizando un lenguaje lo menos técnico posible, para que los usuarios integren, paso a paso y con metodologías uniformes, información sobre algunos de los principales

peligros y riesgos a los que están expuestos en sus entidades. Por la complejidad y gran variedad de fenómenos que integra un atlas que se pretende tenga una cobertura nacional; muchos de éstos se irán incorporando en futuros documentos conforme se avance en las investigaciones y se desarrollen las bases metodológicas que faciliten posteriormente su aplicación en forma sistemática. Es necesario tomar en cuenta que los trabajos que se presentan por las distintas áreas del Centro, en su mayoría son novedosos y pioneros, como es el tema del Atlas Nacional de Riesgos, integrado como rompecabezas por los atlas estatales y municipales, considerada herramienta central de una Protección Civil preventiva en el que México, sin lugar a duda, está haciendo un trabajo innovador y de vanguardia.

El paso importante que ahora habrá que dar con estas guías, es integrar grupos locales de trabajo para aplicar y calibrar las metodologías, quizá a través de proyectos piloto y retroalimentar con la experiencia de campo a los especialistas que las diseñaron. De lograrse esta dinámica, se habrán dado pasos firmes para avanzar en la unificación de criterios para la integración de los atlas municipales, luego estatales y finalmente el atlas a nivel nacional.

Este Centro seguirá trabajando intensamente en la consecución del Atlas Nacional de Riesgos, proyecto sin duda toral y estratégico para el Sistema Nacional de Protección Civil, para el desarrollo del País, para la Seguridad Nacional y principalmente, para el bienestar de la sociedad que está expuesta a los fenómenos perturbadores. Para alcanzar esta deseada y ambiciosa meta, es necesario la activa participación y colaboración de todos, particularmente de aquellos que tenemos una responsabilidad en el ámbito de la Protección Civil y la Prevención de Desastres. Para ello el Cenapred pone a las órdenes de las entidades estatales y municipales y también a la población en general, todos sus recursos tecnológicos y humanos disponibles.

Recordemos, los desastres no son naturales, se derivan de una condición de riesgo. Consecuentemente los Atlas de Riesgo son el vehículo y a la vez guía estratégica indispensable para incidir, a través de la prevención, de manera efectiva en la mitigación de los riesgos y consecuentemente en la reducción de los desastres.

Roberto Quaas W.

PRESENTACIÓN

Ante la gran necesidad actual de contribuir a la mitigación del riesgo derivado de los fenómenos naturales y antropogénicos, la Dirección de Investigación del Cenapred ha desarrollado una serie de metodologías como respuesta a la necesidad de las autoridades de Protección Civil, de contar con documentos teórico-prácticos para elaborar bases de datos, mapas de peligros y, en una fase avanzada, mapas de vulnerabilidad y riesgo.

Para las primeras etapas, las metodologías ofrecen posibilidades para que, aun con recursos escasos y sin necesidad de contar con un grado alto de especialización, sea posible comprender el origen de los fenómenos, la amplitud de su influencia, y los efectos a los que se han de someter las construcciones y sus ocupantes.

En este volumen toca presentar las metodologías para los fenómenos geológicos de mayor impacto en México, esencialmente sismos, volcanes e inestabilidad de laderas.

Para el caso del sismo, fenómeno impredecible y cuyo impacto puede alcanzar altos niveles de daño, aun a distancias mucho mayores a las esperadas, se presenta un procedimiento sencillo para que en una localidad dada se defina el contexto general del peligro sísmico, aportando información para el tomador de decisiones a nivel de protección civil así como para aquéllos que se encarguen de definir políticas de construcción local y disminución de la vulnerabilidad. Para lo anterior, se emplearon mapas de aceleración máxima del terreno para tres distintos periodos de retorno, cuya información se reporta a nivel municipal, así como un mapa de periodos de retorno para aceleraciones a partir de las cuales pueden esperarse daños importantes en las construcciones, información que se presenta para las ciudades con más de 10,000 habitantes en nuestro país.

Adicionalmente, tomando en cuenta que los mapas y valoraciones de peligro sísmico comúnmente no incluyen la descripción de la respuesta detallada del terreno, p. ej. de un valle aluvial, donde usualmente se encuentran grandes concentraciones urbanas, se describen los procedimientos esenciales para valorar el comportamiento particular del terreno, en términos de amplificación y periodos dominantes, ante la excitación sísmica.

La actividad volcánica es uno de los fenómenos naturales que representa una seria amenaza para la sociedad en nuestro país, ya que afecta, directa e indirectamente, la vida y salud de las personas, sus actividades y sus pertenencias.

Durante el siglo XX ocurrieron varias erupciones de diferente magnitud. La más importante tuvo lugar en marzo-abril de 1982 en el volcán Chichón, Chiapas, la cual causó la muerte de aproximadamente 2,000 personas y destruyó nueve poblados constituyéndose en la peor catástrofe de índole volcánico en México.

Debido a lo anterior es muy importante profundizar el conocimiento de los volcanes del país. Entender la naturaleza de los volcanes y los peligros que representan puede conducir a la mitigación relacionada con el proceso de planificación para el desarrollo. En este trabajo se discute en términos generales la clasificación de volcanes por frecuencia de erupción, la evaluación de peligros volcánicos, la preparación de mapas de zonificación de peligros haciendo énfasis en las cenizas volcánicas y los lahares. Asimismo, se pone de manifiesto la necesidad de integrar la información vulcanológica dentro de la tecnología de los sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de realizar evaluaciones de niveles de peligros volcánicos encaminados a futuros estudios de riesgos volcánicos en el contexto de un proceso de toma de decisiones.

Por otra parte la orografía propia de nuestro territorio, las abundantes lluvias que la afectan año con año, la incidencia de sismos fuertes, la posibilidad de erupciones volcánicas y la actividad humana, son algunos de los factores que hacen propicia la inestabilidad de laderas. En México, el crecimiento de las ciudades ha obligado a la población a asentarse en barrancas, laderas y áreas de reserva ecológica consideradas como zonas con alto grado de peligro. Cuando estos factores se combinan, sin llevar a cabo las medidas preventivas más elementales, se crean las condiciones más favorables para desencadenar un desastre. A ello se suman la ausencia o inoperancia de la ley respecto al uso del suelo, la falta de planes de desarrollo urbano y la ausencia o escasez de mapas de peligro o de zonificación del riesgo.

A diferencia de los sismos, los deslizamientos de laderas pueden mostrar manifestaciones que permiten señalar la posibilidad de su ocurrencia futura. 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 el capítulo cinco de este documento. Ahí se presenta un método sencillo que permite estimar el peligro de los deslizamientos de laderas. Se muestra la aplicación del método en algunas colonias de la ciudad de Teziutlán, Puebla, donde han ocurrido cientos de deslizamientos en los últimos siete años. A partir de este caso se enfatizan las primeras observaciones respecto a la aplicación práctica de esta metodología y los resultados obtenidos en este proyecto piloto para evaluar el peligro y el riesgo de estos fenómenos geotécnicos.

I. INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO

Carlos A. Gutiérrez M., Andrés Ramírez y Ana Belem Reyes

RESUMEN

Empleando el procedimiento que aquí se presenta será posible estimar el nivel de peligro sísmico en dos niveles, básico (Título 1.6) y detallado (Título 1.7), para la integración del apartado correspondiente en un Atlas de Peligros a nivel estatal o municipal.

En el primer nivel se pueden identificar índices del grado de peligro de manera sencilla, en función de mapas regionales incluidos en este documento. Con base en esos resultados se podrán establecer criterios generales para realizar inspecciones y evaluaciones de la seguridad de las edificaciones, recomendaciones, campañas de divulgación, etc., que contribuyan a la mitigación del riesgo sísmico.

Asimismo, para un conocimiento detallado del peligro sísmico se propone una lista de estudios que, realizados con las directrices sugeridas, producirán resultados útiles para la elaboración y mejoramiento de normas técnicas para el diseño de obras civiles y la planeación del uso de suelo, particularmente en valles aluviales.

Como complemento se describen, de manera breve, los elementos teóricos indispensables.

Para aquellos casos en que la elaboración del Atlas municipal o estatal se encargue de manera total o parcial a consultores externos, la presente metodología puede servir, además de fuente de información, como referencia técnica para la realización de los estudios señalados.

1.1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. Antecedentes

La sismicidad es uno de los fenómenos derivados de la dinámica interna de la Tierra que ha estado presente en la historia geológica de nuestro planeta, y que seguramente continuará manifestándose de manera similar a lo observado en el pasado.

Los sismos no pueden predecirse, es decir, no existe un procedimiento confiable que establezca con claridad la fecha y el sitio de su ocurrencia, así como el tamaño del evento. Sin embargo, los sismos se presentan en regiones bastante bien definidas a nivel regional y se cuenta con una estimación de las magnitudes máximas, en función de los antecedentes históricos y estudios geofísicos.

Durante el siglo pasado ocurrieron 71 temblores en el territorio nacional y sus alrededores inmediatos con magnitud mayor o igual que 7; 55 de ellos (77%) con profundidades menores de 40 km, es decir, muy cerca de la superficie terrestre.

Por lo anterior, es claro que el grado de exposición de la población y sus obras civiles a los sismos es alto y, con fines preventivos, resulta indispensable conocer con la mayor claridad cuál es el nivel de peligro de un asentamiento humano o área específica, la distribución geográfica de la influencia del fenómeno, la frecuencia de ocurrencia, etc.

Ante la gran cantidad de información disponible acerca de daños por temblor en diferentes partes del mundo, se piensa que cada vez hay más temblores. Una revisión somera de un catálogo sísmico mundial o regional, que cubra un periodo considerable (50 ó 100 años), dejará ver que no hay variación en el número de temblores por unidad de tiempo. En realidad, lo que sí muestra un crecimiento importante son, por una parte, las áreas ocupadas por los asentamientos humanos que, en la mayoría de los casos, carecen de una planeación adecuada y se desarrollan sobre terrenos proclives a la amplificación del movimiento sísmico, empleando técnicas constructivas inadecuadas. Asimismo, debe tomarse en cuenta que el número de estaciones de registro sísmico aumenta constantemente, por lo que el número de temblores reportados, sobre todo de magnitudes bajas y moderadas, también crece.

El tener conocimiento acerca de la frecuencia con que se presenta el fenómeno, cuál es el impacto que se tendría o ha tenido, el tamaño del área afectable, entre otros aspectos, permite dar la debida importancia a la generación, actualización y aplicación de reglamentos de construcción, así como de especialistas en construcción, definición y planeación de acciones de prevención y organización de grupos de trabajo para la atención de una posible emergencia. Adicionalmente, se tendrá una base importante para la promoción y el sostenimiento de una cultura de protección civil.

1.2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SISMICIDAD Y PELIGRO POR SISMO

1.2.1. Zonas sísmicas en México

La *litosfera* está dividida en varias placas, cuya velocidad de desplazamiento es del orden de varios centímetros por año. El territorio mexicano se encuentra afectado por la interacción de cinco placas tectónicas (figura 1.1). En los límites entre placas, donde éstas hacen contacto, se generan fuerzas de fricción que impiden el desplazamiento de una respecto de la otra, generándose grandes esfuerzos en el material que las constituye. Si dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia de la roca, o se vencen las fuerzas friccionantes, ocurre una ruptura violenta y la liberación repentina de la energía acumulada. Desde el *foco* (o hipocentro), ésta se irradia en forma de ondas sísmicas, a través del medio sólido de la Tierra en todas direcciones.

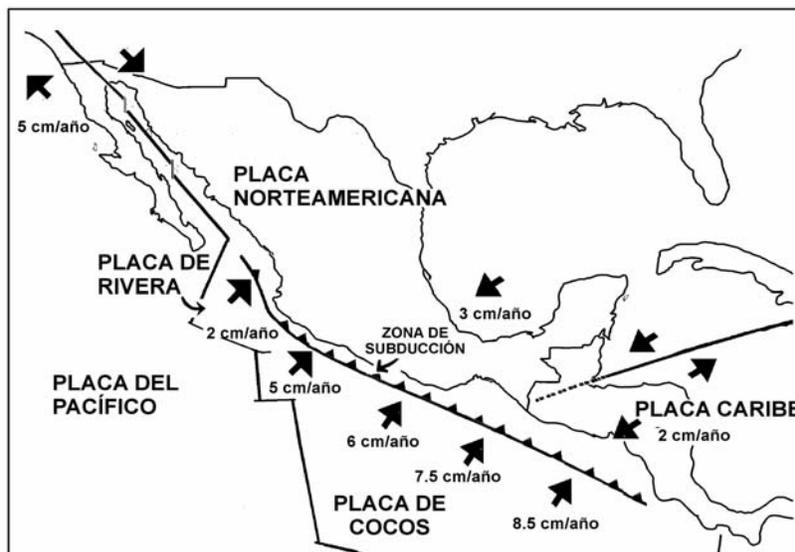


Figura 1.1 - Placas tectónicas y sus correspondientes velocidades relativas promedio

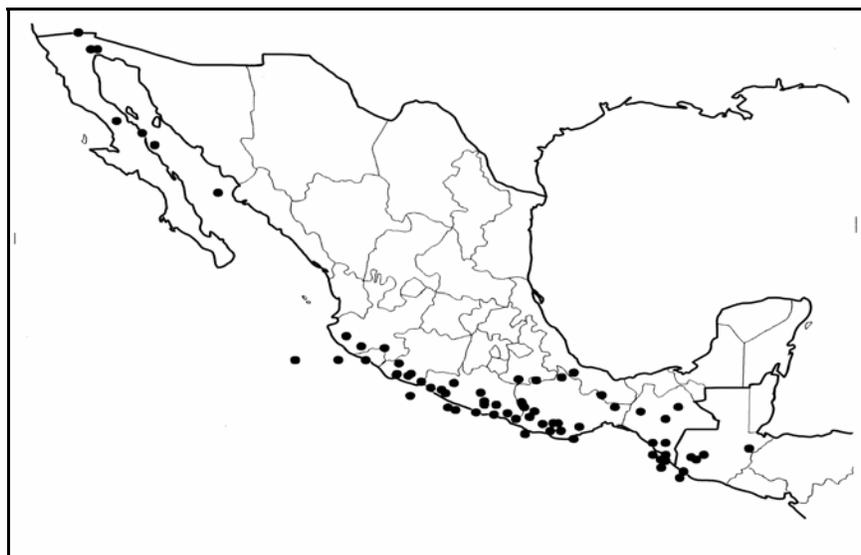


Figura 1.2 - Epicentros de temblores con magnitud 7 ó mayor, ocurridos en o cerca del territorio nacional durante el siglo XX

Los epicentros de la mayor parte de los terremotos de gran magnitud (mayores o iguales que 7; figura 1.2), que llegan a ocasionar grandes daños, se ubican en las costas de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. También han ocurrido, aunque con menor frecuencia, grandes sismos en el centro y sur de Veracruz y Puebla, norte y centro de Oaxaca y Chiapas, en la zona fronteriza entre Baja California y los Estados Unidos e incluso en el Estado de México y Sonora.

La profundidad típica de los eventos costeros es de 15 a 25 km, mientras que los eventos con epicentros tierra adentro suelen tener profundidades alrededor de 60 ó 70 km.

1.2.2. Intensidad Sísmica

La intensidad de un sismo se refiere a un lugar determinado; se asigna en función de los efectos causados *en el hombre, en sus construcciones y, en general, en el terreno natural*. La asignación de un grado de intensidad determinado resulta un tanto subjetiva debido a que depende de la sensibilidad de las personas y de la apreciación que se haga de los efectos. Sin embargo, la asignación cuidadosa de la intensidad sísmica resulta de gran utilidad para estudiar sismos históricos o aquellos que impactan zonas donde se carece de instrumentos de registro.

En la tabla 1.1 se muestra la Escala de Intensidad de Mercalli Modificada Abreviada. Para cada grado se presentan, de manera resumida, los principales efectos asociados.

Tabla 1.1 Escala de Intensidad de Mercalli Modificada Abreviada

I	No sentido, excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.
II	Sentido sólo por muy pocas personas en posición de descanso, especialmente en los pisos altos de los edificios. Objetos suspendidos pueden oscilar delicadamente.
III	Sentido muy claramente en interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios, pero mucha gente no lo reconoce como un terremoto. Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como al paso de un camión. Duración apreciable.
IV	Durante el día sentido en interiores por muchos, al aire libre por algunos. Por la noche algunos despiertan. Platos, ventanas y puertas agitadas; las paredes crujen. Sensación como si un camión pesado chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.
V	Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas y similares rotos; grietas en el revestimiento en algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse.
VI	Sentido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. Algún mueble pesado se mueve; algunos casos de caída de revestimientos y chimeneas dañadas. Daño leve.
VII	Todo el mundo corre al exterior. Daño insignificante en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras corrientes bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas; se rompen algunas chimeneas. Notado por algunas personas que conducen automóviles.
VIII	Daño leve en estructuras diseñadas especialmente; considerable en edificios corrientes sólidos con colapso parcial; grande en estructuras de construcción pobre. Paredes separadas de la estructura. Caída de chimeneas, rimeros de fábricas, columnas, monumentos y paredes. Muebles pesados volcados. Eyección de arena y barro en pequeñas cantidades. Cambios en pozos de agua. Conductores de automóviles entorpecidos.
IX	Daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras con armaduras bien diseñadas pierden la vertical; grande en edificios sólidos con colapso parcial. Los edificios se desplazan de los cimientos. Grietas visibles en el suelo. Tuberías subterráneas rotas.
X	Algunos edificios bien construidos en madera, destruidos; la mayoría de las obras de estructura de ladrillo, destruidas junto con los cimientos; suelo muy agrietado. Rieles torcidos. Corrimientos de tierra considerables en las orillas de los ríos y en laderas escarpadas. Movimientos de arena y barro. Agua salpicada y derramada sobre las orillas.
XI	Pocas o ninguna obra de albañilería quedan en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el suelo. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio. La tierra se hunde y el suelo se desliza en terrenos blandos. Rieles muy retorcidos.
XII	Destrucción total. Se ven ondas sobre la superficie del suelo. Líneas de mira (visuales) y de nivel, deformadas. Objetos lanzados al aire.

1.2.3. Magnitud Sísmica

Para conocer y comparar objetivamente el tamaño de los terremotos se necesita una medida que no dependa, como la intensidad, de la densidad de población ni del tipo de construcción afectada. La manera de evaluar el tamaño real de un sismo se basa en registros sísmicos y está relacionada con la cantidad de energía liberada, la cual es independiente de la ubicación de los instrumentos que lo registran.

En 1932, Charles Richter desarrolló una escala estrictamente cuantitativa, aplicable a sismos ocurridos en regiones habitadas o no, utilizando las amplitudes de las ondas registradas por un sismógrafo. Su escala tiene aplicación para sismos superficiales y relativamente cercanos.

Dada la conveniencia de describir el tamaño de un terremoto empleando un número (magnitud), se ha requerido que el método se amplíe a otros tipos de sismógrafos usados en el mundo y a las diferencias en profundidad y tamaño de los temblores. Consecuentemente, hay varias escalas de magnitud, por ejemplo, la de ondas superficiales (M_s), magnitud de ondas de cuerpo (m_b) o la magnitud de momento sísmico (M_w) que, a diferencia de las otras, expresa siempre el tamaño real del temblor por grande que éste sea.

Los medios de comunicación usualmente proporcionan el dato de magnitud de cualquier sismo acompañado con el apellido Richter, por haber sido esa la primera escala de magnitud.

La diferencia de un grado de magnitud entre dos sismos cualesquiera implica, en términos de energía liberada, una diferencia aproximada de 32 veces (tabla 1.2).

Tabla 1.2 - Equivalencia entre magnitudes

Un temblor de magnitud 8 equivale a	32 de magnitud 7
	1,000 de magnitud 6
	32,000 de magnitud 5
	1'000,000 de magnitud 4

Por tanto, es fácil notar que un sismo de magnitud 4, como los que llegan a ocurrir varias veces por semana a lo largo de la costa occidental de México, no es la mitad de uno de magnitud 8, cuyo periodo de repetición en una determinada región puede ser de varias décadas.

1.3 PELIGRO Y RIESGO POR SISMO

De acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 1 del volumen *Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica*, el riesgo sísmico es producto de tres factores: Los bienes expuestos (C), tales como vidas humanas, edificios, carreteras, puertos, tuberías, etc.; la vulnerabilidad (V), que es un indicador de la susceptibilidad al daño; y el peligro (P), que es la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, ya sea natural o antrópico. Así, para el objetivo del presente documento, el riesgo sísmico es expresado de manera simple como la interacción de las tres variables mencionadas, $R = C V P$. Lo anterior implica que si alguna de esas variables es nula, no se tiene riesgo. De tal modo, en una región donde el fenómeno del sismo esté ausente, no existirá riesgo sísmico. Sin embargo, esa situación no se da en la gran mayoría de los casos, a nivel mundial, ya que difícilmente se encontrará una región para la que se pueda afirmar de manera definitiva que nunca ha ocurrido ni ocurrirá un sismo, de cualquier tamaño. Lo que sí es factible es que el valor de una de esas tres variables disminuya, para que suceda lo mismo con el riesgo resultante.

Por su parte, los bienes expuestos tienden a crecer constantemente. En ocasiones, como parte de una apreciación a nivel mundial se ha llegado a afirmar que las pérdidas humanas y materiales van en aumento como consecuencia de que los fenómenos naturales son más frecuentes. Lo que definitivamente va en aumento es el tamaño y mayor cobertura geográfica de los bienes expuestos que, al ubicarse en áreas de alto peligro y emplear procedimientos constructivos que implican altos niveles de vulnerabilidad, provocan un aumento en el riesgo resultante.

Como es el caso de otros fenómenos, la vulnerabilidad es la variable en la que se puede influir de forma significativa con propósitos de mitigación del riesgo por sismo. En ese sentido, está

ampliamente demostrado que es posible aminorar notablemente la vulnerabilidad, a través de la mejora en la calidad de los materiales, así como de las técnicas y normas de construcción, etc.

La ocurrencia de temblores no es susceptible de variación debida a algún agente artificial; es decir, no es posible influir de manera alguna para que haya menos sismos, que éstos tengan menor magnitud o que su distribución geográfica sea distinta. Por tanto, se debe asumir que el nivel de peligro sísmico en cualquier región del mundo seguirá dándose de acuerdo con los patrones de ocurrencia definidos en el pasado geológico.

1.4 ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO

Para conocer los niveles de peligro sísmico se requiere de un procedimiento más o menos complejo que implica contar, entre otros elementos, con información de catálogos sísmicos con magnitudes y localizaciones epicentrales confiables y un conocimiento amplio de la tectónica que caracteriza a las diferentes regiones analizadas. Asimismo, la información geológica es de gran relevancia en tanto que permitirá tener conocimientos acerca de fallas sismogénicas y, particularmente, aportará datos sobre aspectos superficiales en el caso de valles aluviales.

Como sucede en la generalidad de los casos, en México se tiene que recurrir a procedimientos probabilísticos dado que no se cuenta con un catálogo sísmico que cubra periodos suficientemente largos para determinar directamente los periodos de recurrencia característicos de las diferentes zonas sismogénicas. Se tiene, para la República Mexicana, un conocimiento bastante claro de la sismicidad a partir del siglo pasado. Sin embargo, con respecto al S. XIX sólo se conoce de manera general la ocurrencia de eventos con magnitudes de 7 en adelante. Debido a la falta, en esa época, de estaciones suficientes, es muy probable que en el catálogo para dicho periodo no se encuentren presentes varios eventos importantes, especialmente de magnitudes entre 6 y 7. Las localizaciones epicentrales y las profundidades correspondientes no alcanzan la precisión que se tiene actualmente. Para siglos anteriores, la incertidumbre en cuanto a número de temblores, su punto de origen y profundidad es aún mayor. De ellos sólo se tienen referencias históricas, particularmente a partir del S. XVI.

El procedimiento para la estimación del peligro sísmico implica el análisis de la sismicidad local, lo que implica dividir el territorio nacional en varios volúmenes nombrados fuentes generadoras, para las cuales se supone una tasa constante de generación de temblores. Posteriormente, se determinan los efectos que son producidos por cada una de ellas en un sitio dado, en términos de intensidad sísmica instrumental. Para ello se desarrollan leyes de atenuación, las cuales relacionan la magnitud, la posición de la fuente con relación a un sitio dado y la intensidad producida. Dichas leyes asumen el principio de que, en la medida que aumenta la distancia a partir de la fuente, la intensidad disminuye.

De manera formal, el peligro sísmico se describe mediante indicadores cuantitativos de las probabilidades de ocurrencia de movimientos de distintas intensidades durante lapsos dados (UNAM, 2003).

Se utiliza para ello la tasa de excedencia de parámetros de intensidad sísmica instrumental. La tasa de excedencia $\lambda(M)$ es el inverso del periodo de retorno, y se define como el número medio de veces, por unidad de tiempo, que ocurre un temblor con magnitud mayor a M .

En una gráfica de tasa de excedencia se indican las aceleraciones máximas del terreno y sus correspondientes periodos de retorno. Por ejemplo, para un sitio en la costa de Guerrero, una aceleración de 300 cm/s^2 tiene un periodo medio de repetición de 100 años (fig. 1.3).

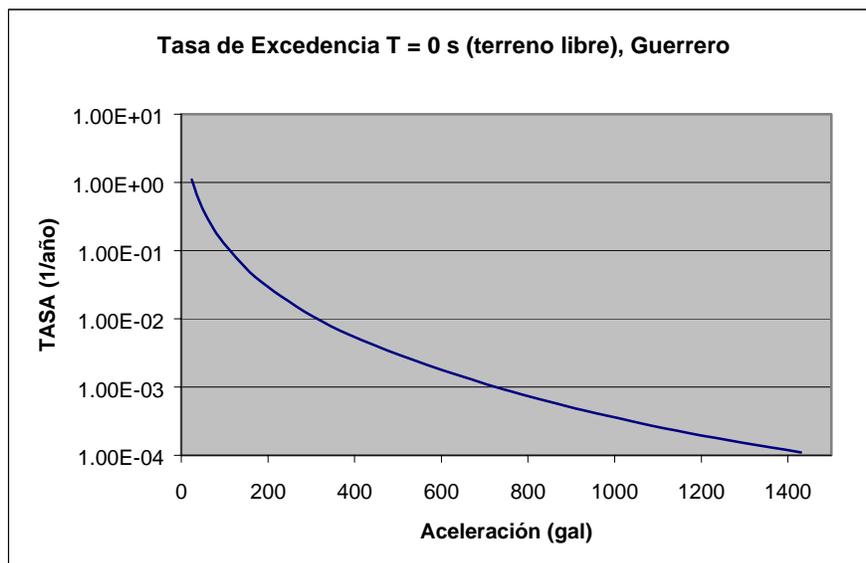


Fig. 1.3 Tasa de excedencia para un sitio de la costa de Guerrero.

Sin embargo, dado que el fenómeno del efecto de sitio ha sido reconocido como factor determinante en los cálculos de peligro sísmico, se deben incluir, además de la información acerca de las fuentes sísmicas y los patrones de atenuación asociados a ellas, los efectos de la geología local. Por tanto, para una valoración completa se tendrán que incluir parámetros derivados de una microzonificación sísmica propia.

1.5 PARÁMETROS BÁSICOS DE PELIGRO SÍSMICO

Para la elaboración de un atlas local se requiere cubrir varias etapas. Para algunos fenómenos y la definición del correspondiente escenario de impacto, el personal de protección civil será capaz de coleccionar, organizar o generar buena parte de la información necesaria. En otros casos, será necesario que se apoye en profesionales del ramo, colegios de profesionistas, o bien en grupos de investigación locales o nacionales.

En el caso del fenómeno sísmico, las bases para llegar a una estimación del riesgo, siendo una de ellas la evaluación del peligro, requieren de información que se genera en observatorios sismológicos a través de periodos considerables, la operación consistente de redes instrumentales ampliamente distribuidas, recursos humanos especializados, estudios teóricos con cierto grado de complejidad, etc.

Por lo anterior, a diferencia de otros casos en que se instruye paso a paso al lector de este tipo de documentos acerca de cómo generar, analizar y organizar la información para definir el peligro en una zona y condiciones específicas, aquí se proporciona la información derivada de los propios mapas de peligro ya generados y empleados por especialistas. El propósito es que dicha información se tenga ubicada en un documento que muestre claramente el contexto de la prevención y mitigación (Atlas), que esté al alcance de profesionales responsables del diseño, mantenimiento y reparación de inmuebles, así como de autoridades encargadas de la toma de decisiones y asignación

de prioridades. Los responsables de la generación y actualización del atlas local tendrán la posibilidad de contar con datos que, además, sirven de base para otras metodologías.

La intención de presentar información relativa a aceleraciones máximas del terreno y periodos de retorno para una intensidad asociada a la ocurrencia de daños en construcciones, atiende a uno de los criterios básicos definidos en el contexto de las metodologías. Dicho criterio establece que, para los no especialistas, resulta de utilidad la identificación de los escenarios más desfavorables esperados y, por otro lado, la relación entre la intensidad y el nivel de daño probable.

1.5.1 Instrumentación Sísmica

Para registrar el movimiento del terreno y de las estructuras bajo la acción de las ondas sísmicas, se emplean sismógrafos y acelerógrafos. Los registros obtenidos, mostrando el carácter, duración y amplitudes del movimiento, son conocidos como sismogramas y acelerogramas, respectivamente.

El *sismógrafo* es un instrumento de gran sensibilidad que produce una traza que representa la velocidad de movimiento del terreno en el sitio de registro, ya sea a causa de un sismo cercano muy pequeño o de uno grande lejano. Por otra parte, un *acelerógrafo* permite registrar fielmente las aceleraciones a que se ve sometido el terreno, en direcciones horizontal y vertical, ante el paso de ondas sísmicas producidas por un sismo de gran magnitud a una distancia relativamente corta. Sus valores se expresan usualmente empleando porcentajes o fracciones del valor de la aceleración gravitatoria g (981 cm/s^2).

La información acerca de la instrumentación y los registros obtenidos por distintas redes operadas en México desde 1958, se encuentra conjuntada en la *Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes*, que actualmente cuenta con alrededor de 14,000 registros generados por más de 1,500 temblores. Se recomienda ampliamente la consulta de este banco de información, especialmente por parte de ingenieros o arquitectos.

1.5.2 Tsunamis

Los maremotos, también conocidos como tsunamis, son consecuencia de sismos tectónicos de gran magnitud cuyo origen se encuentra bajo el fondo del océano. Debido al movimiento vertical del piso oceánico, la perturbación generada en el agua llega a desplazarse con velocidades de hasta 900 km/h en mar abierto, sin que sea posible percibir cambios de nivel. Sin embargo, al llegar a la costa su velocidad disminuye notablemente pero su altura puede aumentar hasta alcanzar unos 30 metros, como sucedió en Japón a finales del siglo XIX.

En el caso de México, se tienen datos acerca de tsunamis ocurridos en la costa del Pacífico a partir del siglo XVIII, según se muestra en el catálogo incluido más adelante.

1.5.3 Licuación de arenas

En aquellos sitios donde el terreno está constituido por depósitos limosos y/o arenosos de espesor considerable, poco consolidados, con nivel freático a pocos metros de profundidad y cercanos a zonas generadoras de sismos someros de magnitud moderada o grande, puede presentarse el fenómeno de licuación de arenas.

Este fenómeno ocurre cuando la presión del fluido contenido en los espacios intergranulares aumenta repentinamente como consecuencia de la presión inducida por el paso de ondas sísmicas,

haciendo que el contacto entre los granos disminuya a tal grado que el cuerpo sedimentario llega a comportarse, por unos instantes, como un líquido denso. Lo anterior ocasiona deslizamientos en laderas o que los edificios pierdan la verticalidad en mayor o menor grado aunque sin sufrir, en muchos casos, daño considerable en su estructura (figura 1.4).

El aumento repentino de presión en el interior del cuerpo arenoso, provoca expulsión de fluido y material térreo hacia la superficie, formando estructuras con pocos centímetros de altura, conocidas como *volcanes de arena* (figura 1.5).



Figura 1.4 - Edificios inclinados por licuación de arenas



Figura 1.5- Volcán de arena en un campo de cultivo, evidencia de licuación

1.6 FUENTES ESENCIALES DE INFORMACIÓN

En este capítulo se mencionan algunos de los principales centros de investigación y observatorios sismológicos donde se pueden consultar localizaciones de temblores día a día, parámetros de aceleración del terreno o bien, información estadística, histórica, impacto en asentamientos humanos, preguntas más frecuentes acerca del fenómeno, etc.

Asimismo, se presentan los mapas básicos con los que se puede valorar, aunque de manera elemental, el nivel de peligro sísmico para una determinada región. De dicha valoración pueden derivarse criterios e iniciativas que influyan, a corto o largo plazo, en la mitigación del riesgo.

Se recomienda coleccionar la información acerca de epicentros, magnitudes, profundidades, etc. disponible en las fuentes en seguida mencionadas y presentarla en forma de tablas y mapas.

1.6.1 Observatorios Sismológicos y Centros de Investigación

1.6.1.1. Servicio Sismológico Nacional (SSN)

Dependiente del Instituto de Geofísica de la UNAM, cuenta con tres redes de estaciones sismográficas distribuidas principalmente en las regiones centro y sur del país. Es el organismo encargado de calcular las localizaciones epicentrales, profundidades y magnitudes de los sismos ocurridos, esencialmente con magnitud superior a 3. Emite boletines con información preliminar cada semana y un boletín mensual. Cuenta con página de Internet (<http://www.ssn.unam.mx>), donde se pueden consultar catálogos de sismos, artículos de divulgación, reportes especiales sobre sismos de magnitud grande, preguntas frecuentes, etc.

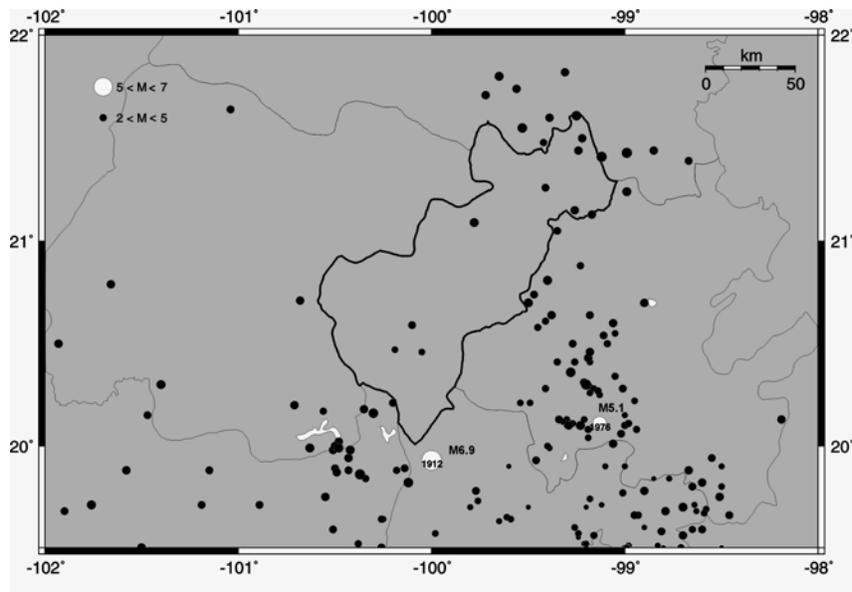


Figura 1.6 - Sismicidad local en la región del estado de Querétaro con base en la información generada por el Servicio Sismológico Nacional

1.6.1.2. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE)

Realiza investigación básica y aplicada en Oceanología, Física y Ciencias de la Tierra. Con respecto a este último rubro, se encarga de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM) y reporta principalmente la actividad en la región norte de la península de Baja California y la parte noroccidental del estado de Sonora. Cuenta con datos de sismos ocurridos desde 1980 accesibles a través de un catálogo. Tiene acceso vía Internet (<http://sismologia.cicese.mx/resnom>).

1.6.1.3. Observatorio Vulcanológico de la Universidad de Colima

Aunque tiene como función principal la de valorar las diferentes manifestaciones del volcán de Fuego de Colima, paralelamente lleva a cabo diversos proyectos relacionados con la sismicidad y el peligro sísmico en el estado de Colima, así como parte de Jalisco y Michoacán. Se tiene acceso a través de Internet en la dirección electrónica <http://www.ucol.mx/acerca/coordinaciones/cgic/ov/>

1.6.1.4. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)

Emite boletines acerca de los sismos de gran magnitud o aquellos que hayan causado daños o efectos importantes. Publica también datos de aceleración registrados en estaciones de la línea de atenuación Acapulco–DF y en estaciones de la ciudad de México. (<http://www.cenapred.unam.mx>).

A través de esta dirección electrónica, o en su biblioteca, pueden consultarse diversas publicaciones sobre el tema, entre otras, el fascículo Sismos y el Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en la República Mexicana.

1.6.1.5. Earthquake Hazard Program. United States Geological Survey (NEIC-USGS)

Presenta localizaciones de sismos en diferentes partes del mundo, antecedentes sísmicos de una zona en particular, resúmenes de daños y efectos, etc. (<http://neic.usgs.gov>). Los valores de magnitud, localización epicentral y profundidad pueden variar con respecto a los asignados por el SSN para sismos mexicanos, debido esencialmente al empleo de fórmulas o procedimientos distintos para su cálculo.

1.6.1.6. Southern California Earthquake Data Center

Reporta las localizaciones de sismos ocurridos en la parte norte de la Península de Baja California y el estado de California, en los Estados Unidos. Presenta catálogos sísmicos a partir de 1932 (<http://www.scecdc.scec.org>).

1.6.2 Mapas

1.6.2.1. Regionalización sísmica de la CFE

Fuente de Información

En el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) Capítulo Diseño por Sismo, se encuentra publicado el mapa de Regionalización Sísmica de México (figura 1.7).

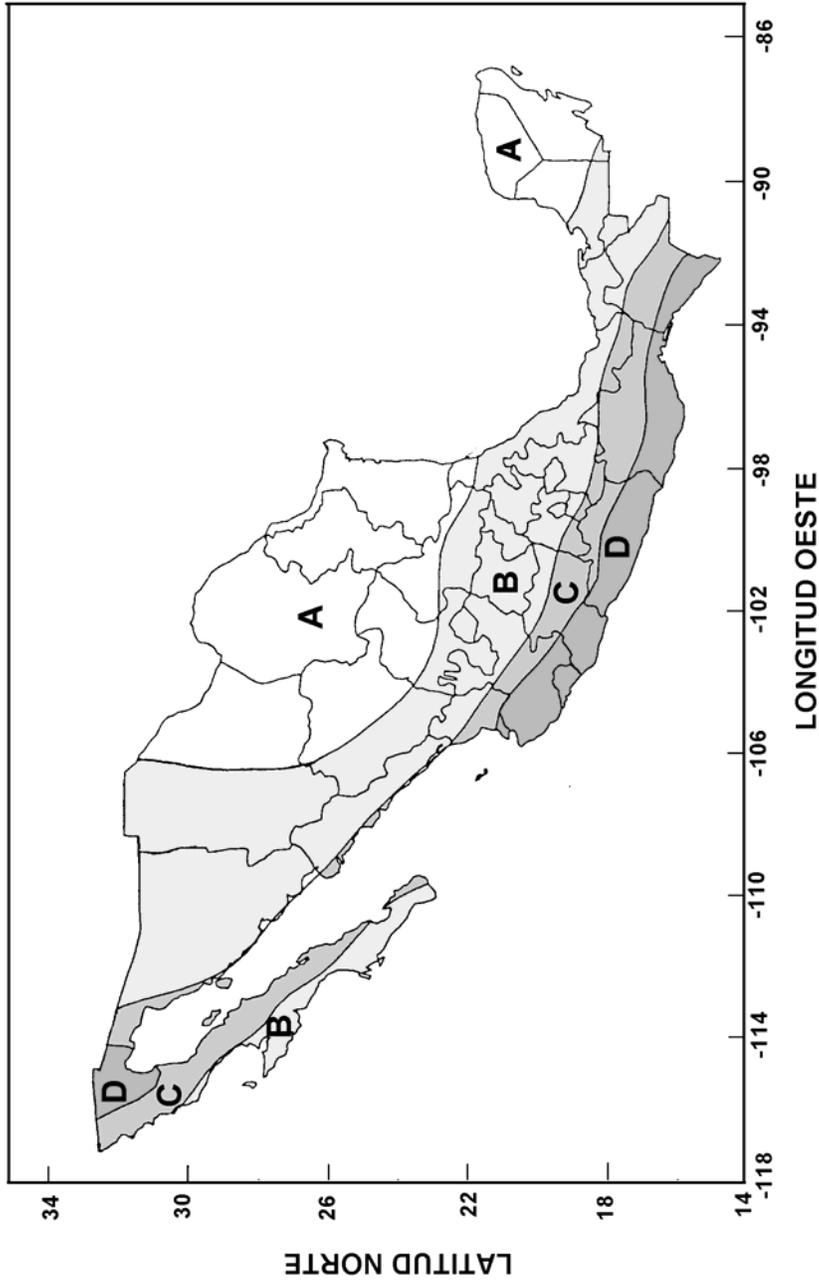


Figura 1.7- Regionalización Sísmica de México

Descripción y alcance

Este mapa permite conocer, en términos generales, el nivel de peligro sísmico que tiene un área determinada. Para ello, el territorio nacional se encuentra clasificado en cuatro regiones, de la A a la D, las cuales representan un nivel creciente de peligro.

Esta clasificación del territorio se emplea en los reglamentos de construcción para fijar los requisitos mínimos que deben seguir los proyectistas, diseñadores y constructores en las edificaciones y otras obras civiles de tal manera que éstas resulten suficientemente seguras ante los efectos producidos por un sismo.

La zona A es aquella donde no se tienen registros históricos de sismos y donde las aceleraciones del terreno se esperan menores al 10% de g . En la zona D ocurren con frecuencia temblores de gran magnitud ($M > 7$) y las aceleraciones del terreno pueden ser superiores al 70% de g . Los niveles de sismicidad y de aceleración propios de las zonas B y C están acotados por los valores correspondientes de A y D, los temblores grandes son poco frecuentes (por ejemplo, el sismo de junio de 1999, con epicentro al sur de Puebla) y se estima que las aceleraciones se mantendrán por debajo del 70% de g .

Aplicación

Ubique su ciudad o municipio en el mapa para asignarle el nivel de exposición correspondiente; la zona A corresponde a la zona de menor peligro, B a medio-bajo, C medio-alto y la D a la de mayor peligro. Se cuenta con una lista donde se han clasificado todos los municipios de la República Mexicana en función de esta regionalización. En caso de que no sea evidente la ubicación del municipio en cuestión con respecto a este mapa, es posible consultar el listado de clasificación municipal según la regionalización sísmica a través de la página de *internet* del CENAPRED (<http://www.cenapred.unam.mx>).

Asimismo, se recomienda consultar el Manual de Obras Civiles de la CFE donde se expresa con detalle la clasificación de suelos para cimentación, parámetros específicos para suelos firme, de transición y suave, clasificación de construcciones según su destino o estructuración, etc. y concentrar toda la información particular para el estado o municipio.

1.6.2.2. Mapas de Aceleraciones para Periodos de Retorno de 10, 100 y 500 años

Fuente de información

Los mapas de peligro por sismo que se muestran a continuación, son algunos de los resultados que se obtienen del programa Peligro Sísmico en México (PSM, 1996), que constituye un sistema de información cuantitativa sobre el peligro sísmico en la República Mexicana en cuya elaboración participaron el Instituto de Ingeniería de la UNAM, Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad, además del CENAPRED.

Descripción y Alcance

PSM genera los siguientes tipos de resultados:

- Mapas de valores de la intensidad sísmica seleccionada asociados a un periodo de retorno dado.
- Para cualquier sitio dentro de la República Mexicana, la curva intensidad vs. tasa de excedencia para el parámetro de intensidad seleccionado.
- Para cualquier sitio dentro de la República Mexicana, el espectro de respuesta cuyas ordenadas tienen un periodo de retorno constante dado.
- Información sobre las relaciones de atenuación utilizadas para el cálculo del peligro sísmico.

El conocer solamente las magnitudes de los temblores, no da una idea clara del impacto que éstos producirían en una determinada región, ya que pueden presentarse a diferentes profundidades y distancias de los asentamientos humanos. Por su parte, los mapas de intensidades de Mercalli, describen de manera sencilla la distribución espacial de los efectos en el terreno y las construcciones, asociada a la ocurrencia de un evento en particular que, si bien permiten plantear un escenario a futuro, no indican cuál es la probabilidad de que ello ocurra nuevamente. En el caso de los mapas de peligro como los que aquí se presentan, se da a conocer la distribución de las intensidades en términos de aceleración del terreno asociada a periodos de retorno. Esta información, aunque no directamente aplicable en la población con fines de protección civil, es un elemento fundamental para especialistas en el diseño de nuevas construcciones y modificación o refuerzo de obras civiles existentes.

Para facilitar la definición de niveles de peligro para un sitio dado se eligieron los mapas más representativos, en función de la vida útil de la gran mayoría de las construcciones, correspondientes a periodos de 10, 100 y 500 años, figuras. 1.8 a 1.10. En ellos se muestran aceleraciones máximas para terreno firme para un periodo de retorno dado (tiempo medio, medido en años, que tarda en repetirse un sismo con el que se exceda una aceleración dada).



Figura 1.8- Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 10 años

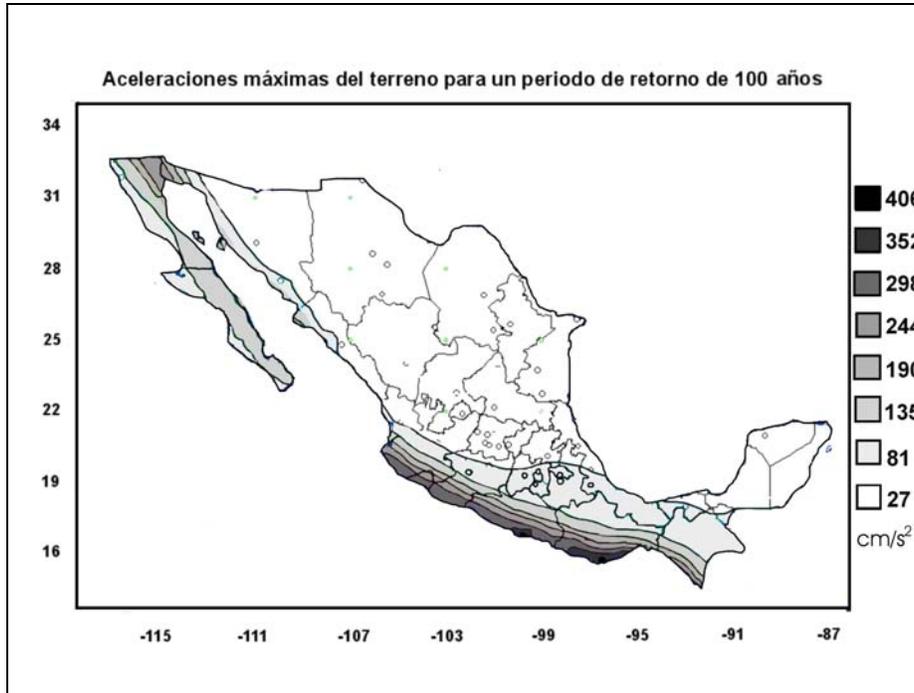


Figura 1.9- Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 100 años

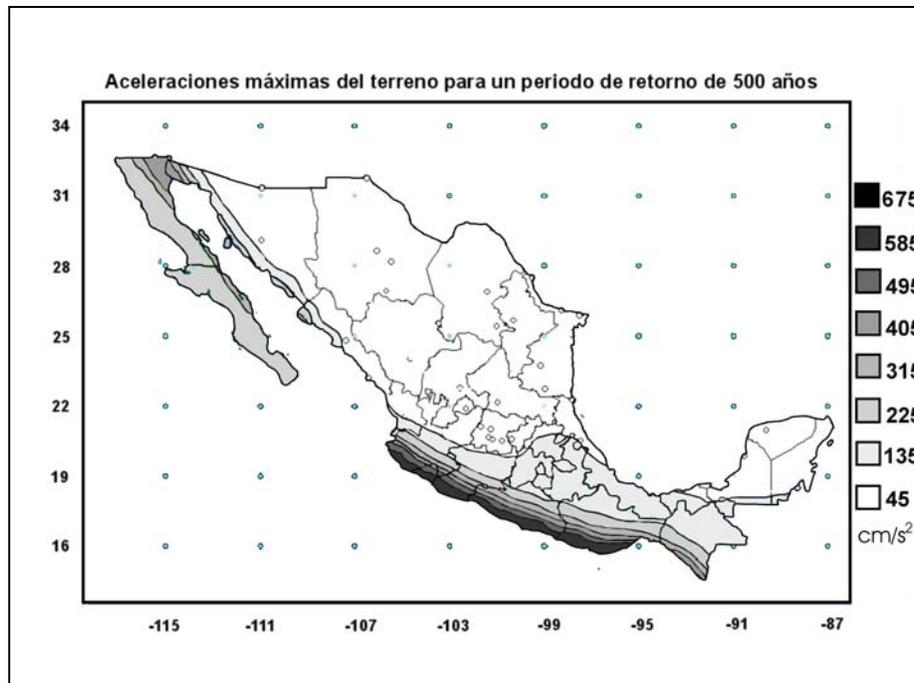


Figura 1.10- Aceleraciones máximas del terreno para un periodo de retorno de 500 años

Aplicación

Para que los estados y municipios cuenten con información actualizada que les permita tomar medidas apropiadas y orientar decisiones para la evaluación y mitigación del riesgo por sismo, se realizó, con base en los mapas ya mencionados, la clasificación municipal que se presenta en el anexo 1 de este capítulo. Ahí se reportan los valores de aceleración máxima del terreno para cada municipio. Esto facilitará, ante la falta de un reglamento de construcción propio, definir las ordenadas de diseño para edificaciones de poca altura, típicas en nuestro país; es decir, construcciones de uno o dos niveles ubicadas en suelo firme.

En caso de que un estado o municipio lleve a cabo estudios de riesgo para obras en particular, es posible solicitar mapas específicos a alguna de las instituciones participantes en la elaboración del PSM (el sistema también es capaz de generar mapas para periodos estructurales fundamentales hasta de 3 s). De esa manera se puede determinar, por ejemplo, si para periodos de retorno de 100 años o menos se alcanzan o superan aceleraciones del terreno de 150 gal. En ese caso, habrá que dar alta prioridad a la aplicación, actualización o creación de un reglamento de construcción para el propio estado o municipio.

Es sumamente recomendable que el empleo de esta información se lleve a cabo con la asesoría o participación directa de un ingeniero civil capacitado para el diseño de obras sismorresistentes.

La aplicación de la información derivada de estos mapas, junto con las características estructurales y estado físico de las construcciones, permitirá que especialistas emitan recomendaciones para disminuir la vulnerabilidad de las obras civiles, aspecto que se aborda ampliamente en capítulos posteriores.

1.6.2.3. Mapa de Periodos de Retorno para Aceleraciones de 15% g o Mayores

Fuente de información

Comisión Federal de Electricidad

Descripción y Alcance

Se sabe que, para los tipos constructivos que predominan en nuestro país, los daños son considerables a partir de un nivel de excitación del terreno igual o mayor al 15% de g (aceleración de la gravedad terrestre). Por tal razón, utilizando información reciente, la Comisión Federal de Electricidad generó el mapa actualizado de Periodos de Retorno para Aceleraciones de 0.15 de g ó mayores, (fig. 1.11).

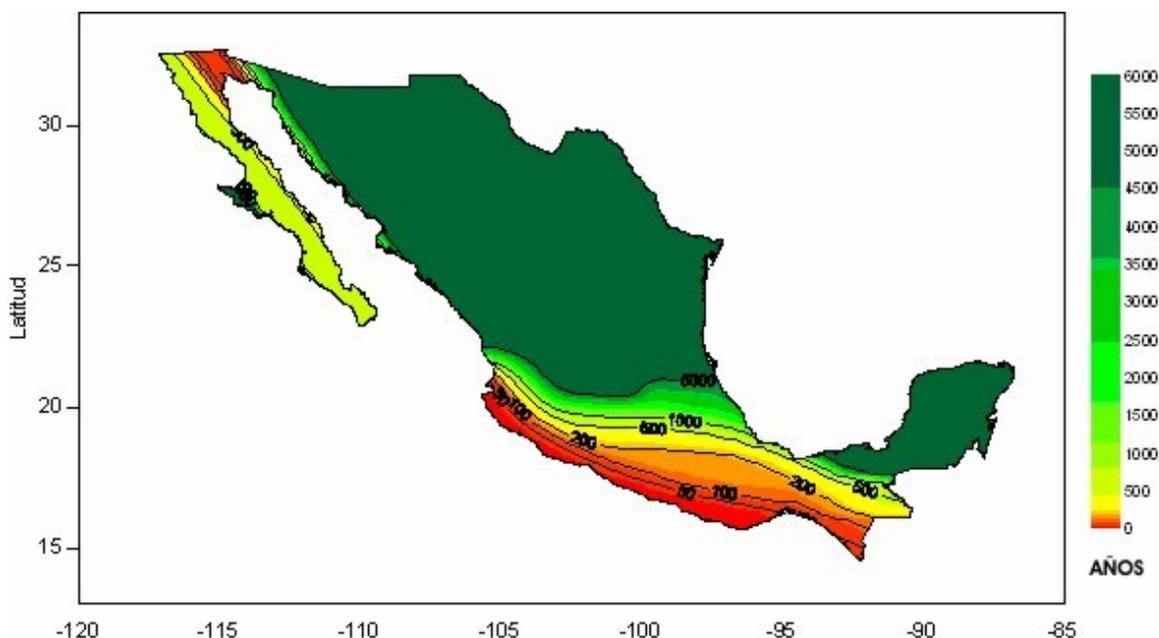


Fig. 1.11 Mapa de periodos de retorno para aceleraciones del 0.15 de g o mayores (CFE). La escala del lado derecho tiene valores en años

Para facilitar a cada estado la asignación de prioridades para la evaluación de la seguridad de las construcciones ante sismo en una zona determinada, o contar con parámetros ingenieriles básicos para el diseño, se han catalogado, mediante un algoritmo de interpolación, las 752 poblaciones con más de 10,000 habitantes de acuerdo a las cifras oficiales más recientes, proporcionadas por INEGI.

Aplicación

En la tabla que se presenta en el anexo 2 puede consultarse, para cada población seleccionada, el periodo promedio de repetición de una aceleración mínima que puede producir daños importantes a las construcciones. Si adicionalmente se toma en cuenta el volumen de

población, del cual un porcentaje significativo estaría expuesto a los efectos del sismo, pueden definirse prioridades para estudios específicos de seguridad estructural, actualización de reglamentos de construcción, etc.

Por ejemplo, para una localidad donde el periodo de retorno indicado en la lista sea de 25 años, significa que podrá ser afectada por una aceleración igual o mayor al 15% de g, 4 veces en un siglo, u 8 veces en 200 años, a consecuencia de sismos con epicentro en un cierto entorno de dicha localidad.

1.6.2.4. Peligro por Tsunami

Fuente de información

Este mapa fue publicado en el Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México, (CENAPRED, 2001). Se recomienda la consulta del catálogo de tsunamis ocurridos en México a partir del S. XVIII, incluido en dicha publicación, donde se presentan datos para localidades específicas.



Figura 1.12 - Áreas costeras susceptibles de afectación por tsunamis generados localmente o a distancias hasta de miles de kilómetros

Descripción y Alcance

A la secuencia de olas que se generan cuando cerca o en el fondo del océano ocurre un sismo, se le denomina tsunami o maremoto. En mar abierto, no es posible percibir el desplazamiento de dicha secuencia de olas. Sin embargo, al acercarse a la costa su altura aumenta significativamente, pudiendo alcanzar varios metros y provocar grandes pérdidas humanas y materiales.

En el mapa que se muestra simplemente se señalan las zonas que, con periodos de retorno muy variables, pueden estar sujetas a la influencia de olas de gran tamaño. El ancho de la franja de color no indica el área de influencia tierra adentro. La penetración de las olas sobre el continente, dependerá básicamente de la topografía en el área inmediata a la línea de costa. Las olas asociadas a maremotos pueden incluso penetrar a lo largo de ríos y arroyos.

Aplicación

Actualmente, para este fenómeno sólo se tienen mapas de peligro para tres ciudades costeras: Ensenada, Zihuatanejo y Salina Cruz (ver *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastre*, CENAPRED, 2001).

La altura máxima esperada para olas que impacten la franja inmediata a la línea de costa en la zona receptora de tsunamis lejanos es de 3 m. Para las zonas generadoras de sismos locales, la altura máxima reportada varía entre 7 y 11 m. En vista de esto último, y en tanto se carezca de mapas similares para el resto de los asentamientos costeros se recomienda establecer, de manera preliminar, la cota de 10 m como la *altura del peor escenario esperable de desastre*. Ésta deberá incluir desembocaduras de ríos, en vista de que el oleaje anormal puede avanzar a lo largo de los cauces.

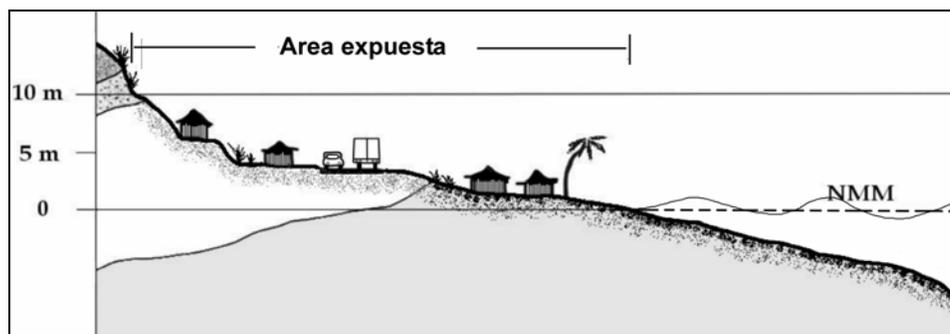


Figura 1.13 - Determinación del área susceptible de impacto por maremoto, en cualquier sitio costero, considerando el peor escenario posible ante la carencia de un mapa de peligro o riesgo específico. El área expuesta varía en función de la topografía local

La referencia de máxima penetración de un tsunami en México, conocido como la *Ola Verde* de Cuyutlán, en las costas de Colima, es de 1 km y corresponde a un sismo ocurrido el 22 de junio de 1932, con magnitud 6.9. Este dato, junto con la cota máxima mencionada y el mapa mostrado en la figura 1.13, permitirá configurar mapas de áreas afectables en regiones o municipios costeros que sirvan de base para iniciar acciones preventivas.

Aunque la frecuencia de ocurrencia de los maremotos es relativamente baja (no todos los sismos con epicentro en zona marina los generan), el daño que pueden producir, y que en algunos casos se suma al ocasionado por el sismo, puede alcanzar niveles considerables.

1.6.3 Investigaciones bibliográficas recomendadas

1.6.3.1 Mapas de intensidades sísmicas

Consultar los catálogos de mapas de intensidades de Mercalli (Figuroa, 1986), con información a partir de 1845, para determinar, al menos de manera aproximada, cuántas veces ha sido afectada una región con un cierto grado de intensidad, o bien, cuál es la intensidad máxima conocida en dicha región. Cabe aclarar que los catálogos mencionados no contienen mapas para la totalidad de sismos de gran magnitud ocurridos a partir de ese año. Sin embargo, se cuenta con datos acerca de 52 eventos, cuya distribución epicentral se considera representativa de las regiones sismogénicas en México.

Se recomienda poner especial atención en la cuantificación de intensidades mayores a VII en el sitio de interés, dado que a partir de ese nivel comúnmente se observan daños de leves a graves en las construcciones ordinarias, particularmente en vivienda rural, licuación de arenas y/o deslizamientos en laderas.

1.6.3.2 Referencias históricas sobre sismos

Consultar las descripciones sobre los daños y efectos producto de sismos históricos (Acosta y Suárez, 1996). Se recomienda elaborar una tabla donde se sintetizen los daños más frecuentes (por ejemplo: daños en torres de iglesias, agrietamiento del terreno natural, deslizamientos de tierra, etc.). Dicha síntesis permitirá estimar posibles consecuencias en edificaciones antiguas y recientes, carreteras, etc., sobre todo en aquellas zonas donde los sismos se repiten con poca frecuencia y algunas construcciones no hayan sido puestas a prueba por sacudidas fuertes.

1.6.4 Catálogos de sismos y tsunamis

Se presentan los catálogos de sismos de gran magnitud ocurridos en México, a partir del siglo XIX y para tsunamis, a partir del siglo XVIII. Para el caso del catálogo de sismos del siglo XIX, es probable que se encuentre incompleto debido a la escasa cobertura instrumental en esa época, aunque se considera que todos los eventos con magnitudes de 7.5 o mayores, se encuentran presentes. No obstante lo anterior, presenta información que confirma la actividad frecuente en zonas sismogénicas conocidas (como la costa del Pacífico) o bien aquella que constituye antecedentes muy relevantes de actividad sísmica con epicentros tierra adentro, como son los casos del sismo de Bavispe, Sonora, y de Jalisco en 1875 que causó graves daños en la zona central del estado.

Tabla 1.3 Catalogo de Temblores de Gran Magnitud en México (siglo XIX)

Fecha	Región	Lat °N	Long ° W	Magnitud
1806 Mar 25	Costa de Colima-Michoacán	18.9	103.8	
1818 May 31	Costa de Colima-Michoacán	19.1	103.6	7.5
1820 May 4	Costa de Guerrero	17.2	99.6	7.7
1837 Nov 22	Jalisco	20.0	105.0	7.6
1845 Mar 9	Oaxaca	16.6	97.0	7.7
1845 Abr 7	Costa de Guerrero	16.6	99.2	7.5
1854 May 5	Costa de Oaxaca	16.3	97.6	7.9
1858 Jun 19	Norte de Michoacán	19.6	101.6	7.7
1864 Oct 3	Puebla-Veracruz	18.7	97.4	7.5
1870 May 11	Costa de Oaxaca	15.8	96.7	7.3
1872 Mar 27	Costa de Oaxaca	15.7	96.6	7.9
1874 Mar 16	Guerrero	17.7	99.1	7.4
1875 Feb 11	Jalisco	21.0	103.8	7.3
1875 Mar 9	Costa de Jalisco-Colima	19.4	104.6	7.5
1879 May 17	Puebla	18.6	98.0	7.4
1882 Jul 19	Guerrero-Oaxaca	17.7	98.2	7.0
1887 May 3	Bavispe, Sonora	31.0	109.2	7.5
1887 May 29	Guerrero	17.2	99.8	7.3
1889 Sep 6	Costa de Guerrero	17.0	99.7	7.2
1890 Dic 2	Costa de Guerrero	16.7	98.6	7.0
1894 Nov 2	Costa de Oaxaca-Guerrero	16.5	98.0	7.2
1897 Jun 5	Costa de Oaxaca	16.3	95.4	7.4
1899 Ene 24	Costa de Guerrero	17.1	100.5	7.4
				7.9

Tabla 1.4 Catálogo de temblores de gran magnitud en México (siglos XX y XXI)

Fecha	Lat °N	Long °W	Prof (Km)	M max	Ms	Región
1900 Ene 20	20.000	105.000	33	7.4	7.3	Jalisco
1901 Dic 09	26.000	110.000	S	7.0	7.0	Golfo de California
1902 Ene 16	17.620	99.720	S	7.0	7.0	Guerrero
1902 Abr 19	14.900	91.500	25	7.5	7.4	Guatemala. 70 km de la frontera con México
1902 Sep 23	16.500	92.500	25	7.7	7.7	Chiapas
1902 Dic 12	29.000	114.000	S	7.1	7.0	Baja California Norte
1903 Ene 14	15.000	93.000	S	7.6	7.6	Costa de Chiapas
1907 Abr 15	16.700	99.200	33	7.6	7.6	Costa de Guerrero
1907 Oct 16	28.000	112.500	10	7.1	7.1	Golfo de California
1908 Mar 26	16.700	99.200	33	7.5	7.5	Costa de Guerrero
1908 Mar 27	17.000	101.000	33	7.0	7.0	Costa de Guerrero
1909 Jul 30	16.800	99.900	33	7.2	7.2	Costa de Guerrero
1911 Jun 07	17.500	102.500	33	7.6	7.6	Jalisco
1911 Dic 16	16.900	100.700	50	7.5	7.5	Costa de Guerrero
1912 Dic 09	15.500	93.000	S	7.0	7.0	Costa de Chiapas
1914 Mar 30	17.000	92.000	150	7.2	-	Chiapas
1915 Nov 21	32.000	115.000	10	7.0	7.0	Baja California Norte
1916 Jun 02	17.500	95.000	150	7.0	-	Sur de Veracruz
1921 Feb 04	15.000	91.000	120	7.4	-	Guatemala. 120 km de la frontera con México
1925 Nov 16	18.00	107.000	S	7.0	-	A 260 km. de las costas de Jalisco
1925 Dic 10	15.500	92.500	S	7.0	7.0	Chiapas
1928 Mar 22	15.670	96.100	33	7.5	7.3	Oaxaca
1928 Jun 17	16.330	96.700	33	7.6	7.6	Oaxaca
1928 Ago 04	16.830	97.610	33	7.4	7.4	Oaxaca
1928 Oct 09	16.300	97.300	33	7.5	7.4	Oaxaca
1931 Ene 15	16.340	96.870	40	7.8	7.6	Oaxaca
1932 Jun03	19.570	104.420	33	8.2	8.2	Jalisco
1932 Jun 18	19.500	103.500	33	7.8	7.8	Jalisco
1934 Nov 30	19.000	105.310	33	7.0	7.0	Costa de Jalisco
1934 Dic 31	32.000	114.750	S	7.1	7.1	Baja California Norte
1935 Dic 14	14.750	92.500	S	7.3	7.2	Costa de Chiapas
1937 Jul 26	18.450	96.080	85	7.3	7.2	Oaxaca-Veracruz
1937 Dic 23	17.100	98.070	33	7.4	7.3	Oaxaca - Guerrero
1940 May 19	32.700	115.500	S	7.1	7.1	Baja California Norte
1941 Abr 15	18.850	102.940	33	7.6	7.5	Michoacán
1942 Ago 06	14.800	91.300	50	7.9	7.7	Guatemala. 80 km de la frontera con México
1943 Feb 22	17.600	101.100	33	7.4	7.3	Guerrero
1944 Jun 28	15.000	92.500	S	7.1	7.1	Chiapas
1948 Ene 06	17.000	98.000	80	7.0	7.0	Oaxaca
1950 Sep 29	19.000	107.000	60	7.0	6.6	A 200 km de las costas de Jalisco
1950 Oct 23	14.300	91.800	33	7.2	7.2	Guatemala. 50 km de la frontera con México
1950 Dic 14	17.220	98.120	33	7.2	7.1	Oaxaca
1951 Dic 12	17.000	94.500	100	7.0	-	Oaxaca-Veracruz
1954 Abr 29	28.500	113.000	S	7.0	7.0	Golfo de California
1957 Jul 28	17.110	99.100	33	7.8	7.5	Guerrero
1962 May 11	17.250	99.580	33	7.2	7.0	Guerrero
1962 May 19	17.120	99.570	33	7.1	6.9	Guerrero
1964 Jul 06	18.030	100.770	55	7.2	-	Guerrero
1965 Ago 23	16.178	95.877	12	7.6	7.6	Oaxaca
1968 Ago 02	16.600	97.800	16	7.3	7.2	Oaxaca
1970 Abr 29	14.463	92.683	44	7.3	7.1	Costa de Chiapas
1973 Ene 30	18.412	103.019	24	7.6	7.3	Costa de Michoacán
1973 Ago 28	18.248	96.551	82	7.3	7.1	Oaxaca-Veracruz
1976 Feb 04	15.262	89.198	13	7.5	7.5	Guatemala. 150 km de la frontera con México
1978 Nov 29	16.013	96.586	23	7.6	7.6	Oaxaca
1979 Mar 14	17.750	101.263	25	7.4	7.4	Guerrero
1980 Oct 24	18.174	98.222	65	7.1	-	Oaxaca-Puebla
1981 Oct 25	18.088	102.061	21	7.3	7.3	Costa de Guerrero
1982 Jun 07	16.516	98.339	19	7.0	7.0	Oaxaca-Guerrero
1983 Dic 02	14.032	91.956	35	7.0	-	Guatemala. 70 km de la frontera con México
1985 Sep 19	18.419	102.468	15	8.1	8.1	Costa de Michoacán

Continúa...

Tabla 1.4 Continuación. Catálogo de temblores de gran magnitud en México (siglos XX y XXI)

Fecha	Lat °N	Long °W	Prof (Km)	M max	Ms	Región
1985 Sep 21	17.828	101.681	17	7.6	7.6	Costa de Michoacán
1986 Abr 30	18.361	103.045	22	7.0	7.0	Costa de Michoacán
1993 Sep 10	14.800	92.687	34	7.2	7.2	Costa de Chiapas
1995 Sep 14	16.752	98.667	21	7.3	7.2	Oaxaca-Guerrero
1995 Oct 09	18.993	104.245	25	8.0	7.3	Colima-Jalisco
1995 Oct 21	16.811	93.474	160	7.1	-	Chiapas
1996 Feb 25	15.880	97.980	15	7.1	6.9	Costa de Oaxaca
1997 Ene 11	18.340	102.580	40	7.1	6.9	Michoacán
1999 Jun 15	18.133	97.539	63	7.0	6.5	Puebla
1999 Sep 30	16.010	97.000	42	7.5	7.5	Oaxaca
2003 Ene 22	18.600	104.22	10	7.6	7.3	Costa de Colima

En la tabla 1.4 se presenta para cada evento el valor máximo de magnitud de una de las tres escalas más usadas en la investigación sismológica, Mb (magnitud de ondas de cuerpo), Ms (magnitud de ondas superficiales) o Mw (magnitud de momento sísmico), de acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional. Además, se presentan de manera particular las magnitudes Ms para la mayoría de los eventos, en vista de que son las más utilizadas en estimaciones de riesgo sísmico y generalmente reportadas en los medios de difusión como valores de la escala Richter.

Debe tomarse en cuenta que pueden encontrarse diferencias menores en localización geográfica, profundidad o valores de magnitud con respecto a otros catálogos, sin que deban interpretarse necesariamente como errores. Los parámetros sísmicos, especialmente aquellos de las primeras décadas, fueron determinados con un número escaso de instrumentos, que aún no contaban con todos los atributos tecnológicos actuales.

S significa superficial, es decir con profundidad menor de 40 km.

Las fechas corresponden a tiempo del meridiano de Greenwich (tiempo local + 6 horas; tiempo local + 5 en horario de verano).

Cabe señalar la posibilidad de consultar, a través de la página del SSN, (<http://www.ssn.unam.mx>), o bien solicitar directamente a dicha dependencia, un listado que concentre la actividad sísmica en un área geográfica específica (por ejemplo, un cuadrado de 100 km de lado o en un radio determinado).

Esto permitirá complementar la historia sísmica y estimar la influencia, no sólo de los grandes temblores sino la de eventos locales de magnitud menor que si bien llegan a ser sentidos por la población y no representan necesariamente un peligro mayor, sí ameritan campañas informativas y permiten despejar dudas en cuanto a antecedentes sísmicos de la región. Por ejemplo, si se presentan sismos locales en Tabasco o el sur de Tamaulipas, los pobladores podrían alarmarse y afirmarían que ahí *nunca ha temblado*. Una consulta de este tipo para la zona en cuestión mostrará que años o décadas atrás se ha registrado sismicidad de bajo nivel.

Tabla 1.5 - Catálogo de tsunamis a partir del Siglo XVIII

Fecha	Epicentro del sismo (° N, ° W)	Zona del sismo	Magnitud del sismo	Lugar de registro del tsunami	Altura máxima de olas (m).
1732 Feb 25	No definido	Guerrero	-	Acapulco	4.0
1754 Sep 1	No definido	Guerrero	-	Acapulco	5.0
1787 Mar 28	No definido	Guerrero	>8.0 (?)	Acapulco	3.0-8.0
1787 Abr 3	No definido	Oaxaca	-	Pochutla y Juquila	4.0 (*)
1820 May 4	17.2°, 99.6°	Guerrero	7.6	Acapulco	4.0
1833 Mar 10	No definido	Guerrero	-	Acapulco	(*)
1834 Mar 11	No definido	Guerrero	-	Acapulco	(*)
1845 Abr 7	16.6°, 99.2°	Guerrero	-	Acapulco	-
1852 Nov 29	No definido	Baja California	-	Río Colorado	3.0 (*)
1852 Dic 4	No definido	Guerrero	-	Acapulco	-
1870 May 11	15.8°, 96.7°	Oaxaca	7.9	Puerto Ángel	(*)
1875 Feb 23	No definido	Colima	-	Manzanillo	(*)
1907 Abr 15	16.7°, 99.2°	Guerrero	7.9	Acapulco	2.0
1909 Jul 30	16.8°, 99.8°	Guerrero	7.5	Acapulco	-
1925 Nov 16	18.0°, 107.0°	Jalisco	7.0	Zihuatanejo	7.0-11.0
1928 Mar 22	15.7°, 96.1°	Oaxaca	7.7	Puerto Ángel	(*)
1928 Jun 16	16.3°, 96.7°	Oaxaca	8.0	Puerto Ángel	-
1932 Jun 3	19.5°, 104.3°	Jalisco	8.2	Manzanillo San Pedrito Cuyutlán San Blas	2.0 3.0 - -
1932 Jun 18	19.5°, 103.5°	Jalisco	7.8	Manzanillo	1.0
1932 Jun 22	19.0°, 104.5°	Jalisco	6.9	Cuyutlán Manzanillo	9.0-10.0 -
1932 Jun 29	No definido	Jalisco	-	Cuyutlán	(*)
1948 Dic 4	22.0°, 106.5°	Nayarit	6.9	Islas Mariás	2.05-5.0
1950 Dic 14	17.0°, 98.1°	Guerrero	7.3	Acapulco	0.3
1957 Jul 28	16.5°, 99.1°	Guerrero	7.7	Acapulco Salina Cruz	2.6 0.3
1962 May 11	17.2°, 99.6°	Guerrero	7.0	Acapulco	0.8
1962 May 19	17.1°, 99.6°	Guerrero	7.2	Acapulco	0.3
1965 Ago 23	16.3°, 95.8°	Oaxaca	7.8	Acapulco	0.4
1973 Ene 30	18.4°, 103.2°	Colima	7.5	Acapulco Manzanillo Salina Cruz La Paz Mazatlán	0.4 1.1 0.2 0.2 0.1
1978 Nov 29	16.0°, 96.8°	Oaxaca	7.8	P. Escondido	1.5 (*)
1979 Mar 14	17.3°, 101.3°	Guerrero	7.6	Acapulco Manzanillo	1.3 0.4
1981 Oct 25	17.8°, 102.3°	Guerrero	7.3	Acapulco	0.1
1985 Sep 19	18.1°, 102.7°	Michoacán	8.1	Lázaro Cárdenas Ixtapa-Zihuatanejo Playa Azul Acapulco Manzanillo	2.5 3.0 2.5 1.1 1.0
1985 Sep 21	17.6°, 101.8°	Michoacán	7.6	Acapulco Zihuatanejo	1.2 2.5
1995 Oct 9	18.9°, 104.1°	Col-Jalisco	7.6	Manzanillo Barra de Navidad Melaque Cuastecomate La Manzanilla Boca de Iguanas El Tecuán Punta Careyes Chamela San Mateo Pérula Punta Chalacatepec	2.0 5.1 4.5 4.4 0.4 5.1 3.8 3.5 3.2 4.9 3.4 2.9

(*) Tsunami probable

Al igual que en el caso de los sismos, se considera que el catálogo de tsunamis mexicanos se encuentra incompleto para épocas antiguas, esencialmente debido a falta de instrumentos de registro y la escasez de población en algunas regiones. Puede observarse que, para tsunamis recientes, la precisión en la determinación de la altura de las olas es alta y, para un mismo evento, el tamaño de éstas puede variar en distancias relativamente cortas (por ejemplo, para el sismo del 9 de octubre de 1995).

1.7 ESTUDIOS DE SITIO

1.7.1 Introducción

Los mapas anteriormente presentados muestran información de carácter general que permite definir criterios básicos para el diseño de obras civiles, definición de áreas de reserva para desarrollo urbano, planeación de acciones preventivas, etc., logrando de esa manera un diagnóstico global del nivel de peligro sísmico en la región.

Sin embargo, en aquellas zonas con grandes espesores de sedimentos blandos, usualmente valles aluviales, con alta densidad de construcción y/o rápido crecimiento urbano, es altamente recomendable valorar con precisión el nivel de peligro sísmico, en vista de que el movimiento sísmico es amplificado significativamente. La evidencia más clara de este fenómeno, conocido mundialmente como efecto de sitio, ha sido el nivel de daño producido en la Ciudad de México, como consecuencia de los sismos de septiembre de 1985, a pesar de encontrarse aproximadamente a 400 km. de distancia de los epicentros.

Se conoce como efecto de sitio a la respuesta sísmica del terreno con características significativamente distintas en amplitud, duración o contenido de frecuencias de un área relativamente reducida, con respecto al entorno regional. En otras palabras, podría decirse que el efecto de sitio es aquella condición bajo la cual se llegan a observar intensidades sísmicas notablemente distintas y bien localizadas sin que haya una correlación con la atenuación normal de la energía sísmica con la distancia (figuras 1.14 y 1.15).

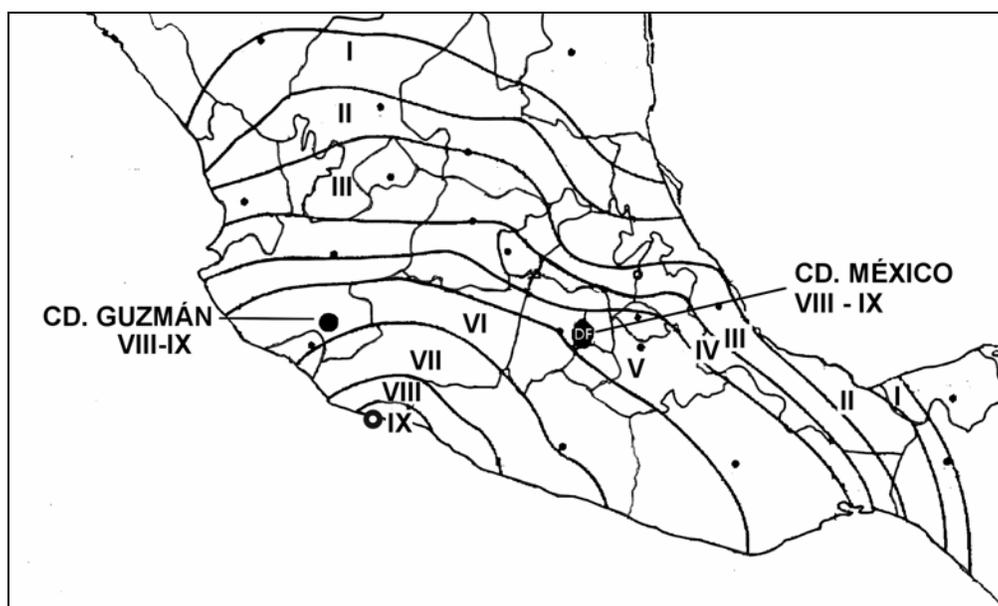


Figura 1.14. Isosistas del 19 de septiembre de 1985

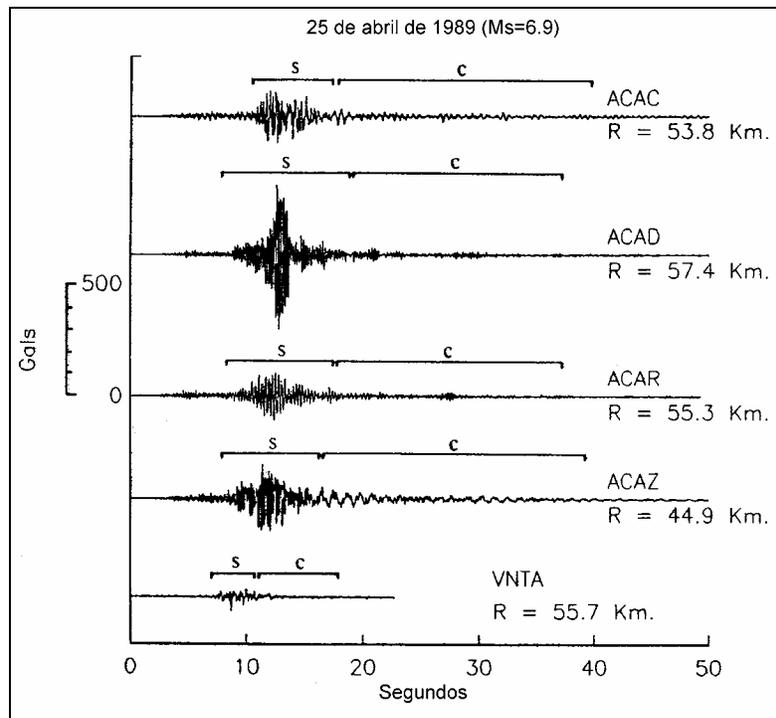


Figura 1.15 Acelerogramas obtenidos en el área de Acapulco, durante el mismo sismo, en diferentes tipos de suelo. Las distancias epicentrales para cada sitio son similares

Los mapas para estimación de peligro sísmico a nivel regional (regionalización sísmica o mapas de aceleraciones máximas para distintos periodos de retorno), no señalan aquellos lugares proclives a la amplificación del movimiento del terreno. Así, para conocer de manera cuantitativa la respuesta del terreno ante la excitación sísmica, es necesario llevar a cabo estudios específicos, los cuales se describen a continuación.

Es necesario aclarar que estos estudios requieren la participación o asesoría de especialistas en cada materia, tanto por la necesidad de manejar instrumentos para la adquisición de datos, como por el análisis de la información e interpretación de resultados.

1.7.2 Estudios de geología superficial

Para atender este rubro será necesario recopilar mapas de geología superficial, por ejemplo del INEGI o del Consejo de Recursos Minerales (COREMI), escala 1:50,000 o mayor (1:5,000). Para los sitios o áreas de mayor interés será indispensable verificar la información geológica, de acuerdo con el uso que se le destine.

Para definir espesores y algunas propiedades de capas superficiales, es recomendable emplear información de pozos geotécnicos o de aquellos perforados para suministro de agua. Dicha información puede ser colectada a partir de datos de las instancias municipales o estatales encargadas de la explotación de mantos acuíferos, por ejemplo. En caso de que la información se considere confiable y razonablemente distribuida en la zona de interés, se podrá formar un mapa que muestre la variación de espesores y posible configuración de las diferentes capas y sustrato rocoso.

Como parte del reconocimiento de campo, es aconsejable señalar, al menos de manera preliminar, aquellas zonas proclives a sufrir deslizamientos de ladera, caídos o flujos de lodo y escombros. Los dos primeros casos pueden ocurrir como consecuencia de sismos intensos con epicentro a corta distancia (aproximadamente 100 km); los flujos de material térreo ocurren como consecuencia de lluvias abundantes o deshielo.

1.7.2.1 Áreas con potencial de licuación de arenas

Durante el reconocimiento de la geología superficial pueden identificarse fácilmente los cuerpos constituidos por arenas y limos, especialmente aquellos para los que se estime o se conozca un espesor de al menos 10 m.

Las condiciones esenciales para que se llegue a presentar el fenómeno de licuación en este tipo de depósitos, además del espesor ya mencionado, es que se tenga un nivel freático a poca profundidad (menos de 3 m.), que el grado de compactación sea bajo, equivalente a 20 golpes en pruebas de penetración estándar (G. de Vallejo, 2002) y que el sitio en cuestión se ubique a menos de 200 km de posibles epicentros de sismos con magnitudes mayores o iguales que 6.

Considerando lo anterior, a reserva de que se consulten métodos cuantitativos en la literatura geotécnica, y que requieren pruebas de laboratorio, se pueden identificar y reportar áreas susceptibles a la licuación por efecto de sismo.

Con base en numerosos casos a nivel mundial, se ha podido identificar que a partir del grado VI de la escala de Mercalli, o en terrenos sujetos a aceleraciones de 0.1 g o mayores, existe la posibilidad de que se produzca el fenómeno de licuación. Así, los antecedentes de intensidades observadas en la región, o las aceleraciones máximas del terreno presentadas para distintos periodos de retorno, representan información valiosa para estimar el potencial de licuación en un sitio dado.

1.7.3 Zonificación geotécnica de valles aluviales

Con base en datos de geología superficial, clasificación de materiales en función de sus propiedades geotécnicas, espesores de capas, etc., es posible definir la zonificación geotécnica de un área.

Debido a la complejidad del medio geológico y las diferentes aplicaciones y finalidades de los mapas geotécnicos, no existe un procedimiento estándar para su elaboración (G. de Vallejo, 2002).

Sin embargo, el mapa de zonificación debe incluir, al menos:

- Delimitación de zonas de terreno firme, zonas blandas y aquellas consideradas de transición
- Descripción litológica de cada unidad (tipos de rocas o sedimentos que las componen, por ejemplo rocas volcánicas, gravas, arcillas, cuerpos de arena, etc)
- Profundidades del nivel freático
- Propiedades (resistencia a la penetración, densidad, plasticidad, grado de fracturamiento y de alteración, etc.)

El mapa de zonificación deberá estar acompañado de información respecto de las investigaciones realizadas, metodologías y criterios empleados en su elaboración, clasificación geológica y geotécnica de los materiales, columnas de sondeos, fotografías, etc.

De tal manera, será posible conocer las zonas que pueden ser susceptibles a la amplificación del movimiento sísmico o bien, identificar áreas aptas para distintos usos o realización de obras.

Idealmente, se pueden encontrar mapas de zonificación geotécnica en las normas técnicas complementarias de los reglamentos de construcción, ya sea en la sección de diseño por sismo o de diseño y construcción de cimentaciones (p.ej. el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal).

1.7.4 Microzonificación sísmica

De acuerdo con datos y experiencias derivados de sismos recientes en diversos lugares del mundo, se ha observado que los daños se acentúan notablemente en aquellas ciudades ubicadas en valles aluviales con grandes espesores de sedimentos blandos, principalmente arcillas, arenas y limos. Aunque la distancia al epicentro sea de varios cientos de kilómetros, como es el caso de la ciudad de México con respecto a los temblores costeros, los efectos en las construcciones y el terreno se acentúan debido a la amplificación de las ondas sísmicas, ocasionada por el contraste de densidades y velocidades de propagación para las ondas sísmicas entre el cuerpo sedimentario y el basamento rocoso (figura 1.16).

Por lo anterior, resulta indispensable conocer con detalle la respuesta sísmica del cuerpo sedimentario y calcular las implicaciones que ésta representa para los distintos tipos constructivos posibles. Para ello habrá que tomar en cuenta la zonificación geotécnica mencionada y diseñar programas de observación instrumental de señales sísmicas.

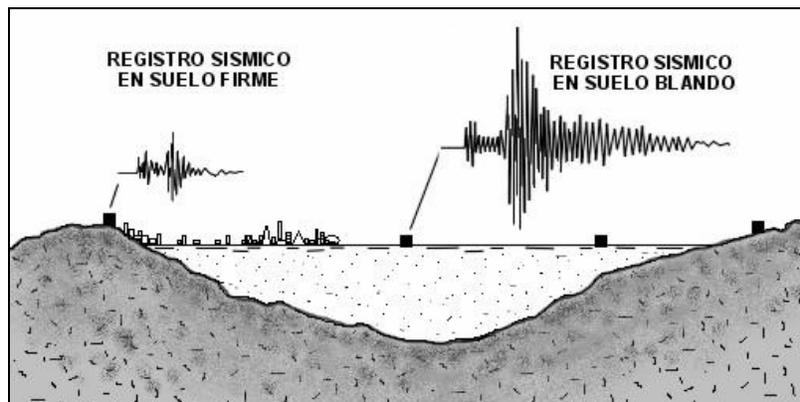


Figura 1.16 - Diferencias de amplitud en registros sísmicos obtenidos en distintos tipos de suelo para el mismo temblor

A continuación, se mencionan los procedimientos que proporcionan información para una valoración detallada del efecto de sitio. Por su naturaleza, requieren de la intervención de grupos universitarios de investigación en ingeniería sismológica o ingenieros consultores con experiencia.

1.7.4.1 Evaluación de amplificación relativa usando movimientos fuertes

Una de las técnicas experimentales más efectivas en la valoración del efecto de sitio, implica el uso de acelerógrafos y/o sismógrafos ubicados en terrenos blando y firme, para registrar eventos con magnitudes moderadas y grandes, de tal manera que se pueda hacer una comparación de los propios registros sísmicos y, sobre todo, de los espectros de amplitudes de Fourier para conocer la respuesta sísmica de los diferentes tipos de terreno.

En este caso se elige un sitio de referencia, necesariamente en terreno firme (rocoso) que sirva de base de comparación para los registros y espectros obtenidos a partir de estaciones en terreno blando.

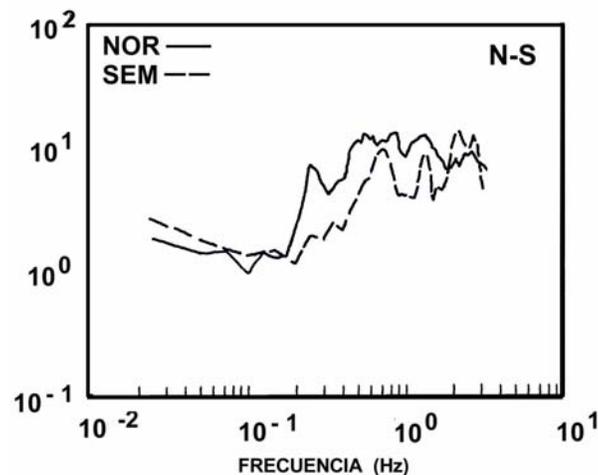


Fig. 1.17 Razones de espectros de amplitud de Fourier para dos sitios de suelo blando en Ciudad Guzmán, Jalisco calculadas a partir de uno de los componentes horizontales de registros sísmicos de magnitud moderada. En el eje vertical se observa el número de veces que la señal sísmica se amplifica en función de la frecuencia

Entre otros resultados, se pueden obtener los periodos dominantes de vibración del terreno (parámetros directamente relacionado con la altura de los edificios y su seguridad) y factores de amplificación (número de veces que el movimiento se amplifica en suelo blando con respecto a suelo firme) para una gama relativamente amplia de frecuencias propias del terreno.

En necesario aclarar que aunque este procedimiento es bastante confiable para la valoración de la respuesta dinámica del terreno, se requiere del registro de varios temblores a fin de confirmar los valores de amplificación y frecuencias dominantes ante la variabilidad de azimut, profundidad, magnitud y distancia epicentral.

1.7.4.2 Evaluación de amplificación relativa usando vibración ambiental

El análisis de la vibración ambiental (microtremores), producto del tránsito de vehículos, funcionamiento de maquinaria, etc. ha sido ampliamente utilizada para conocer las características del terreno ante la excitación sísmica, especialmente en áreas donde se carece de instrumentación sísmica fija, donde la actividad sísmica es muy escasa o bien en situaciones en que se tiene poco tiempo y dinero para valorar el efecto de sitio.

Una técnica muy conocida es la que planteó Nakamura (1989) y que consiste en el cálculo de cocientes espectrales de componentes horizontales respecto del vertical. Los máximos de dichos cocientes señalan el periodo dominante del terreno, el cual ordinariamente muestra una mayor definición en terrenos altamente compresibles.

Con respecto a la valoración de la amplificación relativa, esta técnica ha mostrado resultados consistentes con aquellos obtenidos con movimientos fuertes en algunos casos (Lermo *et al.*, 1991; Lermo y Chávez-García, 1994b), mientras que en otros la confiabilidad ha resultado ser menor (Gutiérrez y Singh, 1992).

1.7.4.3 Mapa de isoperiodos

Como parte importante de una microzonificación se contempla la elaboración de mapas donde, mediante curvas que unen valores iguales, se exprese la distribución de periodos dominantes del terreno. Comúnmente, los mapas de isoperiodos guardan una cierta correlación con aquellos de geología superficial, mostrando periodos cortos (p. ej. 0.1 ó 0.2 segundos) en terrenos firmes, mientras que en rellenos aluviales llegan a observarse (como es el caso de la Ciudad de México) periodos de 3, 4 ó 5 segundos.

Este tipo de mapas puede integrarse colectando, mediante un acelerógrafo o sismógrafo portátil, señales de vibración ambiental en tantos sitios como sea posible y calculando sus espectros de amplitud de Fourier para obtener los periodos dominantes.

Aunque un mapa de periodos configurado con el solo análisis de microtremores puede proporcionar una idea más o menos aproximada de la respuesta dinámica, se recomienda especialmente que, al menos en aquellos sitios donde se ubicaron acelerógrafos o sismógrafos, se verifiquen los periodos derivados del análisis de la vibración ambiental con el propósito de minimizar las incertidumbres en análisis posteriores (figura 1.18).

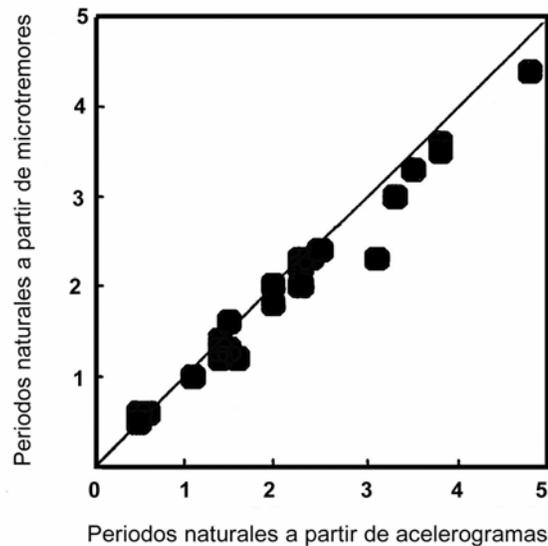


Fig. 1.18 Correlación de periodos dominantes obtenidos con movimientos fuertes y vibración ambiental en la zona de lago de la Ciudad de México. Esta comparación permite verificar el grado de confiabilidad con respecto al uso de la vibración ambiental

El conocer los periodos dominantes del terreno, así como su distribución, resulta de gran utilidad para estimar la coincidencia de éstos con los periodos naturales de los edificios. Cuando ambos periodos son iguales o muy parecidos, se presenta un fenómeno de amplificación del movimiento de la estructura que generalmente se denomina como resonancia, el cual implica desplazamientos y deformaciones mucho más grandes, en comparación con otros edificios donde no hay coincidencia de periodos y, en consecuencia, una mayor probabilidad de daño. Este efecto tuvo una influencia determinante para que muchas edificaciones presentaran daño significativo o colapsaran en 1985, en la Ciudad de México.

1.7.4.4 Prueba de estacionariedad

En vista de que la vibración ambiental es producida esencialmente por la actividad humana, es factible que el nivel de excitación del terreno varíe significativamente a lo largo del día. Con el fin de garantizar la estabilidad de la señal, y en consecuencia la confiabilidad de los espectros calculados, se recomienda realizar una prueba de estacionariedad, eligiendo para ello al menos un sitio que se considere representativo, en términos geotécnicos, del área sujeta a investigación.

En la figura 1.19 se presenta el resultado de una prueba de estacionariedad realizada en zona de lago de la Ciudad de México, para la que se registró vibración ambiental cada hora a lo largo de un día. Aunque las amplitudes para las horas de mínima actividad muestran diferencias importantes, el periodo dominante se muestra estable. De no cumplirse esta condición, los periodos dominantes de una zona resultarían inciertos y, en consecuencia, las valoraciones basadas en vibración ambiental ofrecerían poca confiabilidad.

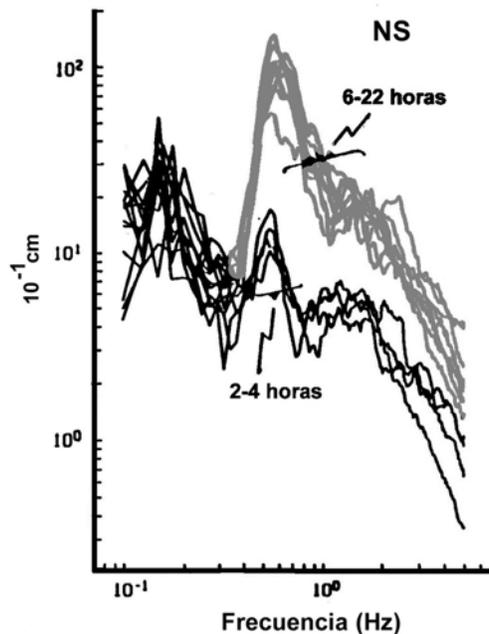


Fig. 1.19 Espectros de amplitud de Fourier, para componentes horizontales de señales de vibración ambiental obtenidas en la ciudad de México. Es claro que los máximos espectrales, asociados al periodo dominante del sitio, no cambian significativamente aun en horas de mínima actividad humana

1.7.4.5 Función de transferencia teórica

Con base en un modelo unidimensional del terreno, donde se suponen dimensiones laterales infinitas, y con los parámetros característicos tales como el espesor de los estratos, densidad, coeficiente de amortiguamiento y la velocidad de onda de corte, puede calcularse una función de transferencia que representa la respuesta dinámica del suelo en términos de la frecuencia (Thompson, 1950; Haskell, 1953). Actualmente, esto se facilita mediante el empleo de un programa diseñado para computadora personal (Santoyo, 1991).

Los parámetros señalados pueden obtenerse a través de sondeos geotécnicos, pruebas de laboratorio o prospección geofísica (por ejemplo perfiles de refracción). No obstante, la resolución que alcance una estimación de este tipo dependerá, en buena medida, de una adecuada construcción del modelo. Para ello, es altamente recomendable que se incluya el mayor número de estratos que integren el cuerpo sedimentario en estudio, con sus respectivos espesores y velocidades de onda de corte.

Actualmente se cuenta con un sistema de sonda suspendida que, a diferencia de los métodos geofísicos tradicionales (refracción sísmica, *cross-hole*, etc.) no tiene prácticamente limitaciones en cuanto a la profundidad de investigación. Dicho instrumento proporciona de manera precisa las velocidades de onda de corte a lo largo de un pozo, facilitando un cálculo más confiable de la función de transferencia.

Este procedimiento es particularmente recomendable en áreas donde se planea la construcción de edificios de gran altura, hospitales, instalaciones industriales, etc. Con base en ello, se podrá calcular la respuesta específica del terreno, facilitando el diseño sismorresistente.

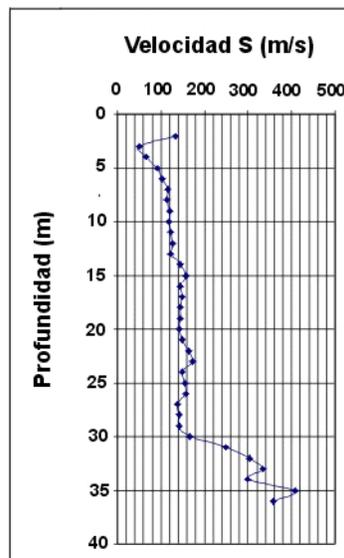


Figura 1.20 - Perfil de velocidades de ondas S. Muestra los valores de velocidades de propagación en las distintas capas. A partir de los 30 m se observa un aumento notable de la velocidad, señalando capas más competentes

En el ejemplo de la figura 1.20, es posible apreciar el comportamiento homogéneo de la formación en los primeros 30 metros y la presencia de capas más resistentes, al menos, entre los 30 y 36 metros.

ALGUNAS APLICACIONES PARA EL ESTADO DE COLIMA

Clasificación con respecto a la Regionalización Sísmica: ZONA D (Alta exposición)
Información derivada de los mapas de peligro:

Tabla 1.6 – Periodos de retorno y aceleraciones máximas

Periodos de Retorno (años)	Aceleraciones Máximas (gal)
10	80-103
50	149-235
100	190-298
500	405-585
1000	492-711

Considere que a partir de 100 ó 150 gal se pueden esperar afectaciones a las construcciones, dependiendo de los materiales y técnicas constructivas empleadas. En este caso, se observa que dichos niveles de aceleración o mayores están contemplados para periodos de retorno relativamente cortos que incluyen el tiempo de vida útil de la mayoría de las construcciones, particularmente la vivienda. De lo anterior se concluye que es fundamental contar con normativas para el diseño y construcción, así como asegurar su aplicación.

Exposición al maremoto:

Las costas del estado están ubicadas en la zona de recepción de eventos lejanos y generación de maremotos locales. El evento de mayor importancia es el del 22 de junio de 1932, que provocó en Cuyutlán olas con altura hasta de 10 m, con influencia tierra adentro hasta un kilómetro. Ninguna instalación portuaria o asentamiento costero cuenta a la fecha con mapas de peligro para este fenómeno. Es aconsejable que los municipios costeros de Manzanillo, Armería y Tecomán empleen el criterio de la cota de 10 m, para señalar la zona afectable.

Tabla 1.7 - Resultado de la consulta de mapas de intensidades para los últimos 100 años, en dos sitios representativos del estado, considerando los sismos de mayor magnitud

Fecha	Magnitud	Manzanillo	Cd. Colima
Enero 20, 1900	7.4	-	VIII
Junio 3, 1932	8.2	VIII	VIII
Junio 18, 1932	7.8	VIII-IX	IX
Abril 15, 1941	7.6	VIII	X
Enero 30, 1973	7.6	VIII	VIII
Octubre 8, 1995	8.0	VIII-IX	VII
Enero 22, 2003	7.6	VII-VIII	VIII

Licuación de arenas:

Se cuenta con literatura técnica que reporta la licuación de arenas durante el temblor de octubre de 1995, tanto en terrenos naturales como rellenos artificiales, siendo más notables en estos últimos. Entre los sitios afectados se tienen el puerto interior de San Pedrito, el área de la Central Termoeléctrica de Manzanillo, etc.

Mapas de geología superficial

La ciudad de Colima y Manzanillo cuentan con mapas de geología superficial que muestran la distribución de materiales con respecto a la traza urbana. Se muestra el mapa correspondiente a la ciudad de Colima, con datos obtenidos hasta 1994.

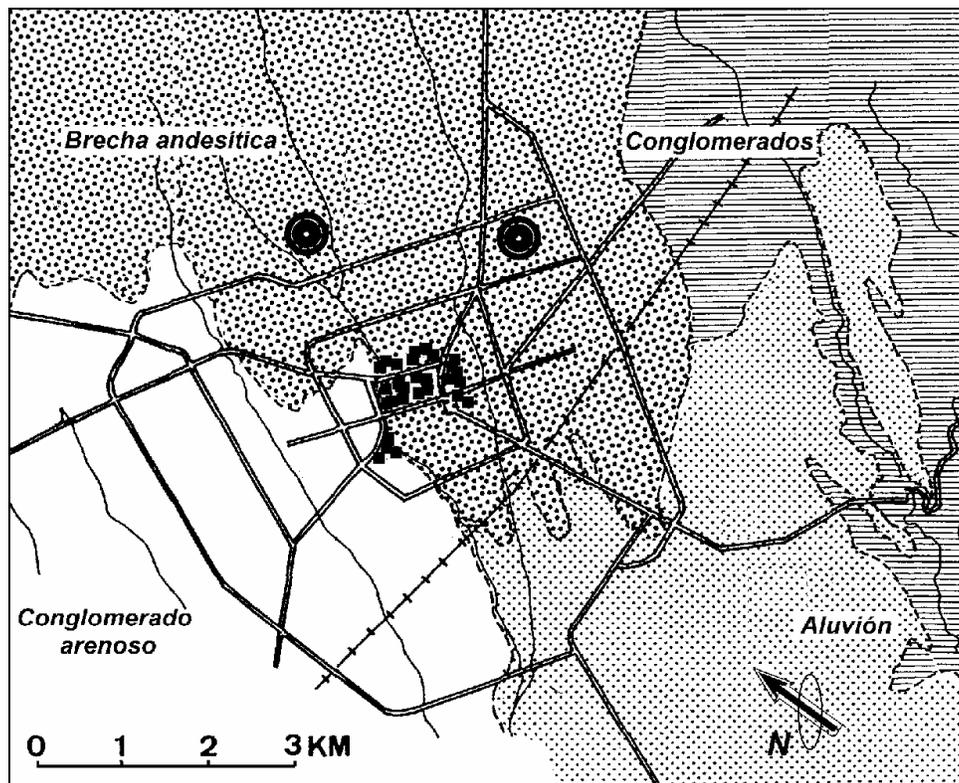


Figura 1.21 - Geología superficial del área urbana de Colima

Microzonificación sísmica

Se muestra un mapa de isoperiodos obtenido con vibración ambiental para la ciudad de Colima. Asimismo, se observan sitios donde se obtuvieron valores de amplificación relativa en 1994 y los sitios de dos pozos donde se obtuvieron perfiles de velocidades de propagación de ondas S, como parte del proyecto de microzonificación que el CENAPRED llevó a cabo en 1994 (Gutiérrez, *et al.*, 1996).

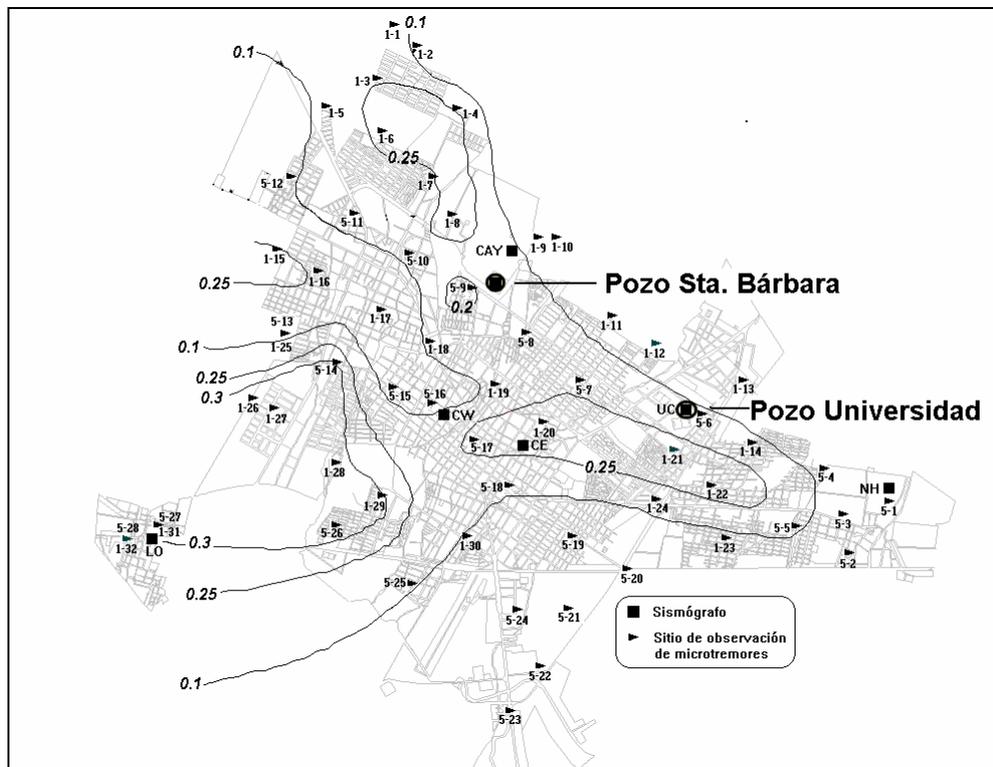


Figura 1.22 - Mapa de isoperiodos (segundos) para la ciudad de Colima

Perfil de velocidades de ondas S en la ciudad de Colima

Se presenta el perfil de velocidades de ondas S para el pozo ubicado en el campus de la Universidad de Colima.

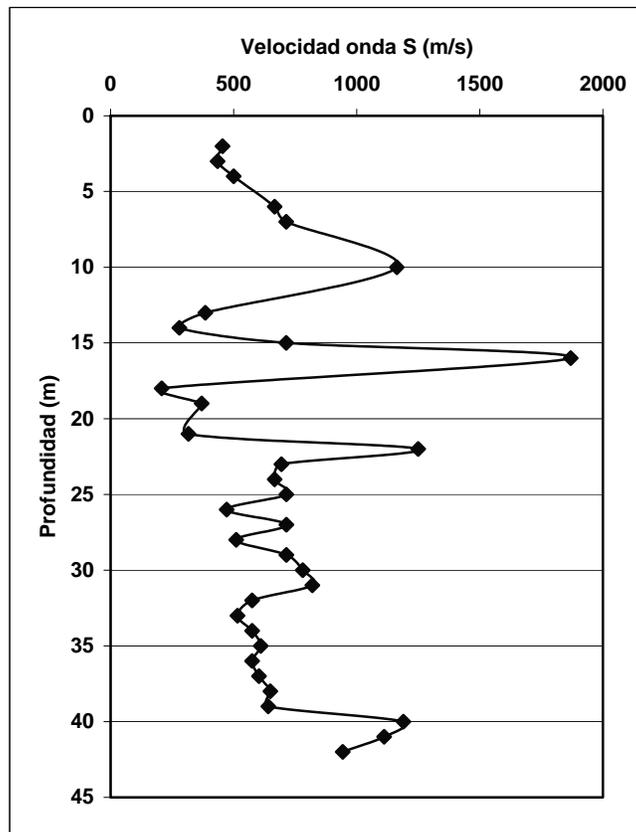


Figura 1.23 - Perfil de velocidades de ondas S para el pozo ubicado en el campus de la Universidad de Colima

CONCLUSIONES

El presente documento plantea, por una parte, un procedimiento sencillo que permite a personal no especializado coleccionar, generar y organizar la información esencial para conocer el nivel general de exposición a los efectos de los sismos.

Para estudios de detalle o cuantitativos se explican los procedimientos más adecuados, cuya aplicación requerirá la participación de grupos universitarios de investigación o profesionales con experiencia. En especial, se recomienda que los estudios de microzonificación sísmica sean realizados no sólo mediante el empleo de vibración ambiental (como es el caso de un buen número de ciudades en el país) sino empleando movimientos fuertes, con el fin de lograr mayor confiabilidad.

Se incluye a lo largo del texto la explicación de conceptos básicos para facilitar la comprensión de los temas, homogeneizar el tratamiento de los diversos aspectos relacionados y establecer un lenguaje adecuado, a fin de evitar interpretaciones erróneas.

Ante las particularidades para la identificación, análisis o diagnóstico de fenómenos sísmicos que se puedan presentar en algún municipio o localidad, queda abierta la posibilidad para que sean atendidas con el apoyo del propio CENAPRED o grupos locales de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Bard, P.Y., Duval, A.M., Lebrun, B., Lachet, C., Riepl, J. and Hatzfeld, D., "Reliability of the H/V technique for site effects measurement and experimental assessment", Seventh International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Istanbul, July, 19-24, 1997.

Bolt, B. A. "Terremotos". Ediciones ORBIS, S.A. 1986.

Bullen, K. "An Introduction to the Theory of Seismology". Cambridge Univ. Press 1963.

Centro Nacional de Prevención de Desastres. "Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastre". Secretaría de Gobernación. 2001.

Comisión Federal de Electricidad. "Manual de Diseño de Obras Civiles". Sección C, Tomo I, Tema 1, Capítulo 3 Diseño por Sismo. 1993.

Comisión Federal de Electricidad. "Espectros de Diseño para el Territorio Mexicano". Información aún no publicada. 2006.

Chávez-García, F.J., Lermo, J., Cuenca, J., Aguilar, A., Rivera, J. y Hernández, H. "Microzonificación sísmica de la zona urbana de la ciudad de Puebla", informe técnico final del Instituto de Ingeniería UNAM a CONACYT, Proyecto 2548, 1994.

Du Bois S.M. and Smith, A.W. "The 1887 earthquake in San Bernardino Valley, Sonora: Historic Accounts and intensity patterns in Arizona". Special Paper No. 3. The University of Arizona, 1980.

Esteva, L. "Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería", *Serie Azul 246*, Instituto de Ingeniería, UNAM 1970.

Esteva, L., "Seismicity", Capítulo 6 de *Seismic Risk and Engineering Decisions*, editado por C. Lomnitz y E. Rosenblueth, Elsevier, 1976.

Finn, W. D. L. "Geotechnical engineering aspects of microzonation", Proc, Fourth Int, Conf. on Seismic Zonation, Stanford, California, I, 199-259. 1991.

Flores, L., López, O., Pacheco, M., Reyes, C., y Rivera, D. "Evaluación de la Vulnerabilidad de la Vivienda ante Sismo y Viento" Capítulo I. Vulnerabilidad Física y Social. CENAPRED; 2006.

González de Vallejo L. "Ingeniería Geológica". Prentice Hall, 2002.

Gutiérrez, C., Masaki, K., Lermo, J. y Cuenca, J. , "Microzonificación sísmica de la ciudad de Colima", Cuaderno de investigación No.33, CENAPRED 1996.

Gutiérrez, C and Singh S. K., "A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: comparison of results", *Bull. Seism. Soc. Am.* 78, 42-63, 1992.

Haskell, N.A. "The dispersion of surface waves in multilayered media". *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 43; 1953.

Lachet, C. and Bard P. Y. "Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique", *J. Phys. Earth.*, 42, 377-397, 1994.

Lermo, J. y. Chávez-García F.J. "Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, 413-423, 1994.

Nakamura Y. "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface", *QR of RTRI*, 30, No.1, 25-33, 1989.

Pacheco, J. and Sykes L. "Seismic Moment Catalog of Large Shallow Earthquakes 1900-1989". *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 82, No. 3., pp 1306-1349; 1992.

Pérez-Rocha, L. E., Sánchez-Sesma, F.J., Ordaz, M., Singh, S.K. and Reinoso, E. "Strong ground motion prediction at México City", *Proceedings 12WCEE*, New Zealand, paper 2693; 2000.

PSM "Mapas de peligro sísmico en México", Programa elaborado por el Instituto de Ingeniería, UNAM; CENAPRED, CFE y el IIE. México D.F., 1996.

Quaas R., L. Alcántara, J.M. Espinosa E. Mena, J.A. Otero, S. Medina C. Javier, B. López, C. Pérez, R. Vázquez, J. A. Flores, F. González. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*. "La Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes. Un sistema que integra la información acelerográfica registrada en México en los últimos 35 años". 1996

Reinoso, E. "Efectos sísmicos locales en el Valle de México: amplificación medida en la zona lacustre", *Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 2, 224-236, Manzanillo, México; 1991.

Richter, C.F. "Elementary Seismology". W.H. Freeman and Company; 1958.

Rosenblueth E., Ordaz M. "Use of seismic data from similar regions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15 619-634; 1987.

Santoyo, M. "Programas para el cálculo de funciones de transferencia y sismogramas sintéticos para un modelo unidimensional de subsuelo ante incidencia de ondas tipo SH". CENAPRED, 1991

Scientific American. "Continents Adrift and Continents Aground". W. H. Freeman and Co.; 1976.

Singh, S.K., Astiz, L., y Havskov, J. (), "Seismic gaps and recurrence period of large earthquake along the Mexican subduction zone: a reexamination", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 827-843; 1981.

Singh, S.K. y Ordaz, M. "Sismicidad y Movimientos Fuertes en México: Una Visión Actual". CENAPRED; 1994.

Singh S.K., M. Ordaz, M. Rodríguez, R. Quaas, e. Mena, M. Ottaviani, J.G. Anderson, y D. Almora. "Analysis of near-source strong motion recordings along the Mexican subduction zone", *Bull. Seism. Soc. Am.*, (79) 1697-1717; 1989.

Singh, S.K., J. Lermo, T. Domínguez, M. Ordaz, J.M. Espinosa, E. Mena y R. Quaas. "A study of amplification of seismic waves in the Valley of Mexico with respect to a hill zone site", *Earthquake Spectra* 4 (4), 653-673; 1988.

Thompson, W.T. "Transmission of elastic waves through a stratified solid" *Journal of Applied Physics*, Vol. 21; 1950.

Turcotte D. and Schubert G. *Geodynamics. Application of Continuum Physics to Geological Problems*. J. Wiley & Sons; 1992.

UNAM, Instituto de Ingeniería. "Guía metodológica para el análisis del peligro, vulnerabilidad, riesgo y pérdidas causadas por desastres naturales o antropogénicos y su reducción y prevención. UNAM; 2003.

GLOSARIO

Acelerógrafo: Instrumento para medir aceleraciones del terreno en función del tiempo. Usualmente registra movimientos producidos por temblores fuertes o con epicentros cercanos. Al registro producido se le conoce como acelerograma. Los acelerógrafos también se colocan en edificios para analizar su comportamiento en diferentes niveles de la construcción (cimientos, pisos intermedios, azotea).

Amplitud (de una onda): Altura máxima de la cresta o del valle de una onda a partir del valor cero o línea base (aquella que corresponde a nula excitación sísmica).

Azimut: Ángulo medido a partir del Norte en el sentido de las agujas del reloj.

Brecha sísmica: Segmento o área de contacto entre placas, particularmente de tipo de subducción (p.ej. costa occidental de México) o de movimiento lateral (falla de San Andrés), en el que no se ha presentado un sismo de gran magnitud (mayor o igual a 7) en al menos 30 años. Actualmente, la brecha sísmica más importante en México es la correspondiente a la costa de Guerrero.

Caída de esfuerzos: Disminución repentina de los esfuerzos presentes en el plano de contacto entre dos placas tectónicas o bloques de una falla cualquiera, como consecuencia de la ocurrencia de un temblor

Corteza terrestre: Capa rocosa externa de la Tierra. Su espesor varía entre 10 y 70 km.

Enjambre (de terremotos): Serie de terremotos con epicentros en un área relativamente reducida, sin que uno de ellos llegue a tener una magnitud mucho mayor que lo distinga claramente del resto. Puede durar unos cuantos días o hasta varias semanas o meses. Pueden ser sentidos por pobladores cercanos sin que lleguen a representar un nivel alto de peligro.

Epicentro: Punto en la superficie de la Tierra resultado de proyectar sobre ésta el hipocentro de un terremoto. Se encuentran usualmente en un mapa, señalando el lugar justo sobre el origen del movimiento sísmico.

Esfuerzo: Medida de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo. En Física se expresa como fuerza por unidad de área.

Falla: Superficie de ruptura en rocas a lo largo de la cual ha habido movimiento relativo, es decir, un bloque respecto del otro. Se habla particularmente de falla activa cuando en ella se han localizado focos de sismos o bien, se tienen evidencias de que en tiempos históricos han habido desplazamientos. El desplazamiento total puede variar de centímetros a kilómetros dependiendo del tiempo durante el cual la falla se ha mantenido activa (años o hasta miles y millones de años). Usualmente, durante un temblor grande, los desplazamientos típicos son de uno o dos metros.

Foco: Punto de origen del sismo, en el interior de la Tierra. Lugar donde empieza la ruptura que se extiende formando un plano de falla. También nombrado como hipocentro.

Intensidad (sísmica): Número que se refiere a los efectos de las ondas sísmicas en las construcciones, en el terreno natural y en el comportamiento o actividades del hombre. Los grados de intensidad sísmica, expresados con números romanos del I al XII, correspondientes a diversas localidades se asignan con base en la escala de Mercalli. Contrasta con el término magnitud que se refiere a la energía total liberada por el sismo.

Isosistas: Líneas de contorno dibujadas en un mapa para separar un nivel de intensidad sísmica de otro.

Litosfera: Cubierta rígida de la Tierra. Está constituida por la corteza y la parte superior del manto; su espesor promedio no excede 100 km. Se encuentra dividida en grandes porciones móviles llamadas placas tectónicas.

Longitud de onda: Distancia entre dos puntos o fases sucesivos de una onda, por ejemplo crestas o valles

Magnitud (de un sismo): Valor relacionado con la cantidad de energía liberada por el sismo. Dicho valor no depende, como la intensidad, de la presencia de pobladores que observen y describan los múltiples efectos del sismo en una localidad dada. Para determinar la magnitud se utilizan, necesariamente uno o varios registros de sismógrafos y una escala estrictamente cuantitativa, sin límites superior ni inferior. Una de las escalas más conocidas es la de Richter, aunque en la actualidad frecuentemente se utilizan otras como la de ondas superficiales (Ms) o de momento sísmico (Mw).

Manto terrestre: Porción intermedia de la Tierra, cubierta por la corteza y que descansa sobre el núcleo. Su espesor es de unos 2,850 kilómetros; está compuesto por rocas densas y dividido en varias capas concéntricas.

Núcleo terrestre: Parte central de la Tierra que se inicia a una profundidad superior a los 2,900 kilómetros, compuesta de hierro y silicatos. Con base en el estudio de ondas sísmicas, se descubrió que consta de dos porciones concéntricas: una externa, que se comporta como un fluido, y una interna que es sólida.

Ondas love: Ondas sísmicas que tienen en la superficie del terreno su máxima amplitud, decayendo ésta con la profundidad. El movimiento del terreno se da sólo en sentido horizontal, perpendicular a la dirección de propagación.

Ondas P: Primera onda, la más rápida, que viaja desde el lugar del evento sísmico a través de las rocas y que consiste en un tren de compresiones y dilataciones sucesivas del material terrestre.

Ondas Rayleigh: Ondas sísmicas que alcanzan su máxima amplitud en la superficie terrestre, con movimiento del suelo sólo en el plano vertical, similar en cierta forma al del oleaje.

Ondas s: Ondas sísmicas secundarias que viajan más lentamente, aunque más energéticas, que las ondas P y que consisten en vibraciones transversales a la dirección de propagación. No pueden propagarse en líquidos debido a la ausencia de rigidez.

Ondas de cuerpo: Ondas sísmicas, P y S, que se propagan a través de los materiales terrestres. Las S no se transmiten a través de fluidos. La velocidad típicas de las ondas P, en roca, es de 6 km/s, mientras que para las S se tienen 3.5 km/s.

Ondas superficiales: Ondas sísmicas que sólo se propagan sobre la superficie terrestre, con una velocidad menor que la de las ondas S. Hay dos tipos de ondas superficiales: Rayleigh y Love.

Periodo (de una onda): Intervalo de tiempo entre dos crestas sucesivas en un tren de ondas sinusoidales. El periodo es el inverso de la frecuencia en un evento cíclico.

Periodo de retorno: Es el tiempo medio, expresado en años, que tiene que transcurrir para que ocurra un sismo en que se exceda una aceleración dada.

Periodo estructural: Es el periodo fundamental de una estructura, expresado en segundos, ante la excitación sísmica.

Placa (tectónica): Porción de la litosfera terrestre, de grandes dimensiones y espesor no mayor a 100 km, que se mueve con relación a otras partes de la litosfera sobre el manto terrestre. Las placas chocan en zonas de convergencia y se separan en zonas de divergencia.

Plano de falla: Superficie de contacto entre dos bloques rocosos con movimiento entre sí.

Predicción (de terremotos): Determinación del lugar, fecha y magnitud de un terremoto. Hasta ahora no se cuenta con un procedimiento que defina con seguridad estos tres parámetros.

Premonitores: Terremotos de magnitud reducida que preceden al mayor de una serie concentrada en un volumen de corteza restringido, en un cierto lapso.

Profundidad focal (de un terremoto): Profundidad del foco por debajo de la superficie de la Tierra.

Réplicas: Terremotos menores que siguen a uno mayor, concentrados en un volumen restringido de la corteza.

Riesgo sísmico: Producto de tres factores: El valor de los bienes expuestos (C), tales como vidas humanas, edificios, carreteras, puertos, tuberías, etc; la vulnerabilidad (V), que es un indicador de la susceptibilidad a sufrir daño, y el peligro (P) que es la probabilidad de que ocurra un hecho potencialmente dañino; así $R=CxVxP$.

Sismicidad: La ocurrencia de terremotos de cualquier magnitud en un espacio y periodo dados

Sismógrafo: Instrumento de alta sensibilidad para registrar los movimientos de la superficie de la Tierra, en función del tiempo, causados por el paso de las ondas sísmicas. Al registro producido se le conoce como sismograma.

Sismología: El estudio de los terremotos; fuentes sísmicas, propagación de ondas a través de la Tierra, excitación del terreno en superficie y a profundidad, etc.

Sismómetro: Elemento sensor de un sismógrafo, normalmente un péndulo suspendido.

Sismoscopio: Sismógrafo elemental que sólo deja constancia de un movimiento del terreno relativamente intenso, sin marcas de tiempo.

Tectónica de placas: Teoría del movimiento e interacción de placas que explica la ocurrencia de los terremotos, volcanes y formación de montañas como consecuencias de grandes movimientos superficiales horizontales.

Teoría del rebote elástico: La teoría de la generación de los terremotos que propone que las fallas permanecen fijas mientras se acumulan los esfuerzos lentamente en las rocas vecinas y luego se desplazan de repente, liberando la energía acumulada.

Terremoto (sismo o temblor): Vibraciones de la Tierra causado por el paso de ondas sísmicas irradiadas desde una fuente de energía elástica.

Tsunami (o maremoto): Ola con altura y penetración tierra adentro superiores a las ordinarias, generalmente causada por movimientos del suelo oceánico en sentido vertical, asociado a la ocurrencia de un terremoto de gran magnitud con epicentro en una región oceánica.

ANEXO 1

VALORES DE ACELERACIÓN MÁXIMA DEL TERRENO, CORRESPONDIENTES A PERIODOS DE RETORNO DE 10, 100 Y 500 AÑOS PARA TODOS LOS MUNICIPIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

Nota: Cuando se presenta más de un valor para un determinado periodo de retorno, significa que el área del municipio correspondiente está afectada por dichos valores, de acuerdo con el mapa obtenido con el programa PSM.

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
AGUASCALIENTES				
001	AGUASCALIENTES (AGS)	11	27	45
002	ASIENTOS (AGS)	11	27	45
003	CALVILLO (AGS)	11	27	45
004	COSIO (AGS)	11	27	45
005	JESUS MARIA (AGS)	11	27	45
006	PABELLON DE ARTEAGA (AGS)	11	27	45
007	RINCON DE ROMOS (AGS)	11	27	45
008	SAN JOSE DE GRACIA (AGS)	11	27	45
009	TEPEZALA (AGS)	11	27	45
010	EL LLANO (AGS)	11	27	45
011	SAN FRANCISCO DE LOS ROMO (AGS)	11	27	45
BAJA CALIFORNIA				
001	ENSENADA (BCN)	11-34-57	81-135-190	225-315
002	MEXICALI (BCN)	34-57-80	135-190-244	225-315-405
003	TECATE (BCN)	34-57	135-190	225-315-405
004	TIJUANA (BCN)	34	81-135	225
005	PLAYAS DE ROSARITO (BCN)	34	81-135	225
BAJA CALIFORNIA SUR				
001	COMONDU (BCS)	34	81-135	225-315
002	MULEGE (BCS)	11-34-57	81-135-190	225-315
003	PAZ, LA (BCS)	34-57	81-135	225-315
008	CABOS, LOS (BCS)	34	81-135	225
009	LORETO (BCS)	34-57	135-90	225-315
CAMPECHE				
001	CALKINI (CAM)	11	27	45
002	CAMPECHE (CAM)	11	27	45
003	CARMEN (CAM)	11	27	45
004	CHAMPOTON (CAM)	11	27	45
005	HECELCHAKAN (CAM)	11	27	45
006	HOPELCHEN (CAM)	11	81-27	45-135
007	PALIZADA (CAM)	11	27	45
008	TENABO (CAM)	11	27	45
009	ESCARCEGA (CAM)	11	27	45
010	CALAKMUL(CAM)	11	27	45-135
011	CANDELARIA(CAM)	11	27	45-135
COAHUILA DE ZARAGOZA				
001	ABASOLO (COA)	11	27	45
002	ACUÑA (COA)	11	27	45
003	ALLENDE (COA)	11	27	45
004	ARTEAGA (COA)	11	27	45
005	CANDELA (COA)	11	27	45
006	CASTAÑOS (COA)	11	27	45
007	CUATROCIENEGAS (COA)	11	27	45
008	ESCOBEDO (COA)	11	27	45
009	FRANCISCO I. MADERO (COA)	11	27	45
010	FRONTERA (COA)	11	27	45
011	GENERAL CEPEDA (COA)	11	27	45
012	GUERRERO (COA)	11	27	45
013	HIDALGO (COA)	11	27	45
014	JIMENEZ (COA)	11	27	45
015	JUAREZ (COA)	11	27	45
016	LAMADRID (COA)	11	27	45
017	MATAMOROS (COA)	11	27	45
018	MONCLOVA (COA)	11	27	45
019	MORELOS (COA)	11	27	45
020	MUZQUIZ (COA)	11	27	45
021	NADADORES (COA)	11	27	45
022	NAVA (COA)	11	27	45
023	OCAMPO (COA)	11	27	45
024	PARRAS (COA)	11	27	45
025	PIEDRAS NEGRAS (COA)	11	27	45
026	PROGRESO (COA)	11	27	45
027	RAMOS ARIZPE (COA)	11	27	45

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
028	SABINAS (COA)	11	27	45
029	SACRAMENTO (COA)	11	27	45
030	SALTILLO (COA)	11	27	45
031	SAN BUENAVENTURA (COA)	11	27	45
032	SAN JUAN DE SABINAS (COA)	11	27	45
033	SAN PEDRO (COA)	11	27	45
034	SIERRA MOJADA (COA)	11	27	45
035	TORREON (COA)	11	27	45
036	VIESCA (COA)	11	27	45
037	VILLA UNION (COA)	11	27	45
038	ZARAGOZA (COA)	11	27	45
COLIMA				
001	ARMERIA (COL)	80-103	298	585
002	COLIMA (COL)	80-103	244-298	495-585
003	COMALA (COL)	80-57	190-244	405-495
004	COQUIMATLAN (COL)	80-103	244-298	495-585
005	CUAUHTEMOC (COL)	80-57	190-244	405-495
006	IXTLAHUACAN (COL)	103-80	298	495-585
007	MANZANILLO (COL)	103-80	298	495-585
008	MINATITLAN (COL)	80	244-298	495
009	TECOMAN (COL)	80-103	298	585
010	VILLA DE ALVAREZ (COL)	80-57	190-244-298	405-495
CHIAPAS				
001	ACACOYAGUA (CHS)	57-80	135-190-244	225-315
002	ACALA (CHS)	34	81	135
003	ACAPETAHUA (CHS)	80-103	190-244	315-405
004	ALTAMIRANO (CHS)	34	81	135
005	AMATAN (CHS)	34	81	135
006	AMATENANGO DE LA FRONTERA (CHS)	34	81-135	135-225
007	AMATENANGO DEL VALLE (CHS)	34	81	135
008	ANGEL ALBINO CORZO (CHS)	57	135	225-315
009	ARRIAGA (CHS)	57-80	135-190	225-315
010	BEJUCAL DE OCAMPO (CHS)	34	135	225
011	BELLA VISTA (CHS)	34-57	81-135	225
012	BERRIOZABAL (CHS)	34	81	135
013	BOCHIL (CHS)	34	81	135
014	BOSQUE, EL (CHS)	34	81	135
015	CACAHOTAN (CHS)	57	135-190	225-315
016	CATAZAJA (CHS)	11	27-81	45-135
017	CINTALAPA (CHS)	34-57	81-135	135-225
018	COAPILLA (CHS)	34	81	135
019	COMITAN DE DOMINGUEZ (CHS)	34	81	135
020	CONCORDIA, LA (CHS)	34-57-80	81-135-190	225-315
021	COPAINALA (CHS)	34	81	135
022	CHALCHIHUITAN (CHS)	34	81	135
023	CHAMULA (CHS)	34	81	135
024	CHANAL (CHS)	34	81	135
025	CHAPULTENANGO (CHS)	34	81	135
026	CHENALHO (CHS)	34	81	135
027	CHIAPA DE CORZO (CHS)	34	81	135-225
028	CHIAPILLA (CHS)	34	81	135
029	CHICOASEN (CHS)	34	81	135
030	CHICOMUSELO (CHS)	34-57	81-135	135-225
031	CHILON (CHS)	34-11	81	135
032	ESCUINTLA (CHS)	57-80	135-190-244	225-315
033	FRANCISCO LEON (CHS)	34	81	135
034	FRONTERA COMALAPA (CHS)	34	81	135-225
035	FRONTERA HIDALGO (CHS)	80-103	190-244	315-405
036	GRANDEZA, LA (CHS)	34-57	135	225
037	HUEHUETAN (CHS)	80-103	190-244	315-405
038	HUIXTAN (CHS)	34	81	135
039	HUITIUPAN (CHS)	34	81	135
040	HUIXTLA (CHS)	57-80-103	190-244	315-405
041	INDEPENDENCIA, LA (CHS)	34	81	135
042	IXHUATAN (CHS)	34	81	135
043	IXTACOMITAN (CHS)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
044	IXTAPA (CHS)	34	81	135
045	IXTAPANGAJOYA (CHS)	34	81	135
046	JIQUIPILAS (CHS)	34-57	81-135	135-225
047	JITOTOL (CHS)	34	81	135
048	JUAREZ (CHS)	34-11	81	135
049	LARRAINZAR (CHS)	34	81	135
050	LIBERTAD, LA (CHS)	11	27-81	135
051	MAPASTEPEC (CHS)	57-80-103	135-190-244	315-405
052	MARGARITAS, LAS (CHS)	34	81	135
053	MAZAPA DE MADERO (CHS)	57	135	225
054	MAZATAN (CHS)	80-103	190-244	315-405
055	METAPA (CHS)	80	190	315
056	MITONTIC (CHS)	34	81	135
057	MOTOZINTLA (CHS)	57	135-190	225-315
058	NICOLAS RUIZ (CHS)	34	81	135
059	OCOSINGO (CHS)	34-11	81	135
060	OCOTEPEC (CHS)	34	81	135
061	OCOZOCOAUTLA DE ESPINOSA (CHS)	34	81-135	135-225
062	OSTUACAN (CHS)	34	81	135
063	OSUMACINTA (CHS)	34	81	135
064	OXCHUC (CHS)	34	81	135
065	PALENQUE (CHS)	11	81	45-135
066	PANTELHO (CHS)	34	81	135
067	PANTEPEC (CHS)	34	81	135
068	PICHUCALCO (CHS)	34	81	135
069	PIJJIAPAN (CHS)	80-103	135-190-244	315-405
070	PORVENIR, EL (CHS)	57	135	225
071	VILLA COMALTITLAN (CHS)	57-80-103	190-244	315-405
072	PUEBLO NUEVO SOLISTAHUACAN (CHS)	34	81	135
073	RAYON (CHS)	34	81	135
074	REFORMA (CHS)	11	81	135
075	ROSAS, LAS (CHS)	34	81	135
076	SABANILLA (CHS)	34	81	135
077	SALTO DE AGUA (CHS)	11	81	135
078	SAN CRISTOBAL DE LAS CASAS (CHS)	34	81	135
079	SAN FERNANDO (CHS)	34	81	135
080	SILTEPEC (CHS)	57	135-190	225-315
081	SIMOJOVEL (CHS)	34	81	135
082	SITALA (CHS)	34	81	135
083	SOCOLTENANGO (CHS)	34	81	135-225
084	SOLOSUCHIAPA (CHS)	34	81	135
085	SOYALO (CHS)	34	81	135
086	SUCHIAPA (CHS)	34	81	135
087	SUCHIATE (CHS)	80-103	190-244	315-405
088	SUNUAPA (CHS)	34	81	135
089	TAPACHULA (CHS)	57-80-103	135-190-244	225-315-405
090	TAPALAPA (CHS)	34	81	135
091	TAPILULA (CHS)	34	81	135
092	TECPATAN (CHS)	34	81	135
093	TENEJAPA (CHS)	34	81	135
094	TEOPISCA (CHS)	34	81	135
096	TILA (CHS)	34-11	81	135
097	TONALA (CHS)	57-80-103	135-190	225-315-405
098	TOTOLAPA (CHS)	34	81	135
099	TRINITARIA, LA (CHS)	34	81	135
100	TUMBALA (CHS)	34-11	81	135
101	TUXTLA GUTIERREZ (CHS)	34	81	135
102	TUXTLA CHICO (CHS)	57-80	190	315-405
103	TUZANTAN (CHS)	57-80	135-190	315
104	TZIMOL (CHS)	34	81	135
105	UNION JUAREZ (CHS)	57	135	225-315
106	VENUSTIANO CARRANZA (CHS)	34	81	135-225
107	VILLA CORZO (CHS)	34-57	81-135-190	135-225-315
108	VILLAFLORES (CHS)	34-57	81-135	135-225-315
109	YAJALON (CHS)	34-11	81	135
110	SAN LUCAS (CHS)	34	81	135
111	ZINACANTAN (CHS)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
112	SAN JUAN CANCUC (CHS)	34	81	135
113	ALDAMA(CHS)	34	81	135
114	BENERÉRITO DE LAS AMÉRICAS (CHS)	34-11	81	135
115	MARAVILLA TENEJAPA(CHS)	34-11	81	135
116	MARQUÉS DE COMILLAS(CHS)	34-11	81	135
117	MONTECRISTO DE GUERRERO(CHS)	57	135	225-315
118	SAN ANDRÉS DURAZNAL(CHS)	34	81	135
119	SANTIAGO EL PINAR(CHS)	34	81	135
CHIHUAHUA				
001	AHUMADA (CHI)	11	27	45
002	ALDAMA (CHI)	11	27	45
003	ALLENDE (CHI)	11	27	45
004	AQUILES SERDAN (CHI)	11	27	45
005	ASCENSION (CHI)	11	27	45
006	BACHINIVA (CHI)	11	27	45
007	BALLEZA (CHI)	11	27	45
008	BATOPILAS (CHI)	11	27	45
009	BOCOYNA (CHI)	11	27	45
010	BUENAVENTURA (CHI)	11	27	45
011	CAMARGO (CHI)	11	27	45
012	CARICHI (CHI)	11	27	45
013	CASAS GRANDES (CHI)	11	27	45
014	CORONADO (CHI)	11	27	45
015	COYAME (CHI)	11	27	45
016	CRUZ, LA (CHI)	11	27	45
017	CUAUHTEMOC (CHI)	11	27	45
018	CUSIHUIRIACHI (CHI)	11	27	45
019	CHIHUAHUA (CHI)	11	27	45
020	CHINIPAS (CHI)	11	27	45
021	DELICIAS (CHI)	11	27	45
022	DOCTOR BELISARIO DOMINGUEZ (CHI)	11	27	45
023	GALEANA (CHI)	11	27	45
024	GENERAL TRIAS (CHI)	11	27	45
025	GOMEZ FARIAS (CHI)	11	27	45
026	GRAN MORELOS (CHI)	11	27	45
027	GUACHOCHI (CHI)	11	27	45
028	GUADALUPE (CHI)	11	27	45
029	GUADALUPE Y CALVO (CHI)	11	27	45
030	GUAZAPARES (CHI)	11	27	45
031	GUERRERO (CHI)	11	27	45
032	HIDALGO DEL PARRAL (CHI)	11	27	45
033	HUEJOTITAN (CHI)	11	27	45
034	IGNACIO ZARAGOZA (CHI)	11	27	45
035	JANOS (CHI)	11	27	45
036	JIMENEZ (CHI)	11	27	45
037	JUAREZ (CHI)	11	27	45
038	JULIMES (CHI)	11	27	45
039	LOPEZ (CHI)	11	27	45
040	MADERA (CHI)	11	27	45
041	MAGUARICHI (CHI)	11	27	45
042	MANUEL BENAVIDES (CHI)	11	27	45
043	MATACHI (CHI)	11	27	45
044	MATAMOROS (CHI)	11	27	45
045	MEOQUI (CHI)	11	27	45
046	MORELOS (CHI)	11	27	45
047	MORIS (CHI)	11	27	45
048	NAMIQUIPA (CHI)	11	27	45
049	NONOAVA (CHI)	11	27	45
050	NUEVO CASAS GRANDES (CHI)	11	27	45
051	OCAMPO (CHI)	11	27	45
052	OJINAGA (CHI)	11	27	45
053	PRAXEDIS G. GUERRERO (CHI)	11	27	45
054	RIVA PALACIO (CHI)	11	27	45
055	ROSALES (CHI)	11	27	45
056	ROSARIO (CHI)	11	27	45
057	SAN FRANCISCO DE BORJA (CHI)	11	27	45
058	SAN FRANCISCO DE CONCHOS (CHI)	11	27	45

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
059	SAN FRANCISCO DEL ORO (CHI)	11	27	45
060	SANTA BARBARA (CHI)	11	27	45
061	SATEVO (CHI)	11	27	45
062	SAUCILLO (CHI)	11	27	45
063	TEMOSACHI (CHI)	11	27	45
064	TULE, EL (CHI)	11	27	45
065	URIQUE (CHI)	11	27	45
066	URUACHI (CHI)	11	27	45
067	VALLE DE ZARAGOZA (CHI)	11	27	45
DISTRITO FEDERAL				
002	AZCAPOTZALCO (D-F)	11	81	135
003	COYOACAN (D-F)	11	81	135
004	CUAJIMALPA DE MORELOS (D-F)	11	81	135
005	GUSTAVO A. MADERO (D-F)	11	81	135
006	IZTACALCO (D-F)	11	81	135
007	IZTAPALAPA (D-F)	11	81	135
008	MAGDALENA CONTRERAS, LA (D-F)	11	81	135
009	MILPA ALTA (D-F)	34-11	81	135
010	ALVARO OBREGON (D-F)	11	81	135
011	TLAHUAC (D-F)	11	81	135
012	TLALPAN (D-F)	34-11	81	135
013	XOCHIMILCO (D-F)	34-11	81	135
014	BENITO JUAREZ (D-F)	11	81	135
015	CUAUHTEMOC (D-F)	11	81	135
016	MIGUEL HIDALGO (D-F)	11	81	135
017	VENUSTIANO CARRANZA (D-F)	11	81	135
DURANGO				
001	CANATLAN (DGO)	11	27	45
002	CANELAS (DGO)	11	27	45
003	CONETO DE COMONFORT (DGO)	11	27	45
004	CUENCAME (DGO)	11	27	45
005	DURANGO (DGO)	11	27	45
006	GENERAL SIMON BOLIVAR (DGO)	11	27	45
007	GOMEZ PALACIO (DGO)	11	27	45
008	GUADALUPE VICTORIA (DGO)	11	27	45
009	GUANACEVI (DGO)	11	27	45
010	HIDALGO (DGO)	11	27	45
011	INDE (DGO)	11	27	45
012	LERDO (DGO)	11	27	45
013	MAPIMI (DGO)	11	27	45
014	MEZQUITAL (DGO)	11	27	45
015	NAZAS (DGO)	11	27	45
016	NOMBRE DE DIOS (DGO)	11	27	45
017	OCAMPO (DGO)	11	27	45
018	ORO, EL (DGO)	11	27	45
019	OTAEZ (DGO)	11	27	45
020	PANUCO DE CORONADO (DGO)	11	27	45
021	PEÑON BLANCO (DGO)	11	27	45
022	POANAS (DGO)	11	27	45
023	PUEBLO NUEVO (DGO)	11	27	45
024	RODEO (DGO)	11	27	45
025	SAN BERNARDO (DGO)	11	27	45
026	SAN DIMAS (DGO)	11	27	45
027	SAN JUAN DE GUADALUPE (DGO)	11	27	45
028	SAN JUAN DEL RIO (DGO)	11	27	45
029	SAN LUIS DEL CORDERO (DGO)	11	27	45
030	SAN PEDRO DEL GALLO (DGO)	11	27	45
031	SANTA CLARA (DGO)	11	27	45
032	SANTIAGO PAPASQUIARO (DGO)	11	27	45
033	SUCHIL (DGO)	11	27	45
034	TAMAZULA (DGO)	11	27	45
035	TEPEHUANES (DGO)	11	27	45
036	TLAHUALILO (DGO)	11	27	45
037	TOPIA (DGO)	11	27	45
038	VICENTE GUERRERO (DGO)	11	27	45
039	NUEVO IDEAL (DGO)	11	27	45

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
GUANAJUATO				
001	ABASOLO (GTO)	11	27	45
002	ACAMBARO (GTO)	11	27	45
003	ALLENDE (GTO)	11	27	45
004	APASEO EL ALTO (GTO)	11	27	45
005	APASEO EL GRANDE (GTO)	11	27	45
006	ATARJEA (GTO)	11	27	45
007	CELAYA (GTO)	11	27	45
008	MANUEL DOBLADO (GTO)	11	27	45
009	COMONFORT (GTO)	11	27	45
010	CORONEO (GTO)	11	27	45
011	CORTAZAR (GTO)	11	27	45
012	CUERAMARO (GTO)	11	27	45
013	DOCTOR MORA (GTO)	11	27	45
014	DOLORES HIDALGO (GTO)	11	27	45
015	GUANAJUATO (GTO)	11	27	45
016	HUANIMARO (GTO)	11	27	45
017	IRAPUATO (GTO)	11	27	45
018	JARAL DEL PROGRESO (GTO)	11	27	45
019	JERECUARO (GTO)	11	27	45
020	LEON (GTO)	11	27	45
021	MOROLEON (GTO)	11	27	45
022	OCAMPO (GTO)	11	27	45
023	PENJAMO (GTO)	11	27	45
024	PUEBLO NUEVO (GTO)	11	27	45
025	PURISIMA DEL RINCON (GTO)	11	27	45
026	ROMITA (GTO)	11	27	45
027	SALAMANCA (GTO)	11	27	45
028	SALVATIERRA (GTO)	11	27	45
029	SAN DIEGO DE LA UNION (GTO)	11	27	45
030	SAN FELIPE (GTO)	11	27	45
031	SAN FRANCISCO DEL RINCON (GTO)	11	27	45
032	SAN JOSE ITURBIDE (GTO)	11	27	45
033	SAN LUIS DE LA PAZ (GTO)	11	27	45
034	SANTA CATARINA (GTO)	11	27	45
035	SANTA CRUZ DE JUVENTINO ROSAS (GTO)	11	27	45
036	SANTIAGO MARAVATIO (GTO)	11	27	45
037	SILAO (GTO)	11	27	45
038	TARANDACUAO (GTO)	11	27	45
039	TARIMORO (GTO)	11	27	45
040	TIERRA BLANCA (GTO)	11	27	45
041	URIANGATO (GTO)	11	27	45
042	VALLE DE SANTIAGO (GTO)	11	27	45
043	VICTORIA (GTO)	11	27	45
044	VILLAGRAN (GTO)	11	27	45
045	XICHU (GTO)	11	27	45
046	YURIRIA (GTO)	11	27	45
GUERRERO				
001	ACAPULCO DE JUAREZ (GRO)	80-103	298-352	495-585
002	AHUACUOTZINGO (GRO)	34-57	135	225-315
003	AJUCHITLAN DEL PROGRESO (GRO)	57-80	135-190-244	225-315-405-495
004	ALCOZAUCA DE GUERRERO (GRO)	57	135-190	225-315
005	ALPOYECA (GRO)	34-57	135	225
006	APAXTLA (GRO)	34-57	135	225-315
007	ARCELIA (GRO)	34-57	81-135	135-225-315
008	ATENANGO DEL RIO (GRO)	34	81	135-225
009	ATLAMAJALCINGO DEL MONTE (GRO)	57-80	190	315
010	ATLIXTAC (GRO)	57-80	135-190	225-315-405
011	ATOYAC DE ALVAREZ (GRO)	80-103	244-298	495-585
012	AYUTLA DE LOS LIBRES (GRO)	80-103	244-298	495-585
013	AZOYU (GRO)	80-103	244-298	495-585
014	BENITO JUAREZ (GRO)	103	298	585
015	BUENAVISTA DE CUELLAR (GRO)	34	81	135
016	COAHUAYUTLA DE JOSE MARIA IZAZAGA (GRO)	57-80-103	190-244-298	315-405-495-585
017	COCULA (GRO)	34-57	81-135	135-225
018	COPALA (GRO)	103	298	585

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
019	COPALILLO (GRO)	34-57	81-135	135-225
020	COPANATOYAC (GRO)	57	135-190	225-315
021	COYUCA DE BENITEZ (GRO)	80-103	244-298	495-585
022	COYUCA DE CATALAN (GRO)	34-57-80	135-190-244-298	225-315-405-495
023	CUAJINICUILAPA (GRO)	103	298	585
024	CUALAC (GRO)	34-57	135	225
025	CUAUTEPEC (GRO)	103	298	585
026	CUETZALA DEL PROGRESO (GRO)	34-57	81-135	225-315
027	CUTZAMALA DE PINZON (GRO)	34	81-135	135-225
028	CHILAPA DE ALVAREZ (GRO)	57-80	135-190	315-405
029	CHILPANCINGO DE LOS BRAVO (GRO)	57-80	190-244-298	315-405-495-585
030	FLORENCIO VILLARREAL (GRO)	103	298	585
031	GENERAL CANUTO A. NERI (GRO)	34	81	135
032	GENERAL HELIODORO CASTILLO (GRO)	57-80	135-190-244	225-315-405-495
033	HUAMUXTITLAN (GRO)	34	81-135	135-225
034	HUITZUCO DE LOS FIGUEROA (GRO)	34-57	81-135	135-225
035	IGUALA DE LA INDEPENDENCIA (GRO)	34-57	81-135	135-225
036	IGUALAPA (GRO)	80-103	244-298	495
037	IXCATEOPAN DE CUAUHTEMOC (GRO)	34	81	135
038	JOSE AZUETA (GRO)	80-103	244-298	495-585
039	JUAN R. ESCUDERO (GRO)	80-103	244-298	495-585
040	LEONARDO BRAVO (GRO)	57-80	190-244	315-405
041	MALINALTEPEC (GRO)	57-80	190-244	315-405-495
042	MARTIR DE CUILAPAN (GRO)	34-57	135-190	225-315
043	METLATONOC (GRO)	57-80	190-244	315-405-495
044	MOCHITLAN (GRO)	57-80	190-244-298	315-405-495
045	OLINALA (GRO)	34	81-135	135-225
046	OMETEPEC (GRO)	80-103	244-298	495-585
047	PEDRO ASCENCIO ALQUISIRAS (GRO)	34	81	135
048	PETATLAN (GRO)	80-103	244-298	495-585
049	PILCAYA (GRO)	34	81	135
050	PUNGARABATO (GRO)	34-57	135	225
051	QUECHULTENANGO (GRO)	57-80	190-244-298	315-405-495
052	SAN LUIS ACATLAN (GRO)	80-103	244-298	405-495-585
053	SAN MARCOS (GRO)	103	298-352	585
054	SAN MIGUEL TOTOLAPAN (GRO)	57-80	135-190-244	225-315-405-495
055	TAXCO DE ALARCON (GRO)	34	81	135
1056	TECOANAPA (GRO)	80-103	298-352	495-585
057	TECPAN DE GALEANA (GRO)	80-103	244-298	495-585
058	TEOLOAPAN (GRO)	34	81-135	135-225
059	TEPECOACUILCO DE TRUJANO (GRO)	34-57	81-135	135-225
060	TETIPAC (GRO)	34	81	135
061	TIXTLA DE GUERRERO (GRO)	57	135-190	315-405
062	TLACOACHISTLAHUACA (GRO)	57-80-103	190-244	315-405-495
063	TLACOAPA (GRO)	57-80	190-244	315-405-495
064	TLALCHAPA (GRO)	34	81-135	135-225
065	TLALIXTAQUILLA DE MALDONADO (GRO)	34-57	135	225
066	TLAPA DE COMONFORT (GRO)	34-57	135-190	225-315
067	TLAPEHUALA (GRO)	34-57	135	225-315
068	UNION, LA (GRO)	80-103	298-352	495-585
069	XALPATLAHUAC (GRO)	57	135-190	225-315
070	XOCHIHUEHUETLAN (GRO)	34	81-135	135-225
071	XOCHISTLAHUACA (GRO)	80-103	190-244-298	315-405-495
072	ZAPOTITLAN TABLAS (GRO)	57-80	190-244	225-315-405-495
073	ZIRANDARO (GRO)	34-57-80	135-190-244	225-315-405
074	ZITLALA (GRO)	34-57	135-190	225-315
075	EDUARDO NERI (GRO)	34-57	135-190	225-315
076	ACATEPEC (GRO)	57-80	190-244-298	315-405-495
HIDALGO				
001	ACATLAN (HGO)	11	27	135
002	ACAXOCHITLAN (HGO)	11	27	135
003	ACTOPAN (HGO)	11	27	135
004	AGUA BLANCA DE ITURBIDE (HGO)	11	27	135
005	AJACUBA (HGO)	11	27	135
006	ALFAJAYUCAN (HGO)	11	27	45-135
007	ALMOLOYA (HGO)	11	27-81	135
008	APAN (HGO)	11	27-81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
009	ARENAL, EL (HGO)	11	27	135
010	ATITALAQUIA (HGO)	11	27	135
011	ATLAPEXCO (HGO)	11	27	45
012	ATOTONILCO EL GRANDE (HGO)	11	27	135
013	ATOTONILCO DE TULA (HGO)	11	27	135
014	CALNALI (HGO)	11	27	45
015	CARDONAL (HGO)	11	27	45-135
016	CUAUTEPEC DE HINOJOSA (HGO)	11	27	135
017	CHAPANTONGO (HGO)	11	27	45-135
018	CHAPULHUACAN (HGO)	11	27	45
019	CHILCUAUTLA (HGO)	11	27	135
020	ELOXOCHITLAN (HGO)	11	27	45
021	EMILIANO ZAPATA (HGO)	11	81	135
022	EPAZOYUCAN (HGO)	11	27	135
023	FRANCISCO I. MADERO (HGO)	11	27	135
024	HUASCA DE OCAMPO (HGO)	11	27	135
025	HUAUTLA (HGO)	11	27	45
026	HUAZALINGO (HGO)	11	27	45
027	HUEHUETLA (HGO)	11	27	135
028	HUEJTLA DE REYES (HGO)	11	27	45
029	HUICHAPAN (HGO)	11	27	45-135
030	IXMIQUILPAN (HGO)	11	27	45-135
031	JACALA DE LEDEZMA (HGO)	11	27	45
032	JALTOCAN (HGO)	11	27	45
033	JUAREZ HIDALGO (HGO)	11	27	45
034	LOLOTLA (HGO)	11	27	45
035	METEPEC (HGO)	11	27	135
036	SAN AGUSTIN METZQUITILAN (HGO)	11	27	135
037	METZTITLAN (HGO)	11	27	45-135
038	MINERAL DEL CHICO (HGO)	11	27	135
039	MINERAL DEL MONTE (HGO)	11	27	135
040	MISION, LA (HGO)	11	27	45
041	MIXQUIAHUALA DE JUAREZ (HGO)	11	27	135
042	MOLANGO DE ESCAMILLA (HGO)	11	27	45
043	NICOLAS FLORES (HGO)	11	27	45
044	NOPALA DE VILLAGRAN (HGO)	11	27	45-135
045	OMITLAN DE JUAREZ (HGO)	11	27	135
046	SAN FELIPE ORIZATLAN (HGO)	11	27	45
047	PACULA (HGO)	11	27	45
048	PACHUCA DE SOTO (HGO)	11	27	135
049	PISAFLORES (HGO)	11	27	45
050	PROGRESO DE OBREGON (HGO)	11	27	135
051	MINERAL DE LA REFORMA (HGO)	11	27	135
052	SAN AGUSTIN TLAXIACA (HGO)	11	27	135
053	SAN BARTOLO TUTOTEPEC (HGO)	11	27	135
054	SAN SALVADOR (HGO)	11	27	135
055	SANTIAGO DE ANAYA (HGO)	11	27	135
056	SANTIAGO TULANTEPEC DE LUGO G. (HGO)	11	27	135
057	SINGUILUCAN (HGO)	11	27	135
058	TASQUILLO (HGO)	11	27	45-135
059	TECOZAUTLA (HGO)	11	27	45
060	TENANGO DE DORIA (HGO)	11	27	135
061	TEPEAPULCO (HGO)	11	27-81	135
062	TEPEHUACAN DE GUERRERO (HGO)	11	27	45
063	TEPEJI DEL RIO DE OCAMPO (HGO)	11	27	135
064	TEPETITLAN (HGO)	11	27	135
065	TETEPANGO (HGO)	11	27	135
066	VILLA DE TEZONTEPEC (HGO)	11	27	135
067	TEZONTEPEC DE ALDAMA (HGO)	11	27	135
068	TIANGUISTENGO (HGO)	11	27	45-135
069	TIZAYUCA (HGO)	11	27	135
070	TLAHUELILPAN (HGO)	11	27	135
071	TLAHUILTEPA (HGO)	11	27	45
072	TLANALAPA (HGO)	11	27-81	135
073	TLANCHINOL (HGO)	11	27	45
074	TLAXCOAPAN (HGO)	11	27	135
075	TOLCAYUCA (HGO)	11	27	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
076	TULA DE ALLENDE (HGO)	11	27	135
077	TULANCINGO DE BRAVO (HGO)	11	27	135
078	XOCHIATIPAN (HGO)	11	27	45
079	XOCHICOATLAN (HGO)	11	27	45
080	YAHUALICA (HGO)	11	27	45
081	ZACUALTIPAN DE ANGELES (HGO)	11	27	45-135
082	ZAPOTLAN DE JUAREZ (HGO)	11	27	135
083	ZEMPOALA (HGO)	11	27	135
084	ZIMAPAN (HGO)	11	27	45
JALISCO				
001	ACATIC (JAL)	11	27	45
002	ACATLAN DE JUAREZ (JAL)	34	81	135
003	AHUALULCO DE MERCADO (JAL)	34-11	81	135
004	AMACUECA (JAL)	34	81-135	135-225
005	AMATITAN (JAL)	11	27-81	45-135
006	AMECA (JAL)	34	81	135
007	ANTONIO ESCOBEDO (JAL)	34-11	81	135
008	ARANDAS (JAL)	11	27	45
009	ARENAL (JAL)	11	27-81	45-135
010	ATEMAJAC DE BRIZUELA (JAL)	34	81-135	135-225
011	ATENGO (JAL)	34	81-135	225
012	ATENGUILLO (JAL)	34-57	81-135-190	225-315-405
013	ATOTONILCO EL ALTO (JAL)	11	27	45
014	ATOYAC (JAL)	34	81-135	135-225
015	AUTLAN DE NAVARRO (JAL)	57-80	190-244	405-495
016	AYOTLAN (JAL)	11	27	45
017	AYUTLA (JAL)	34-57-80	135-190-244	225-315-405-495
018	BARCA, LA (JAL)	11	27-81	45
019	BOLAÑOS (JAL)	11	27	45
020	CABO CORRIENTES (JAL)	57-80	244-298	405-495
021	CASIMIRO CASTILLO (JAL)	80-103	244-298	495-585
022	CIHUATLAN (JAL)	103	298	585
023	CIUDAD GUZMAN (JAL)	34-57	135-190	225-315
024	COCULA (JAL)	34	81	135
025	COLOTLAN (JAL)	11	27	45
026	CONCEPCION DE BUENOS AIRES (JAL)	34	81	135-225
027	CUAUTITLAN (JAL)	80-103	244-298	405-495-585
028	CUAUTLA (JAL)	34-57	135-190	225-315-405
029	CUQUIO (JAL)	11	27	45
030	CHAPALA (JAL)	34-11	81	135
031	CHIMALTITAN (JAL)	11	27	45
032	CHIQUILISTLAN (JAL)	34	81-135	225
033	DEGOLLADO (JAL)	11	27	45
034	EJUTLA (JAL)	34-57	135-190	225-315-405
035	ENCARNACION DE DIAZ (JAL)	11	27	45
036	ETZATLAN (JAL)	34-11	81	135
037	GRULLO, EL (JAL)	57	190	405
038	GUACHINANGO (JAL)	34	81	135-225
039	GUADALAJARA (JAL)	11	27-81	45-135
040	HOSTOTIPAQUILLO (JAL)	11	27-81	45-135
041	HUEJUCAR (JAL)	11	27	45
042	HUEJUQUILLA EL ALTO (JAL)	11	27	45
043	HUERTA, LA (JAL)	80-103	298	495-585
044	IXTLAHUACAN DE LOS MEMBRILLOS (JAL)	34-11	81	135
045	IXTLAHUACAN DEL RIO (JAL)	11	27	45
046	JALOSTOTITLAN (JAL)	11	27	45
047	JAMAY (JAL)	11	27-81	45-135
048	JESUS MARIA (JAL)	11	27	45
049	JILOTLAN DE LOS DOLORES (JAL)	34-57	81-135-190	225-315-405
050	JOCOTEPEC (JAL)	34	81	135
051	JUANACATLAN (JAL)	11	27-81	45-135
052	JUCHITLAN (JAL)	34-57	135	225-315
053	LAGOS DE MORENO (JAL)	11	27	45
054	LIMON, EL (JAL)	57	190	315-405
055	MAGDALENA (JAL)	34-11	27-81	45-135
056	MANUEL M. DIEGUEZ (JAL)	34-57	81-135	225
057	MANZANILLA DE LA PAZ, LA (JAL)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
058	MASCOTA (JAL)	34-57	81-135-190	135-225-315
059	MAZAMITLA (JAL)	34	81	135-225
060	MEXTICACAN (JAL)	11	27	45
061	MEZQUITIC (JAL)	11	27	45
062	MIXTLAN (JAL)	34	81-135	135-225
063	OCOTLAN (JAL)	11	27-81	45-135
064	OJUELOS DE JALISCO (JAL)	11	27	45
065	PIHUAMO (JAL)	57-80	190-244-298	315-405-495
066	PONCITLAN (JAL)	34-11	81	45-135
067	PUERTO VALLARTA (JAL)	34-57	135-190-244	225-315-405
068	VILLA PURIFICACION (JAL)	57-80-103	190-244-298	405-495-585
069	QUITUPAN (JAL)	34	81-135	135-225
070	SALTO, EL (JAL)	11	81	45-135
071	SAN CRISTOBAL DE LA BARRANCA (JAL)	11	27	45
072	SAN DIEGO DE ALEJANDRIA (JAL)	11	27	45
073	SAN JUAN DE LOS LAGOS (JAL)	11	27	45
074	SAN JULIAN (JAL)	11	27	45
075	SAN MARCOS (JAL)	34-11	81	135
076	SAN MARTIN DE BOLAÑOS (JAL)	11	27	45
077	SAN MARTIN HIDALGO (JAL)	34	81	135-225
078	SAN MIGUEL EL ALTO (JAL)	11	27	45
079	GOMEZ FARIAS (JAL)	34	81-135	135-225
080	SAN SEBASTIAN DEL OESTE (JAL)	34	81-135	135-225
081	SANTA MARIA DE LOS ANGELES (JAL)	11	27	45
082	SAYULA (JAL)	34	135	225
083	TALA (JAL)	34-11	81	135
084	TALPA DE ALLENDE (JAL)	57-80	135-190-244	315-405-495
085	TAMAZULA DE GORDIANO (JAL)	34-57	81-135-190	135-225-315
086	TAPALPA (JAL)	34-57	81-135	135-225-315
087	TECALITLAN (JAL)	57-80	190-244	315-405-495
088	TECOLOTLAN (JAL)	34	81-135	135-225
089	TECHALUTA DE MONTENEGRO (JAL)	34	81	135-225
090	TENAMAXTLAN (JAL)	34-57	135	225-315
091	TEOCALTICHE (JAL)	11	27	45
092	TEOCUITATLAN DE CORONA (JAL)	34	81	135
093	TEPATITLAN DE MORELOS (JAL)	11	27	45
094	TEQUILA (JAL)	11	27-81	45-135
095	TEUCHITLAN (JAL)	34-11	81	135
096	TIZAPAN EL ALTO (JAL)	34	81	135
097	TLAJOMULCO DE ZUÑIGA (JAL)	34-11	81	135
098	TLAQUEPAQUE (JAL)	11	27-81	45-135
099	TOLIMAN (JAL)	57-80	190-244	315-405-495
100	TOMATLAN (JAL)	80-103	190-244-298	405-495-585
101	TONALA (JAL)	11	27-81	45-135
102	TONAYA (JAL)	34-57	135-190	225-315-405
103	TONILA (JAL)	57	190	315-405
104	TOTATACHE (JAL)	11	27	45
105	TOTOTLAN (JAL)	11	27	45
106	TUXCACUESCO (JAL)	57-80	190-244	315-405
107	TUXCUECA (JAL)	34	81	135
108	TUXPAN (JAL)	57-80	135-190-244	315-405
109	UNION DE SAN ANTONIO (JAL)	11	27	45
110	UNION DE TULA (JAL)	34-57	135-190	225-315-405
111	VALLE DE GUADALUPE (JAL)	11	27	45
112	VALLE DE JUAREZ (JAL)	34	81-135	135-225
113	CIUDAD VENUSTIANO CARRANZA (JAL)	34-57	135-190	225-315-405
114	VILLA CORONA (JAL)	34	81	135
115	VILLA GUERRERO (JAL)	11	27	45
116	VILLA HIDALGO (JAL)	11	27	45
117	CAÑADAS DE OBREGON (JAL)	11	27	45
118	YAHUALICA DE GONZALEZ GALLO (JAL)	11	27	45
119	ZACOALCO DE TORRES (JAL)	34	81	135
120	ZAPOPAN (JAL)	11	27-81	45-135
121	ZAPOTILTIC (JAL)	34-57	135-190	225-315
122	ZAPOTITLAN DE VADILLO (JAL)	57-80	190-244	315-405
123	ZAPOTLAN DEL REY (JAL)	11	27-81	45-135
124	ZAPOTLANEJO (JAL)	11	27-81	45

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
ESTADO DE MEXICO				
001	ACAMBAY (MEX)	11	27	45-135
002	ACOLMAN (MEX)	11	81	135
003	ACULCO (MEX)	11	27	45-135
004	ALMOLOYA DE ALQUISIRAS (MEX)	34	81	135
005	ALMOLOYA DE JUAREZ (MEX)	34-11	81	135
006	ALMOLOYA DEL RIO (MEX)	34	81	135
007	AMANALCO (MEX)	34-11	81	135
008	AMATEPEC (MEX)	34	81	135
009	AMECAMECA (MEX)	34	81	135
010	APAXCO (MEX)	11	27	135
011	ATENCO (MEX)	11	81	135
012	ATIZAPAN (MEX)	34	81	135
013	ATIZAPAN DE ZARAGOZA (MEX)	11	81	135
014	ATLACOMULCO (MEX)	11	27	45-135
015	ATLAUTLA (MEX)	34	81	135
016	AXAPUSCO (MEX)	11	27-81	135
017	AYAPANGO (MEX)	34	81	135
018	CALIMAYA (MEX)	34	81	135
019	CAPULHUAC (MEX)	34-11	81	135
020	COACALCO (MEX)	11	81	135
021	COATEPEC HARINAS (MEX)	34	81	135
022	COCOTITLAN (MEX)	34-11	81	135
023	COYOTEPEC (MEX)	11	27	135
024	CUAUTITLAN (MEX)	11	27-81	135
025	CHALCO (MEX)	34-11	81	135
026	CHAPA DE MOTA (MEX)	11	27	135
027	CHAPULTEPEC (MEX)	34	81	135
028	CHIAUTLA (MEX)	11	81	135
029	CHICOLOAPAN (MEX)	11	81	135
030	CHICONCUAC (MEX)	11	81	135
031	CHIMALHUACAN (MEX)	11	81	135
032	DONATO GUERRA (MEX)	34-11	81	135
033	ECATEPEC (MEX)	11	81	135
034	ECATZINGO (MEX)	34	81	135
035	HUEHUETOCA (MEX)	11	27	135
036	HUEYPOXTLA (MEX)	11	27	135
037	HUIXQUILUCAN (MEX)	11	81	135
038	ISIDRO FABELA (MEX)	11	81	135
039	IXTAPALUCA (MEX)	11	81	135
040	IXTAPAN DE LA SAL (MEX)	34	81	135
041	IXTAPAN DEL ORO (MEX)	34	81	135
042	IXTLAHUACA (MEX)	11	27-81	135
043	JALATLACO (MEX)	34-11	81	135
044	JALTENCO (MEX)	11	27-81	135
045	JILOTEPEC (MEX)	11	27	45-135
046	JILOTZINGO (MEX)	11	81	135
047	JIQUIPILCO (MEX)	11	27-81	135
048	JOCOTITLAN (MEX)	11	27	45-135
049	JOQUICINGO (MEX)	34	81	135
050	JUCHITEPEC (MEX)	34	81	135
051	LERMA (MEX)	11	81	135
052	MALINALCO (MEX)	34	81	135
053	MELCHOR OCAMPO (MEX)	11	27-81	135
054	METEPEC (MEX)	34-11	81	135
055	MEXICALCINGO (MEX)	34	81	135
056	MORELOS (MEX)	11	27	135
057	NAUCALPAN (MEX)	11	81	135
058	NEZAHUALCOYOTL (MEX)	11	81	135
059	NEXTLALPAN (MEX)	11	27-81	135
060	NICOLAS ROMERO (MEX)	11	27-81	135
061	NOPALTEPEC (MEX)	11	27-81	135
062	OCOYOACAC (MEX)	11	81	135
063	OCUILAN (MEX)	34	81	135
064	ORO, EL (MEX)	11	27	45-135
065	OTUMBA (MEX)	11	81	135
066	OTZOLOAPAN (MEX)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
067	OTZOLOTEPEC (MEX)	11	81	135
068	OZUMBA (MEX)	34	81	135
069	PAPALOTLA (MEX)	11	81	135
070	PAZ, LA (MEX)	11	81	135
071	POLOTITLAN (MEX)	11	27	45-135
072	RAYON (MEX)	34	81	135
073	SAN ANTONIO LA ISLA (MEX)	34	81	135
074	SAN FELIPE DEL PROGRESO (MEX)	11	27-81	45-135
075	SAN MARTIN DE LAS PIRAMIDES (MEX)	11	81	135
076	SAN MATEO ATENCO (MEX)	11	81	135
077	SAN SIMON DE GUERRERO (MEX)	34	81	135
078	SANTO TOMAS (MEX)	34	81	135
079	SOYANIQUELIPAN DE JUAREZ (MEX)	11	27	135
080	SULTEPEC (MEX)	34	81	135
081	TECAMAC (MEX)	11	27-81	135
082	TEJUPILCO (MEX)	34	81	135
083	TEMAMATLA (MEX)	34-11	81	135
084	TEMASCALAPA (MEX)	11	27-81	135
085	TEMASCALCINGO (MEX)	11	27	45-135
086	TEMASCALTEPEC (MEX)	34	81	135
087	TEMOAYA (MEX)	11	81	135
088	TENANCINGO (MEX)	34	81	135
089	TENANGO DEL AIRE (MEX)	34	81	135
090	TENANGO DEL VALLE (MEX)	34	81	135
091	TELOYUCAN (MEX)	11	27-81	135
092	TEOTIHUACAN (MEX)	11	81	135
093	TEPETLAOXTOC (MEX)	11	81	135
094	TEPETLIXPA (MEX)	34	81	135
095	TEPOTZOTLAN (MEX)	11	27-81	135
096	TEQUIXQUIAC (MEX)	11	27	135
097	TEXCALTITLAN (MEX)	34	81	135
098	TEXCALYACAC (MEX)	34	81	135
099	TEXCOCO (MEX)	11	81	135
100	TEZOYUCA (MEX)	11	81	135
101	TIANGUISTENCO (MEX)	34	81	135
102	TIMILPAN (MEX)	11	27	135
103	TLALMANALCO (MEX)	34-11	81	135
104	TLALNEPANTLA (MEX)	11	81	135
105	TLATLAYA (MEX)	34	81	135
106	TOLUCA (MEX)	34-11	81	135
107	TONATICO (MEX)	34	81	135
108	TULTEPEC (MEX)	11	81	135
109	TULTITLAN (MEX)	11	81	135
110	VALLE DE BRAVO (MEX)	34	81	135
111	VILLA DE ALLENDE (MEX)	34-11	81	135
112	VILLA DEL CARBON (MEX)	11	27-81	135
113	VILLA GUERRERO (MEX)	34	81	135
114	VILLA VICTORIA (MEX)	34-11	81	135
115	XONACATLAN (MEX)	11	81	135
116	ZACAZONAPAN (MEX)	34	81	135
117	ZACUALPAN (MEX)	34	81	135
118	ZINACANTEPEC (MEX)	34-11	81	135
119	ZUMPAHUACAN (MEX)	34	81	135
120	ZUMPANGO (MEX)	11	27-81	135
121	CUAUTITLAN IZCALLI (MEX)	11	27-81	135
122	VALLE DE CHALCO (MEX)	11	81	135
MICHOACAN				
001	ACUITZIO (MIC)	34	81	135
002	AGUILILLA (MIC)	57-80	190-244-298	315-405-495-585
003	ALVARO OBREGON (MIC)	11	27	45-135
004	ANGAMACUTIRO (MIC)	11	27	45-135
005	ANGANGUEO (MIC)	11	27-81	135
006	APATZINGAN (MIC)	34-57	135-190-244	225-315-405
007	APORO (MIC)	11	27	135
008	AQUILA (MIC)	103	298	585
009	ARIO (MIC)	34	81-135	135-225

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
010	ARTEAGA (MIC)	57-80-103	190-244-298	315-405-495-585
011	BRISEÑAS (MIC)	11	27-81	45-135
012	BUENAVISTA (MIC)	34-57	135-190	225-315
013	CARACUARO (MIC)	34	81-135	135-225
014	COAHUAYANA (MIC)	103	298	585
015	COALCOMAN DE VAZQUEZ PALLARES (MIC)	57-80-103	244-298	405-495-585
016	COENEO (MIC)	34-11	81	135
017	CONTEPEC (MIC)	11	27	45
018	COPANDARO (MIC)	11	27	45-135
019	COTIJA (MIC)	34	81	135-225
020	CUITZEO (MIC)	11	27	45-135
021	CHARAPAN (MIC)	34	81	135
022	CHARO (MIC)	11	27-81	135
023	CHAVINDA (MIC)	34-11	81	135
024	CHERAN (MIC)	34	81	135
025	CHILCHOTA (MIC)	34-11	81	135
026	CHINICUILA (MIC)	80-103	298	495-585
027	CHUCANDIRO (MIC)	11	27-81	45-135
028	CHURINTZIO (MIC)	11	27-81	45-135
029	CHURUMUCO (MIC)	34-57	81-135-190	225-315
030	ECUANDUREO (MIC)	11	27-81	45-135
031	EPITACIO HUERTA (MIC)	11	27	45
032	ERONGARICUARO (MIC)	34	81	135
033	GABRIEL ZAMORA (MIC)	34	81-135	135-225
034	HIDALGO (MIC)	34-11	27-81	45-135
035	HUACANA, LA (MIC)	34-57	135-190	225-315-405
036	HUANDACAREO (MIC)	11	27	45-135
037	HUANIQUEO (MIC)	11	27-81	135
038	HUETAMO (MIC)	34-57	81-135	135-225-315
039	HUIRAMBA (MIC)	34	81	135
040	INDAPARAPEO (MIC)	11	27-81	45-135
041	IRIMBO (MIC)	11	27-81	45-135
042	IXTLAN (MIC)	11	27-81	45-135
043	JACONA (MIC)	34	81	135
044	JIMENEZ (MIC)	11	27-81	135
045	JIQUILPAN (MIC)	34	81	135
046	JUAREZ (MIC)	34	81	135
047	JUNGAPEO (MIC)	34-11	81	135
048	LAGUNILLAS (MIC)	34	81	135
049	MADERO (MIC)	34-11	81	135
050	MARAVATIO (MIC)	11	27	45
051	MARCOS CASTELLANOS (MIC)	34	81	135
052	LAZARO CARDENAS (MIC)	80-103	298	495-585
053	MORELIA (MIC)	34-11	27-81	135
054	MORELOS (MIC)	11	27	45-135
055	MUGICA (MIC)	34-57	135-190	225-315
056	NAHUATZEN (MIC)	34	81	135
057	NOCUPETARO (MIC)	34	81	135-225
058	NUEVO PARANGARICUTIRO (MIC)	34	81	135-225
059	NUEVO URECHO (MIC)	34	81-135	135-225
060	NUMARAN (MIC)	11	27	45
061	OCAMPO (MIC)	11	27-81	135
062	PAJACUARAN (MIC)	34-11	81	45-135
063	PANINDICUARO (MIC)	11	27-81	45-135
064	PARACUARO (MIC)	34-57	81-135-190	225-315
065	PARACHO (MIC)	34	81	135
066	PATZCUARO (MIC)	34	81	135
067	PENJAMILLO (MIC)	11	27-81	45-135
068	PERIBAN (MIC)	34	81-135	135-225
069	PIEDAD, LA (MIC)	11	27	45
070	PUREPERO (MIC)	34-11	81	135
071	PURUANDIRO (MIC)	11	27	45-135
072	QUERENDARO (MIC)	11	27-81	45-135
073	QUIROGA (MIC)	34-11	81	135
074	COJUMATLAN DE REGULES (MIC)	34	81	135
075	REYES, LOS (MIC)	34	81	135-225
076	SAHUAYO (MIC)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
077	SAN LUCAS (MIC)	34	81-135	135-225
078	SANTA ANA MAYA (MIC)	11	27	45
079	SALVADOR ESCALANTE (MIC)	34	81	135
080	SENGUIO (MIC)	11	27	45-135
081	SUSUPUATO (MIC)	34	81	135
082	TACAMBARO (MIC)	34	81	135
083	TANCITARO (MIC)	34	81-135	135-225
084	TANGAMANDAPIO (MIC)	34	81	135
085	TANGANCICUARO (MIC)	34-11	81	135
086	TANHUATO (MIC)	11	27	45
087	TARETAN (MIC)	34	81	135
088	TARIMBARO (MIC)	11	27-81	135
089	TEPALCATEPEC (MIC)	57-80	135-190-244	315-405
090	TINGAMBATO (MIC)	34	81	135
091	TINGUINDIN (MIC)	34	81	135
092	TIQUICHEO DE NICOLAS ROMERO (MIC)	34	81	135
093	TLALPUJAHUA (MIC)	11	27	45-135
094	TLAZAZALCA (MIC)	11	27-81	135
095	TOCUMBO (MIC)	34	81-135	135-225
096	TUMBISCATIO (MIC)	57-80-103	190-244-298	315-405-495-585
097	TURICATO (MIC)	34	81-135	135-225
098	TUXPAN (MIC)	11	27-81	135
099	TUZANTLA (MIC)	34-11	81	135
100	TZINTZUNTZAN (MIC)	34	81	135
101	TZITZIO (MIC)	34-11	81	135
102	URUAPAN (MIC)	34	81	135-225
103	VENUSTIANO CARRANZA (MIC)	34-11	81	45-135
104	VILLAMAR (MIC)	34	81	135
105	VISTA HERMOSA (MIC)	11	27-81	45
106	YURECUARO (MIC)	11	27	45
107	ZACAPU (MIC)	34-11	81	135
108	ZAMORA (MIC)	34-11	81	135
109	ZINAPARO (MIC)	11	27	45
110	ZINAPECUARO (MIC)	11	27	45-135
111	ZIRACUARETIRO (MIC)	34	81	135
112	ZITACUARO (MIC)	34-11	81	135
113	JOSE SIXTO VERDUZCO (MIC)	11	27	45
MORELOS				
001	AMACUZAC (MOR)	34	81	135
002	ATLATLAHUCAN (MOR)	34	81	135
003	AXOCHIAPAN (MOR)	34	81	135
004	AYALA (MOR)	34	81	135
005	COATLAN DEL RIO (MOR)	34	81	135
006	CUAUTLA (MOR)	34	81	135
007	CUERNAVACA (MOR)	34	81	135
008	EMILIANO ZAPATA (MOR)	34	81	135
009	HUITZILAC (MOR)	34	81	135
010	JANTETELCO (MOR)	34	81	135
011	JIUTEPEC (MOR)	34	81	135
012	JOJUTLA (MOR)	34	81	135
013	JONACATEPEC (MOR)	34	81	135
014	MAZATEPEC (MOR)	34	81	135
015	MIACATLAN (MOR)	34	81	135
016	OCUITUCO (MOR)	34	81	135
017	PUENTE DE IXTLA (MOR)	34	81	135
018	TEMIXCO (MOR)	34	81	135
019	TEPALCINGO (MOR)	34	81	135
020	TEPOZTLAN (MOR)	34	81	135
021	TETECALA (MOR)	34	81	135
022	TETELA DEL VOLCAN (MOR)	34	81	135
023	TLALNEPANTLA (MOR)	34	81	135
024	TLALTIZAPAN (MOR)	34	81	135
025	TLAQUILTENANGO (MOR)	34	81	135
026	TLAYACAPAN (MOR)	34	81	135
027	TOTOLAPAN (MOR)	34	81	135
028	XOCHITEPEC (MOR)	34	81	135
029	YAUTEPEC (MOR)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
030	YECAPIXTLA (MOR)	34	81	135
031	ZACATEPEC (MOR)	34	81	135
032	ZACUALPAN (MOR)	34	81	135
033	ZTEMOAC (MOR)	34	81	135
NAYARIT				
001	ACAPONETA (NAY)	11	27	45
002	AHUACATLAN (NAY)	34-11	81	135
003	AMATLAN DE CAÑAS (NAY)	34	81	135
004	COMPOSTELA (NAY)	34-11	81-135	135-225
005	HUAJICORI (NAY)	11	27	45
006	IXTLAN DEL RIO (NAY)	34-11	27-81	45-135
007	JALA (NAY)	11	27-81	45-135
008	XALISCO (NAY)	34-11	27-81	135
009	NAYAR, EL (NAY)	11	27	45
010	ROSAMORADA (NAY)	11	27	45
011	RUIZ (NAY)	11	27	45
012	SAN BLAS (NAY)	11	27-81	45-135
013	SAN PEDRO LAGUNILLAS (NAY)	34-11	81	135
014	SANTA MARIA DEL ORO (NAY)	34-11	27-81	45-135
015	SANTIAGO IXCUINTLA (NAY)	11	27-81	45-135
016	TECUALA (NAY)	11	27	45
017	TEPIC (NAY)	11	27-81	45-135
018	TUXPAN (NAY)	11	27	45-135
019	YESCA, LA (NAY)	11	27	45
020	BAHIA DE BANDERAS (NAY)	34	81-135	135-225
NUEVO LEON				
001	ABASOLO (NLN)	11	27	45
002	AGUALEGUAS (NLN)	11	27	45
003	ALDAMAS, LOS (NLN)	11	27	45
004	ALLENDE (NLN)	11	27	45
005	ANAHUAC (NLN)	11	27	45
006	APODACA (NLN)	11	27	45
007	ARAMBERRI (NLN)	11	27	45
008	BUSTAMANTE (NLN)	11	27	45
009	CADEREYTA JIMENEZ (NLN)	11	27	45
010	CARMEN (NLN)	11	27	45
011	CERRALVO (NLN)	11	27	45
012	CIENEGA DE FLORES (NLN)	11	27	45
013	CHINA (NLN)	11	27	45
014	DOCTOR ARROYO (NLN)	11	27	45
015	DOCTOR COSS (NLN)	11	27	45
016	DOCTOR GONZALEZ (NLN)	11	27	45
017	GALEANA (NLN)	11	27	45
018	GARCIA (NLN)	11	27	45
019	SAN PEDRO GARZA GARCIA (NLN)	11	27	45
020	GENERAL BRAVO (NLN)	11	27	45
021	GENERAL ESCOBEDO (NLN)	11	27	45
022	GENERAL TERAN (NLN)	11	27	45
023	GENERAL TREVIÑO (NLN)	11	27	45
024	GENERAL ZARAGOZA (NLN)	11	27	45
025	GENERAL ZUAZUA (NLN)	11	27	45
026	GUADALUPE (NLN)	11	27	45
027	HERRERAS, LOS (NLN)	11	27	45
028	HIGUERAS (NLN)	11	27	45
029	HUALAHUISES (NLN)	11	27	45
030	ITURBIDE (NLN)	11	27	45
031	JUAREZ (NLN)	11	27	45
032	LAMPAZOS DE NARANJO (NLN)	11	27	45
033	LINARES (NLN)	11	27	45
034	MARIN (NLN)	11	27	45
035	MELCHOR OCAMPO (NLN)	11	27	45
036	MIER Y NORIEGA (NLN)	11	27	45
037	MINA (NLN)	11	27	45
038	MONTEMORELOS (NLN)	11	27	45
039	MONTERREY (NLN)	11	27	45

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
040	PARAS (NLN)	11	27	45
041	PESQUERIA (NLN)	11	27	45
042	RAMONES, LOS (NLN)	11	27	45
043	RAYONES (NLN)	11	27	45
044	SABINAS HIDALGO (NLN)	11	27	45
045	SALINAS VICTORIA (NLN)	11	27	45
046	SAN NICOLAS DE LOS GARZA (NLN)	11	27	45
047	HIDALGO (NLN)	11	27	45
048	SANTA CATARINA (NLN)	11	27	45
049	SANTIAGO (NLN)	11	27	45
050	VALLECILLO (NLN)	11	27	45
051	VILLALDAMA (NLN)	11	27	45
OAXACA				
001	ABEJONES (OAX)	34	81	135
002	ACATLAN DE PEREZ FIGUEROA (OAX)	34	81	135
003	ASUNCION CACALOTEPEC (OAX)	34	81-135	225
004	ASUNCION CUYOTEPEJI (OAX)	34	81	135
005	ASUNCION IXTALTEPEC (OAX)	57-80	135-190-244	225-315
006	ASUNCION NOCHIXTLAN (OAX)	34	81-135	135-225
007	ASUNCION OCOTLAN (OAX)	57	190	315
008	ASUNCION TLACOLULITA (OAX)	80-103-126	244-298	405-495
009	AYOTZINTEPEC (OAX)	34	81	135
010	BARRIO DE LA SOLEDAD, EL (OAX)	57	135-190	225
011	CALIHUALA (OAX)	34-57	135	225
012	CANDELARIA LOXICHA (OAX)	126	298-352	495-585
013	CIENEGA DE ZIMATLAN (LA CIENEGA) (OAX)	57	135	225
014	CIUDAD IXTEPEC (OAX)	57-80	190	225-315
015	COATECAS ALTAS (OAX)	80	190	315-405
016	COICOYAN DE LAS FLORES (OAX)	57-80	190	315
017	COMPAÑIA, LA (OAX)	80	190-244	315-405
018	CONCEPCION BUENAVISTA (OAX)	34	81	135
019	CONCEPCION PAPALO (OAX)	34	81	135
020	CONSTANCIA DEL ROSARIO (OAX)	57-80	190-244	315
021	COSOLAPA (OAX)	34	81	135
022	COSOLTEPEC (OAX)	34	81	135
023	CUILAPAM DE GUERRERO (OAX)	57	135	225
024	CUYAMECALCO VILLA DE ZARAGOZA (OAX)	34	81	135
025	CHAHUITES (OAX)	57-80	190	315
026	CHALCATONGO DE HIDALGO (OAX)	57-80	190	315
027	SAN JUAN CHIQUIHUITLAN (OAX)	34	81	135
028	EJUTLA DE CRESPO (OAX)	57-80	190-244	315-405
029	ELOXOCHITLAN DE FLORES MAGON (OAX)	34	81	135
030	ESPINAL, EL (OAX)	80	190-244	315-405
031	TAMAZULAPAM DEL ESPIRITU SANTO (OAX)	34-57	81-135	225
032	FRESNILLO DE TRUJANO (OAX)	34	81	135-225
033	GUADALUPE ETLA (OAX)	34	135	225
034	GUADALUPE RAMIREZ (OAX)	34	81-135	225
035	GUELATAO DE JUAREZ (OAX)	34	81	225
036	GUEVEA DE HUMBOLDT (OAX)	34-57	135-190	225
037	MESONES HIDALGO (OAX)	80	244	405
038	VILLA HIDALGO (OAX)	34	81	135-225
039	HUAJUAPAM DE LEON (OAX)	34	81	135-225
040	HUAUTEPEC (OAX)	34	81	135
041	HUAUTLA DE JIMENEZ (OAX)	34	81	135
042	IXTLAN DE JUAREZ (OAX)	34	81	135-225
043	JUCHITAN DE ZARAGOZA (OAX)	57-80-103	135-190-244	225-315-405-495
044	LOMA BONITA (OAX)	34	81	135
045	MAGDALENA APASCO (OAX)	34	135	225
046	MAGDALENA JALTEPEC (OAX)	34-57	135	225
047	SANTA MAGDALENA JICOTLAN (OAX)	34	81	135
048	MAGDALENA MIXTEPEC (OAX)	57	135	225-315
049	MAGDALENA OCOTLAN (OAX)	57-80	190	315
050	MAGDALENA PEÑASCO (OAX)	57	135	225-315
051	MAGDALENA TEITIPAC (OAX)	57	135	225
052	MAGDALENA TEQUISISTLAN (OAX)	80-103-126	190-244-298	315-405-495
053	MAGDALENA TLACOTEPEC (OAX)	80	190	315
054	MAGDALENA ZAHUATLAN (OAX)	34	81-135	225

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
055	MARISCALA DE JUAREZ (OAX)	34	81-135	135-225
056	MARTIRES DE TACUBAYA (OAX)	103-126	298	495-585
057	MATIAS ROMERO (OAX)	34	81-135	135-225
058	MAZATLAN VILLA DE FLORES (OAX)	34	81	135
059	MIAHUATLAN DE PORFIRIO DIAZ (OAX)	80-103	190-244-298	315-405-495
060	MIXISTLAN DE LA REFORMA (OAX)	34	81	135-225
061	MONJAS (OAX)	80	244	405
062	NATIVIDAD (OAX)	34	81	225
063	NAZARENO ETLA (OAX)	34	135	225
064	NEJAPA DE MADERO (OAX)	57-80	135-190	225-315
065	XPANTEPEC NIEVES (OAX)	34	135	225
066	SANTIAGO NILTEPEC (OAX)	57-80	135-190	225-315
067	OAXACA DE JUAREZ (OAX)	34-57	135	225
068	OCOTLAN DE MORELOS (OAX)	57	135-190	225-315
069	PE, LA (OAX)	80	190	315
070	PINOTEPA DE DON LUIS (OAX)	126	298	585
071	PLUMA HIDALGO (OAX)	126	298-352	585
072	SAN JOSE DEL PROGRESO (OAX)	57-80	190	315
073	PUTLA VILLA DE GUERRERO (OAX)	80-103	244	405
074	SANTA CATARINA QUIOQUITANI (OAX)	80-103	244	405-495
075	REFORMA DE PINEDA (OAX)	57-80	190	315
076	REFORMA, LA (OAX)	103	244-298	405-495
077	REYES ETLA (OAX)	34	135	225
078	ROJAS DE CUAUHTEMOC (OAX)	57	135	225
079	SALINA CRUZ (OAX)	103-126	244-298	405-495
080	SAN AGUSTIN AMATENGO (OAX)	80	190-244	405
081	SAN AGUSTIN ATENANGO (OAX)	34	135	225
082	SAN AGUSTIN CHAYUCO (OAX)	126	298	495-585
083	SAN AGUSTIN DE LAS JUNTAS (OAX)	57	135	225
084	SAN AGUSTIN ETLA (OAX)	34	135	225
085	SAN AGUSTIN LOXICHA (OAX)	126	298-352	495-585
086	SAN AGUSTIN TLACOTEPEC (OAX)	57	135	225
087	SAN AGUSTIN YATARENI (OAX)	57	135	225
088	SAN ANDRES CABECERA NUEVA (OAX)	80-103	244	315-405
089	SAN ANDRES DINICUITI (OAX)	34	81	135-225
090	SAN ANDRES HUAXPALTEPEC (OAX)	126	298	585
091	SAN ANDRES HUAYAPAM (OAX)	34-57	135	225
092	SAN ANDRES IXTLAHUACA (OAX)	57	135	225
093	SAN ANDRES LAGUNAS (OAX)	34	81	135-255
094	SAN ANDRES NUXIÑO (OAX)	34-57	135	225
095	SAN ANDRES PAXTLAN (OAX)	103	244	495
096	SAN ANDRES SINAXTLA (OAX)	34	81	135-225
097	SAN ANDRES SOLAGA (OAX)	34	81	135-225
098	SAN ANDRES TEOTILALPAM (OAX)	34	81	135
099	SAN ANDRES TEPETLAPA (OAX)	34	135	225
100	SAN ANDRES YAA (OAX)	34	81	135
101	SAN ANDRES ZABACHE (OAX)	80	190	315
102	SAN ANDRES ZAUTLA (OAX)	34-57	135	225
103	SAN ANTONINO CASTILLO VELASCO (OAX)	57	135	225-315
104	SAN ANTONINO EL ALTO (OAX)	57	190	315
105	SAN ANTONINO MONTE VERDE (OAX)	34	135	225
106	SAN ANTONIO ACUTLA (OAX)	34	81	135
107	SAN ANTONIO DE LA CAL (OAX)	57	135	225
108	SAN ANTONIO HUIITEPEC (OAX)	57	135-190	225-315
109	SAN ANTONIO NANAHUATIPAM (OAX)	34	81	135
110	SAN ANTONIO SINICAHUA (OAX)	57	135-190	225-315
111	SAN ANTONIO TEPETLAPA (OAX)	103-126	298	495-585
112	SAN BALTAZAR CHICHICAPAM (OAX)	57	135-190	225-315
113	SAN BALTAZAR LOXICHA (OAX)	126	298-352	495-585
114	SAN BALTAZAR YATZACHI EL BAJO (OAX)	34	81	135-225
115	SAN BARTOLO COYOTEPEC (OAX)	57	135	225
116	SAN BARTOLOME AYAUTLA (OAX)	34	81	135
117	SAN BARTOLOME LOXICHA (OAX)	126	298-352	585
118	SAN BARTOLOME QUIALANA (OAX)	57	135	225
119	SAN BARTOLOME YUCUAÑE (OAX)	57	135	225-315
120	SAN BARTOLOME ZOOGOCHO (OAX)	34	81	135-225
121	SAN BARTOLO SOYALTEPEC (OAX)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
122	SAN BARTOLO YAUTEPEC (OAX)	80	190-244	315-405
123	SAN BERNARDO MIXTEPEC (OAX)	57	135-190	225-315
124	SAN BLAS ATEMPA (OAX)	80-103	190-244	315-405-495
125	SAN CARLOS YAUTEPEC (OAX)	57-80-103-126	190-244-298-352	225-315-405-495-585
126	SAN CRISTOBAL AMATLAN (OAX)	80-103	244	405-495
127	SAN CRISTOBAL AMOLTEPEC (OAX)	57	135	225
128	SAN CRISTOBAL LACHIRIOAG (OAX)	34	81	135
129	SAN CRISTOBAL SUCHIXTLAHUACA (OAX)	34	81	135
130	SAN DIONISIO DEL MAR (OAX)	80	190	315
131	SAN DIONISIO OCOTEPEC (OAX)	57	135-190	225-315
132	SAN DIONISIO OCOTLAN (OAX)	57	135-190	315
133	SAN ESTEBAN ATATLAHUCA (OAX)	57-80	135-190	315
134	SAN FELIPE JALAPA DE DIAZ (OAX)	34	81	135
135	SAN FELIPE TEJALAPAM (OAX)	34-57	135	225
136	SAN FELIPE USILA (OAX)	34	81	135
137	SAN FRANCISCO CAHUACUA (OAX)	57-80	190-244	315-405
138	SAN FRANCISCO CAJONOS (OAX)	34	81	225
139	SAN FRANCISCO CHAPULAPA (OAX)	34	81	135
140	SAN FRANCISCO CHINDUA (OAX)	34	81-135	225
141	SAN FRANCISCO DEL MAR (OAX)	80	190	315
142	SAN FRANCISCO HUEHUETLAN (OAX)	34	81	135
143	SAN FRANCISCO IXHUATAN (OAX)	57-80	190	315
144	SAN FRANCISCO JALTEPETONGO (OAX)	34-57	135	225
145	SAN FRANCISCO LACHIGOLO (OAX)	57	135	225
146	SAN FRANCISCO LOGUECHE (OAX)	80-103	244	315-405
147	SAN FRANCISCO NUXAÑO (OAX)	34-57	135	225
148	SAN FRANCISCO OZOLOTEPEC (OAX)	126	298	495
149	SAN FRANCISCO SOLA (OAX)	80	244	405
150	SAN FRANCISCO TELIXTLAHUACA (OAX)	34	81-135	135-225
151	SAN FRANCISCO TEOPAN (OAX)	34	81	135
152	SAN FRANCISCO TLAPANCIÑO (OAX)	57	135	225
153	SAN GABRIEL MIXTEPEC (OAX)	126	298-352	585
154	SAN ILDEFONSO AMATLAN (OAX)	103	244	405-495
155	SAN ILDEFONSO SOLA (OAX)	80	190-244	315-405
156	SAN ILDEFONSO VILLA ALTA (OAX)	34	81	135
157	SAN JACINTO AMILPAS (OAX)	57	135	225
158	SAN JACINTO TLACOTEPEC (OAX)	103	298	495
159	SAN JERONIMO COATLAN (OAX)	103-126	298-352	495-585
160	SAN JERONIMO SILACAYOAPILLA (OAX)	34	81	135-225
161	SAN JERONIMO SOSOLA (OAX)	34	81-135	135-225
162	SAN JERONIMO TAVICHE (OAX)	57	135-190	315
163	SAN JERONIMO TECOATL (OAX)	34	81	135
164	SAN JORGE NUCHITA (OAX)	34	135	225
165	SAN JOSE AYUQUILA (OAX)	34	81	135
166	SAN JOSE CHILTEPEC (OAX)	34	81	135
167	SAN JOSE DEL PEÑASCO (OAX)	103	244	405-495
168	SAN JOSE ESTANCIA GRANDE (OAX)	103-126	298	585
169	SAN JOSE INDEPENDENCIA (OAX)	34	81	135
170	SAN JOSE LACHIGUIRI (OAX)	80	244	315-405
171	SAN JOSE TENANGO (OAX)	34	81	135
172	SAN JUAN ACHIUTLA (OAX)	34-57	135	225
173	SAN JUAN ATEPEC (OAX)	34	81	135
174	ANIMAS TRUJANO (OAX)	57	135	225
175	SAN JUAN BAUTISTA ATATLAHUCA (OAX)	34	81	135
176	SAN JUAN BAUTISTA COIXTLAHUACA (OAX)	34	81	135
177	SAN JUAN BAUTISTA CUICATLAN (OAX)	34	81	135
178	SAN JUAN BAUTISTA GUELACHE (OAX)	34	135	225
179	SAN JUAN BAUTISTA JAYACATLAN (OAX)	34	81	135-225
180	SAN JUAN BAUTISTA LO DE SOTO (OAX)	103	298	585
181	SAN JUAN BAUTISTA SUCHITEPEC (OAX)	34	81	135
182	SAN JUAN BAUTISTA TLACOATZINTEPEC (OAX)	34	81	135
183	SAN JUAN BAUTISTA TLACHICHILCO (OAX)	34-57	135	225
184	SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC (OAX)	34	81	135
185	SAN JUAN CACAHUATEPEC (OAX)	103-126	244-298	495-585
186	SAN JUAN CIENEGUILLA (OAX)	34	81-135	135-225
187	SAN JUAN COATZOSPAM (OAX)	34	81	135
188	SAN JUAN COLORADO (OAX)	103-126	298	495-585

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
189	SAN JUAN COMALTEPEC (OAX)	34	81	135
190	SAN JUAN COTZOCON (OAX)	34	81-135	135-225
191	SAN JUAN CHICOMEZUCHIL (OAX)	34	81	225
192	SAN JUAN CHILATECA (OAX)	57	135	225
193	SAN JUAN DEL ESTADO (OAX)	34	81-135	225
194	SAN JUAN DEL RIO (OAX)	57	135	225
195	SAN JUAN DIUXI (OAX)	57	135	225
196	SAN JUAN EVANGELISTA ANALCO (OAX)	34	81	135
197	SAN JUAN GUELAVIA (OAX)	57	135	225
198	SAN JUAN GUICHICOVI (OAX)	34-57	81-135	135-225
199	SAN JUAN IHUALTEPEC (OAX)	34	81-135	225
200	SAN JUAN JUQUILA MIXES (OAX)	34-57	135	225
201	SAN JUAN JUQUILA VIJANOS (OAX)	34	81	135
202	SAN JUAN LACHAO (OAX)	103-126	298	495-585
203	SAN JUAN LACHIGALLA (OAX)	80	190	315
204	SAN JUAN LAJARCIA (OAX)	80	190	315
205	SAN JUAN LALANA (OAX)	34	81	135
206	SAN JUAN DE LOS CUES (OAX)	34	81	135
207	SAN JUAN MAZATLAN (OAX)	34-57	81-135	135-225
208	SAN JUAN MIXTEPEC -DISTR. 08- (OAX)	34-57	135	225-315
209	SAN JUAN MIXTEPEC - DISTR. 26 - (OAX)	103	244	405-495
210	SAN JUAN TUMI (OAX)	34-57	135	225
211	SAN JUAN OZOLOTEPEC (OAX)	103-126	244-298	495
212	SAN JUAN PETLAPA (OAX)	34	81	135
213	SAN JUAN QUIAHUJE (OAX)	103-126	298	495-585
214	SAN JUAN QUIOTEPEC (OAX)	34	81	135
215	SAN JUAN SAYULTEPEC (OAX)	34	81-135	225
216	SAN JUAN TABAA (OAX)	34	81	135
217	SAN JUAN TAMAZOLA (OAX)	57	135	225
218	SAN JUAN TEITA (OAX)	57	135-190	225-315
219	SAN JUAN TEITIPAC (OAX)	57	135	225
220	SAN JUAN TEPEUXILA (OAX)	34	81	135
221	SAN JUAN TEPOSCOLULA (OAX)	34	81	135
222	SAN JUAN YAE (OAX)	34	81	135
223	SAN JUAN YATZONA (OAX)	34	81	135
224	SAN JUAN YUCUITA (OAX)	34	81	135
225	SAN LORENZO (OAX)	126	298	585
226	SAN LORENZO ALBARRADAS (OAX)	57	135	225
227	SAN LORENZO CACAOTEPEC (OAX)	34-57	135	225
228	SAN LORENZO CUAUNECUITITLA (OAX)	34	81	135
229	SAN LORENZO TEXMELUCAN (OAX)	80-103	244-298	405-495
230	SAN LORENZO VICTORIA (OAX)	34	135	225
231	SAN LUCAS CAMOTLAN (OAX)	34-57	135	225
232	SAN LUCAS OJITLAN (OAX)	34	81	135
233	SAN LUCAS QUIAVINI (OAX)	57	135	225
234	SAN LUCAS ZOQUIAPAM (OAX)	34	81	135
235	SAN LUIS AMATLAN (OAX)	80-103	190-244	315-405
236	SAN MARCIAL OZOLOTEPEC (OAX)	126	298	495-585
237	SAN MARCOS ARTEAGA (OAX)	34	81-135	225
238	SAN MARTIN DE LOS CANSECOS (OAX)	80	190	315
239	SAN MARTIN HUAMELULPAM (OAX)	34-57	135	225
240	SAN MARTIN ITUNYOSO (OAX)	57	135-190	225-315
241	SAN MARTIN LACHILA (OAX)	80	190	315
242	SAN MARTIN PERAS (OAX)	57	135-190	225-315
243	SAN MARTIN TILCAJETE (OAX)	57	135	225
244	SAN MARTIN TOXPALAN (OAX)	34	81	135
245	SAN MARTIN ZACATEPEC (OAX)	34	81	225
246	SAN MATEO CAJONOS (OAX)	34	81	225
247	CAPULPAM DE MENDEZ (OAX)	34	81	135-225
248	SAN MATEO DEL MAR (OAX)	103	244	495
249	SAN MATEO YOLOXOCHITLAN (OAX)	34	81	135
250	SAN MATEO ETLATONGO (OAX)	34	81-135	225
251	SAN MATEO NEJAPAM (OAX)	34	135	225
252	SAN MATEO PEÑASCO (OAX)	57	135	225-315
253	SAN MATEO PIÑAS (OAX)	126	298-352	495-585
254	SAN MATEO RIO HONDO (OAX)	103-126	244-298	495-585
255	SAN MATEO SINDIHUI (OAX)	57-80	135-190	315

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
256	SAN MATEO TLAPILTEPEC (OAX)	34	81	135
257	SAN MELCHOR BETAZA (OAX)	34	81	135-225
258	SAN MIGUEL ACHIUTLA (OAX)	57	135	225
259	SAN MIGUEL AHUEHUETITLAN (OAX)	34	135	225
260	SAN MIGUEL ALOPAM (OAX)	34	81	135-225
261	SAN MIGUEL AMATITLAN (OAX)	34	81	135-225
262	SAN MIGUEL AMATLAN (OAX)	34	81-135	225
263	SAN MIGUEL COATLAN (OAX)	103-126	244-298	495
264	SAN MIGUEL CHICAHUA (OAX)	34	81	135
265	SAN MIGUEL CHIMALAPA (OAX)	34-57	135	225
266	SAN MIGUEL DEL PUERTO (OAX)	126	298-352	495-585
267	SAN MIGUEL DEL RIO (OAX)	34	81	225
268	SAN MIGUEL EJUTLA (OAX)	80	190	315-405
269	SAN MIGUEL EL GRANDE (OAX)	57-80	135-190	315
270	SAN MIGUEL HUAUTLA (OAX)	34	81	135
271	SAN MIGUEL MIXTEPEC (OAX)	57-80	190	315
272	SAN MIGUEL PANIXTLAHUACA (OAX)	126	298-352	585
273	SAN MIGUEL PERAS (OAX)	57	135-190	225-315
274	SAN MIGUEL PIEDRAS (OAX)	57	135-190	225-315
275	SAN MIGUEL QUETZALTEPEC (OAX)	34-57	81-135	135-225
276	SAN MIGUEL SANTA FLOR (OAX)	34	81	135
277	VILLA SOLA DE VEGA (OAX)	57-80-103	190-244-298	315-405-495
278	NUEVO SOYALTEPEC (OAX)	34	81	135
279	SAN MIGUEL SUCHIXTEPEC (OAX)	126	298	495
280	SAN MIGUEL TALEA DE CASTRO (OAX)	34	81	135
281	SAN MIGUEL TECOMATLAN (OAX)	34-57	135	225
282	SAN MIGUEL TENANGO (OAX)	103-126	244-298	405-495
283	SAN MIGUEL TEQUIXTEPEC (OAX)	34	81	135
284	SAN MIGUEL TILQUIAPAM (OAX)	57	135-190	225-315
285	SAN MIGUEL TLACAMAMA (OAX)	126	298	585
286	SAN MIGUEL TLACOTEPEC (OAX)	34-57	135	225
287	SAN MIGUEL TULANCINGO (OAX)	34	81	135
288	SAN MIGUEL YOTAO (OAX)	34	81	135
289	SAN NICOLAS (OAX)	80	244	405
290	SAN NICOLAS HIDALGO (OAX)	34	81	225
291	SAN PABLO COATLAN (OAX)	103-126	244-298	495-585
292	SAN PABLO CUATRO VENADOS (OAX)	57	135-190	225-315
293	SAN PABLO ETLA (OAX)	34	135	225
294	SAN PABLO HUITZO (OAX)	34	81-135	225
295	SAN PABLO HUIXTEPEC (OAX)	57	135-190	315
296	SAN PABLO MACUILTIANGUIS (OAX)	34	81	135
297	SAN PABLO TIJALTEPEC (OAX)	57-80	190	315
298	SAN PABLO VILLA DE MITLA (OAX)	34-57	135	225
299	SAN PABLO YAGANIZA (OAX)	34	81-135	225
300	SAN PEDRO AMUZGOS (OAX)	103	244-298	495
301	SAN PEDRO APOSTOL (OAX)	57-80	190	315
302	SAN PEDRO ATOYAC (OAX)	103-126	298	495-585
303	SAN PEDRO CAJONOS (OAX)	34	81	225
304	SAN PEDRO CANTAROS COXCALTEPEC	34	81	135
305	SAN PEDRO COMITANCILLO (OAX)	80	190-244	315
306	SAN PEDRO EL ALTO (OAX)	126	298	495-585
307	SAN PEDRO HUAMELULA (OAX)	126-149	298-352	495-585
308	SAN PEDRO HUILOTEPEC (OAX)	103	244	495
309	SAN PEDRO IXCATLAN (OAX)	34	81	135
310	SAN PEDRO IXTLAHUACA (OAX)	57	135	225
311	SAN PEDRO JALTEPETONGO (OAX)	34	81	135
312	SAN PEDRO JICAYAN (OAX)	126	298	585
313	SAN PEDRO JOCOTIPAC (OAX)	34	81	135
314	SAN PEDRO JUCHATENGO (OAX)	103	298	495
315	SAN PEDRO MARTIR (OAX)	57	190	315
316	SAN PEDRO MARTIR QUIECHAPA (OAX)	80	190-244	315-405
317	SAN PEDRO MARTIR YUCUXACO (OAX)	34	135	225
318	SAN PEDRO MIXTEPEC - DISTR. 22 - (OAX)	126	352	585
319	SAN PEDRO MIXTEPEC - DISTR. 26 - (OAX)	103-126	244-298	405-495
320	SAN PEDRO MOLINOS (OAX)	57	135-190	315
321	SAN PEDRO NOPALA (OAX)	34	81	135
322	SAN PEDRO OCOPETATILLO (OAX)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
323	SAN PEDRO OCOTEPEC (OAX)	34-57	135	225
324	SAN PEDRO POCHUTLA (OAX)	126	298-352	585
325	SAN PEDRO QUIATONI (OAX)	57-80	135-190	225-315
326	SAN PEDRO SOCHIAPIAM (OAX)	34	81	135
327	SAN PEDRO TAPANATEPEC (OAX)	57-80	135-190	225-315
328	SAN PEDRO TAVICHE (OAX)	57-80	190	315
329	SAN PEDRO TEOZACALCO (OAX)	57	135-190	225-315
330	SAN PEDRO TEUTILA (OAX)	34	81	135
331	SAN PEDRO TIDAA (OAX)	34-57	135	225
332	SAN PEDRO TOPILTEPEC (OAX)	34	81-135	135-225
333	SAN PEDRO TOTOLAPA (OAX)	57-80	190	225-315
334	SAN PEDRO TUTUTEPEC (OAX)	126	298-352	585
335	SAN PEDRO YANERI (OAX)	34	81	135
336	SAN PEDRO YOLOX (OAX)	34	81	135
337	SAN PEDRO Y SAN PABLO AYUTLA (OAX)	34	81-135	225
338	VILLA DE ETLA (OAX)	34	135	225
339	SAN PEDRO Y SAN PABLO TEPOSCOLULA	34	81-135	135-225
340	SAN PEDRO Y SAN PABLO TEQUIXTEPEC	34	81	135
341	SAN PEDRO YUCUNAMA (OAX)	34	81	135
342	SAN RAYMUNDO JALPAN (OAX)	57	135	225
343	SAN SEBASTIAN ABASOLO (OAX)	57	135	225
344	SAN SEBASTIAN COATLAN (OAX)	103-126	298-352	495-585
345	SAN SEBASTIAN IXCAPA (OAX)	103-126	298	495-585
346	SAN SEBASTIAN NICANANDUTA (OAX)	34	135	225
347	SAN SEBASTIAN RIO HONDO (OAX)	103-126	244-298	495
348	SAN SEBASTIAN TECOMAXTLAHUACA (OAX)	34-57	135-190	225-315
349	SAN SEBASTIAN TEITIPAC (OAX)	57	135	225
350	SAN SEBASTIAN TUTLA (OAX)	57	135	225
351	SAN SIMON ALMOLONGAS (OAX)	80-103	244	405-495
352	SAN SIMON ZAHUATLAN (OAX)	34	81	135-225
353	SANTA ANA (OAX)	80-103	244	495
354	SANTA ANA ATEIXTLAHUACA (OAX)	34	81	135
355	SANTA ANA CUAUHTEMOC (OAX)	34	81	135
356	SANTA ANA DEL VALLE (OAX)	57	135	225
357	SANTA ANA TAVELA (OAX)	57-80	190	315
358	SANTA ANA TLAPACOYAN (OAX)	57-80	190	315
359	SANTA ANA YARENI (OAX)	34	81	135-225
360	SANTA ANA ZEGACHE (OAX)	57	135	225-315
361	SANTA CATALINA QUIERI (OAX)	80-103	244	405-495
362	SANTA CATALINA CUIXTLA (OAX)	103	244	405-495
363	SANTA CATALINA IXTEPEJI (OAX)	34	81-135	225
364	SANTA CATALINA JUQUILA (OAX)	103-126	298-352	495-585
365	SANTA CATALINA LACHATAO (OAX)	34	81-135	225
366	SANTA CATALINA LOXICHA (OAX)	126	298-352	495-585
367	SANTA CATALINA MECHOACAN (OAX)	126	298	585
368	SANTA CATALINA MINAS (OAX)	57	135-190	225-315
369	SANTA CATALINA QUIANE (OAX)	57	135	225
370	SANTA CATALINA TAYATA (OAX)	34-57	135	225
371	SANTA CATALINA TICUA (OAX)	57	135-190	315
372	SANTA CATALINA YOSNOTU (OAX)	57-80	190	315
373	SANTA CATALINA ZAPOQUILA (OAX)	34	81	135
374	SANTA CRUZ ACATEPEC (OAX)	34	81	135
375	SANTA CRUZ AMILPAS (OAX)	57	135	225
376	SANTA CRUZ DE BRAVO (OAX)	34	135	225
377	SANTA CRUZ ITUNDUJIA (OAX)	80-103	190-244-298	315-405-495
378	SANTA CRUZ MIXTEPEC (OAX)	57	190	315
379	SANTA CRUZ NUNDACO (OAX)	57	135-190	315
380	SANTA CRUZ PAPANUTLA (OAX)	57	135	225
381	SANTA CRUZ TACACHE DE MINA (OAX)	34	81	225
382	SANTA CRUZ TACAHUA (OAX)	80	190	315
383	SANTA CRUZ TAYATA (OAX)	34-57	135	225
384	SANTA CRUZ XITLA (OAX)	80-103	244	405-495
385	SANTA CRUZ XOXOCOTLAN (OAX)	57	135	225
386	SANTA CRUZ ZENZONTEPEC (OAX)	103-126	298	495-585
387	SANTA GERTRUDIS (OAX)	57	135-190	315
388	SANTA INES DEL MONTE (OAX)	57	135	225
389	SANTA INES YATZECHÉ (OAX)	57	135	315

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
390	SANTA LUCIA DEL CAMINO (OAX)	57	135	225
391	SANTA LUCIA MIAHUATLAN (OAX)	103-126	244-298	495
392	SANTA LUCIA MONTEVERDE (OAX)	80	190-244	315-405
393	SANTA LUCIA OCOTLAN (OAX)	57	190	315
394	SANTA MARIA ALOTEPEC (OAX)	34	81-135	135-225
395	SANTA MARIA APAZCO (OAX)	34	81	135
396	SANTA MARIA LA ASUNCION (OAX)	34	81	135
397	HEROICA CIUDAD DE TLAXIACO (OAX)	57	135-190	225-315
398	AYOQUEZCO DE ALDAMA (OAX)	80	190	315
399	SANTA MARIA ATZOMPA (OAX)	57	135	225
400	SANTA MARIA CAMOTLAN (OAX)	34	81	135
401	SANTA MARIA COLOTEPEC (OAX)	126	352	585
402	SANTA MARIA CORTIJO (OAX)	103-126	298	585
403	SANTA MARIA COYOTEPEC (OAX)	57	135	225
404	SANTA MARIA CHACHOAPAM (OAX)	34	81	135
405	SANTA MARIA CHILAPA DE DIAZ (OAX)	34	81-135	135-225
406	SANTA MARIA CHILCHOTLA (OAX)	34	81	135
407	SANTA MARIA CHIMALAPA (OAX)	34-57	81-135	135-225
408	SANTA MARIA DEL ROSARIO (OAX)	57	135	225
409	SANTA MARIA DEL TULE (OAX)	57	135	225
410	SANTA MARIA ECATEPEC (OAX)	80-103-126	244-298	315-405-495-585
411	SANTA MARIA GUELACE (OAX)	57	135	225
412	SANTA MARIA GUIENAGATI (OAX)	57-80	135-190	225-315
413	SANTA MARIA HUATULCO (OAX)	126	298-352	585
414	SANTA MARIA HUAZOLOTITLAN (OAX)	126	298	585
415	SANTA MARIA IPALAPA (OAX)	103-126	298	495
416	SANTA MARIA IXCATLAN (OAX)	34	81	135
417	SANTA MARIA JACATEPEC (OAX)	34	81	135
418	SANTA MARIA JALAPA DEL MARQUES (OAX)	80	190-244	315-405
419	SANTA MARIA JALTIANGUIS (OAX)	34	81	135-225
420	SANTA MARIA LACHIXIO (OAX)	57-80	190	315
421	SANTA MARIA MIXTEQUILLA (OAX)	80-103	190-244	315-405
422	SANTA MARIA NATIVITAS (OAX)	34	81	135
423	SANTA MARIA NDUAYACO (OAX)	34-57	135	225
424	SANTA MARIA OZOLOTEPEC (OAX)	103-126	244-298	495
425	SANTA MARIA PAPALO (OAX)	34	81	135
426	SANTA MARIA PEÑALES (OAX)	57	135	225
427	SANTA MARIA PETAPA (OAX)	34-57	81-135	225
428	SANTA MARIA QUIEGOLANI (OAX)	80-103	244	405-495
429	SANTA MARIA SOLA (OAX)	80	244	405
430	SANTA MARIA TATALTEPEC (OAX)	57	135	225-315
431	SANTA MARIA TECOMAVACA (OAX)	34	81	135
432	SANTA MARIA TEMAXCALAPA (OAX)	34	81	135
433	SANTA MARIA TEMAXCALTEPEC (OAX)	126	298	585
434	SANTA MARIA TEOPOXCO (OAX)	34	81	135
435	SANTA MARIA TEPANTLALI (OAX)	34-57	135	225
436	SANTA MARIA TEXCATITLAN (OAX)	34	81	135
437	SANTA MARIA TLAHUITOLTEPEC (OAX)	34	81-135	225
438	SANTA MARIA TLALIXTAC (OAX)	34	81	135
439	SANTA MARIA TONAMECA (OAX)	126	298-352	585
440	SANTA MARIA TOTOLAPILLA (OAX)	57-80	190	225-315
441	SANTA MARIA XADANI (OAX)	80-103	244	315-405
442	SANTA MARIA YALINA (OAX)	34	81	135-225
443	SANTA MARIA YAVESIA (OAX)	34	81-135	225
444	SANTA MARIA YOLOTEPEC (OAX)	80	190	315-405
445	SANTA MARIA YOSOYUA (OAX)	57	135-190	315
446	SANTA MARIA YUCUHITI (OAX)	57-80	190	315
447	SANTA MARIA ZACATEPEC (OAX)	80-103	244-298	405-495
448	SANTA MARIA ZANIZA (OAX)	80-103	244	405-495
449	SANTA MARIA ZOQUITLAN (OAX)	57-80	190-244	315-405
450	SANTIAGO AMOLTEPEC (OAX)	80-103	244-298	405-495
451	SANTIAGO APOALA (OAX)	34	81	135
452	SANTIAGO APOSTOL (OAX)	57	135-190	315
453	SANTIAGO ASTATA (OAX)	126-149	352	585
454	SANTIAGO ATITLAN (OAX)	34	81-135	135-225
455	SANTIAGO AYUQUILILLA (OAX)	34	81	135
456	SANTIAGO CACALOXTEPEC (OAX)	34	81	135-225

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
457	SANTIAGO CAMOTLAN (OAX)	34	81	135
458	SANTIAGO COMALTEPEC (OAX)	34	81	135
459	SANTIAGO CHAZUMBA (OAX)	34	81	135
460	SANTIAGO CHOAPAM (OAX)	34	81	135
461	SANTIAGO DEL RIO (OAX)	34-57	135	225
462	SANTIAGO HUAJOLOTILAN (OAX)	34	81	135
463	SANTIAGO HUAUCLILLA (OAX)	34	81	135-225
464	SANTIAGO IHUITLAN PLUMAS (OAX)	34	81	135
465	SANTIAGO IXCUINTEPEC (OAX)	34-57	135	225
466	SANTIAGO IXTAYUTLA (OAX)	103-126	298	495-585
467	SANTIAGO JAMILTEPEC (OAX)	126	298-352	585
468	SANTIAGO JOCOTEPEC (OAX)	34	81	135
469	SANTIAGO JUXTLAHUACA (OAX)	57-80	135-190-244	225-315
470	SANTIAGO LACHIGUIRI (OAX)	34-57-80	135-190	225-315
471	SANTIAGO LALOPA (OAX)	34	81	135
472	SANTIAGO LAOLLAGA (OAX)	57-80	190	225-315
473	SANTIAGO LAXOPA (OAX)	34	81-135	225
474	SANTIAGO LLANO GRANDE (OAX)	103-126	298	585
475	SANTIAGO MATATLAN (OAX)	57	135-190	225
476	SANTIAGO MILTEPEC (OAX)	34	81	135
477	SANTIAGO MINAS (OAX)	103	244-298	495
478	SANTIAGO NACALTEPEC (OAX)	34	81	135
479	SANTIAGO NEJAPILLA (OAX)	34	81-135	225
480	SANTIAGO NUNDICHE (OAX)	57	135	225
481	SANTIAGO NUYOO (OAX)	57-80	190-244	315-405
482	SANTIAGO PINOTEPA NACIONAL (OAX)	103-126	298	585
483	SANTIAGO SUCHILQUITONGO (OAX)	34-57	135	225
484	SANTIAGO TAMAZOLA (OAX)	34	81-135	225
485	SANTIAGO TAPEXTLA (OAX)	103	298	585
486	VILLA TEJUPAM DE LA UNION (OAX)	34	81	135
487	SANTIAGO TENANGO (OAX)	34	81-135	225
488	SANTIAGO TEPETLAPA (OAX)	34	81	135
489	SANTIAGO TETEPEC (OAX)	126	298	585
490	SANTIAGO TEXCALCINGO (OAX)	34	81	135
491	SANTIAGO TEXTITLAN (OAX)	80-103	190-244	405-495
492	SANTIAGO TILANTONGO (OAX)	57	135	225-315
493	SANTIAGO TILLO (OAX)	34	81	135-225
494	SANTIAGO TLAZOYALTEPEC (OAX)	57	135	225
495	SANTIAGO XANICA (OAX)	126	298	495-585
496	SANTIAGO XIACUI (OAX)	34	81	225
497	SANTIAGO YAITEPEC (OAX)	103-126	298	585
498	SANTIAGO YAVEO (OAX)	34	81	135
499	SANTIAGO YOLOMECATL (OAX)	34	135	225
500	SANTIAGO YOSONDUA (OAX)	80	190-244	315-405
501	SANTIAGO YUCUYACHI (OAX)	34	135	225
502	SANTIAGO ZACATEPEC (OAX)	34	81	135-225
503	SANTIAGO ZOOCHILA (OAX)	34	81	225
504	NUEVO ZOQUIAPAM (OAX)	34	81-135	225
505	SANTO DOMINGO INGENIO (OAX)	57-80	135-190	225-315
506	SANTO DOMINGO ALBARRADAS (OAX)	34	81-135	225
507	SANTO DOMINGO ARMENTA (OAX)	103	298	585
508	SANTO DOMINGO CHIHUITAN (OAX)	57-80	190	225-315
509	SANTO DOMINGO DE MORELOS (OAX)	126	352	585
510	SANTO DOMINGO IXCATLAN (OAX)	80	190	315-405
511	SANTO DOMINGO NUXAA (OAX)	57	135	225
512	SANTO DOMINGO OZOLOTEPEC (OAX)	103-126	244-298	495
513	SANTO DOMINGO PETAPA (OAX)	34-57	135-190	225
514	SANTO DOMINGO ROAYAGA (OAX)	34	81	135
515	SANTO DOMINGO TEHUANTEPEC (OAX)	57-80-103-126	135-244-298-352	315-405-495-585
516	SANTO DOMINGO TEJOMULCO (OAX)	80-103	244-298	405-495
517	SANTO DOMINGO TEPUXTEPEC (OAX)	57	135	225
518	SANTO DOMINGO TLATAYAPAM (OAX)	34	135	225
519	SANTO DOMINGO TOMALTEPEC (OAX)	34-57	135	225
520	SANTO DOMINGO TONALA (OAX)	34	81-135	225
521	SANTO DOMINGO TONALTEPEC (OAX)	34	81	135
522	SANTO DOMINGO XAGACIA (OAX)	34	81-135	225
523	SANTO DOMINGO YANHUITLAN (OAX)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
524	SANTO DOMINGO YODOHINO (OAX)	34	81	225
525	SANTO DOMINGO ZANATEPEC (OAX)	57-80	135-190	225-315
526	SANTOS REYES NOPALA (OAX)	126	298-352	585
527	SANTOS REYES PAPALO (OAX)	34	81	135
528	SANTOS REYES TEPEJILLO (OAX)	34-57	135	225
529	SANTOS REYES YUCUNA (OAX)	34	81	225
530	SANTO TOMAS JALIEZA (OAX)	57	135	225
531	SANTO TOMAS MAZALTEPEC (OAX)	34-57	135	225
532	SANTO TOMAS OCOTEPEC (OAX)	57	190	315
533	SANTO TOMAS TAMAZULAPAM (OAX)	103	244	495
534	SAN VICENTE COATLAN (OAX)	80-103	244	405-495
535	SAN VICENTE LACHIXIO (OAX)	80	190-244	315-405
536	SAN VICENTE NUJU (OAX)	34-57	81-135	225
537	SILACAYOAPAM (OAX)	34-57	81-135	225
538	SITIO DE XITLAPEHUA (OAX)	80-103	244	405
539	SOLEDAD ETLA (OAX)	34	135	225
540	VILLA DE TAMAZULAPAM DEL PROGRESO (OAX)	34	81	135-225
541	TANETZE DE ZARAGOZA (OAX)	34	81	135
542	TANICHE (OAX)	80	190	315-405
543	TATALTEPEC DE VALDES (OAX)	126	298-352	585
544	TEOCOCUILCO DE MARCOS PEREZ (OAX)	34	81-135	135-225
545	TEOTITLAN DE FLORES MAGON (OAX)	34	81	135
546	TEOTITLAN DEL VALLE (OAX)	34-57	135	225
547	TEOTONGO (OAX)	34	81	135
548	TEPELMEME VILLA DE MORELOS (OAX)	34	81	135
549	TEZOATLAN DE SEGURA Y LUNA (OAX)	34	81-135	225
550	SAN JERONIMO TLACOCHAHUAYA (OAX)	57	135	225
551	TLACOLULA DE MATAMOROS (OAX)	57	135-190	225
552	TLACOTEPEC PLUMAS (OAX)	34	81	135
553	TLALIXTAC DE CABRERA (OAX)	34-57	135	225
554	TOTONTEPEC VILLA DE MORELOS (OAX)	34	81	135-225
555	TRINIDAD ZAACHILA (OAX)	57	135	225
556	TRINIDAD VISTA HERMOSA, LA (OAX)	34	81	135
557	UNION HIDALGO (OAX)	80	190	315
558	VALERIO TRUJANO (OAX)	34	81	135
559	SAN JUAN BAUTISTA VALLE NACIONAL (OAX)	34	81	135
560	VILLA DIAZ ORDAZ (OAX)	34-57	135	225
561	YAXE (OAX)	57	135-190	225-315
562	MAGDALENA YODOCONO DE P. DIAZ (OAX)	34-57	135	225
563	YOGANA (OAX)	80	244	405
564	YUTANDUCHI DE GUERRERO (OAX)	57	135	225-315
565	VILLA DE ZAACHILA (OAX)	57	135	225
566	ZAPOTITLAN DEL RIO (OAX)	57-80-103	190-244	315-405-495
567	ZAPOTITLAN LAGUNAS (OAX)	34	135	225
568	ZAPOTITLAN PALMAS (OAX)	34	81	135
569	SANTA INES DE ZARAGOZA (OAX)	34-57	135	225
570	ZIMATLAN DE ALVAREZ (OAX)	57-80	135-190-244	225-315-405
PUEBLA				
001	ACAJETE (PUE)	34	81	135
002	ACATENO (PUE)	11	27	45-135
003	ACATLAN (PUE)	34	81	135
004	ACATZINGO (PUE)	34	81	135
005	ACTEOPAN (PUE)	34	81	135
006	AHUACATLAN (PUE)	11	27	135
007	AHUATLAN (PUE)	34	81	135
008	AHUAZOTEPEC (PUE)	11	27	135
009	AHUEHUETITLA (PUE)	34	81	135
010	AJALPAN (PUE)	34	81	135
011	ALBINO ZERTUCHE (PUE)	34	81	135
012	ALJOJUCA (PUE)	34	81	135
013	ALTEPEXI (PUE)	34	81	135
014	AMIXTLAN (PUE)	11	27	135
015	AMOZOC (PUE)	34	81	135
016	AQUIXTLA (PUE)	11	27-81	135
017	ATEMPAN (PUE)	11	17	135
018	ATEXCAL (PUE)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
019	ATLIXCO (PUE)	34	81	135
020	ATOYATEMPAN (PUE)	34	81	135
021	ATZALA (PUE)	34	81	135
022	ATZITZIHUACAN (PUE)	34	81	135
023	ATZITZINTLA (PUE)	34	81	135
024	AXUTLA (PUE)	34	81	135
025	AYOTOXCO DE GUERRERO (PUE)	11	27	135
026	CALPAN (PUE)	34	81	135
027	CALTEPEC (PUE)	34	81	135
028	CAMOCUAUTLA (PUE)	11	27	135
029	CAXHUACAN (PUE)	11	27	135
030	COATEPEC (PUE)	11	27	135
031	COATZINGO (PUE)	34	81	135
032	COHETZALA (PUE)	34	81	135
033	COHUECAN (PUE)	34	81	135
034	CORONANGO (PUE)	34	81	135
035	COXCATLAN (PUE)	34	81	135
036	COYOMEAPAN (PUE)	34	81	135
037	COYOTEPEC (PUE)	34	81	135
038	CUAPIAXTLA DE MADERO (PUE)	34	81	135
039	CUAUTEMPAN (PUE)	11	27	135
040	CUAUTINCHAN (PUE)	34	81	135
041	CUAUTLANCINGO (PUE)	34	81	135
042	CUAYUCA DE ANDRADE (PUE)	34	81	135
043	CUETZALAN DEL PROGRESO (PUE)	11	27	135
044	CUYOACO (PUE)	11	81	135
045	CHALCHICOMULA DE SESMA (PUE)	34	81	135
046	CHAPULCO (PUE)	34	81	135
047	CHIAUTLA (PUE)	34	81	135
048	CHIAUTZINGO (PUE)	34-11	81	135
049	CHICONCUAUTLA (PUE)	11	27	135
050	CHICHQUILA (PUE)	11	81	135
051	CHIETLA (PUE)	34	81	135
052	CHIGMECATITLAN (PUE)	34	81	135
053	CHIGNAHUAPAN (PUE)	11	27-81	135
054	CHIGNAUTLA (PUE)	11	27-81	135
055	CHILA (PUE)	34	81	135
056	CHILA DE LA SAL (PUE)	34	81	135
057	CHILA HONEY (PUE)	11	27	135
058	CHILCHOTLA (PUE)	11	81	135
059	CHINANTLA (PUE)	34	81	135
060	DOMINGO ARENAS (PUE)	34	81	135
061	ELOXOCHITLAN (PUE)	34	81	135
062	EPATLAN (PUE)	34	81	135
063	ESPERANZA (PUE)	34	81	135
064	FRANCISCO Z. MENA (PUE)	11	27	45-135
065	GENERAL FELIPE ANGELES (PUE)	34	81	135
066	GUADALUPE (PUE)	34	81	135
067	GUADALUPE VICTORIA (PUE)	11	81	135
068	HERMENEGILDO GALEANA (PUE)	11	27	135
069	HUAQUECHULA (PUE)	34	81	135
070	HUATLATLAUCA (PUE)	34	81	135
071	HUAUCHINANGO (PUE)	11	27	135
072	HUEHUETLA (PUE)	11	27	135
073	HUEHUETLAN EL CHICO (PUE)	34	81	135
074	HUEJOTZINGO (PUE)	34-11	81	135
075	HUEYAPAN (PUE)	11	27	135
076	HUEYTAMALCO (PUE)	11	27	135
077	HUEYTLALPAN (PUE)	11	27	135
078	HUITZILAN DE SERDAN (PUE)	11	27	135
079	HUITZILTEPEC (PUE)	34	81	135
080	IGNACIO ALLENDE (PUE)	11	27	135
081	IXCAMILPA DE GUERRERO (PUE)	34	81	135
082	IXCAQUITLA (PUE)	34	81	135
083	IXTACAMAXTITLAN (PUE)	11	81	135
084	IXTEPEC (PUE)	11	27	135
085	IZUCAR DE MATAMOROS (PUE)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
086	JALPAN (PUE)	11	27	135
087	JOLALPAN (PUE)	34	81	135
088	JONOTLA (PUE)	11	27	135
089	JOPALA (PUE)	11	27	135
090	JUAN C. BONILLA (PUE)	34	81	135
091	JUAN GALINDO (PUE)	11	27	135
092	JUAN N. MENDEZ (PUE)	34	81	135
093	LAFRAGUA (PUE)	11	81	135
094	LIBRES (PUE)	11	81	135
095	MAGDALENA TLATLAUQUITEPEC, LA	34	81	135
096	MAZAPILTEPEC DE JUAREZ (PUE)	34	81	135
097	MIXTLA (PUE)	34	81	135
098	MOLCAXAC (PUE)	34	81	135
099	CAÑADA MORELOS (PUE)	34	81	135
100	NAUPAN (PUE)	11	27	135
101	NAUZONTLA (PUE)	11	27	135
102	NEALTICAN (PUE)	34	81	135
103	NICOLAS BRAVO (PUE)	34	81	135
104	NOPALUCAN (PUE)	34-11	81	135
105	NOCOTEPEC (PUE)	11	81	135
106	OCOYUCAN (PUE)	34	81	135
107	OLINTLA (PUE)	11	27	135
108	ORIENTAL (PUE)	11	81	135
109	PAHUATLAN (PUE)	11	27	135
110	PALMAR DE BRAVO (PUE)	34	81	135
111	PANTEPEC (PUE)	11	27	45-135
112	PETLALCINGO (PUE)	34	81	135
113	PIAXTLA (PUE)	34	81	135
114	PUEBLA (PUE)	34	81	135
115	QUECHOLAC (PUE)	34	81	135
116	QUIMIXTLAN (PUE)	11	81	135
117	RAFAEL LARA GRAJALES (PUE)	11	81	135
118	REYES DE JUAREZ, LOS (PUE)	34	81	135
119	SAN ANDRES CHOLULA (PUE)	34	81	135
120	SAN ANTONIO CAÑADA (PUE)	34	81	135
121	SAN DIEGO LA MESA TOCHIMILTZINGO	34	81	135
122	SAN FELIPE TEOTLALCINGO (PUE)	34-11	81	135
123	SAN FELIPE TEPATLAN (PUE)	11	27	135
124	SAN GABRIEL CHILAC (PUE)	34	81	135
125	SAN GREGORIO ATZOMPA (PUE)	34	81	135
126	SAN JERONIMO TECUANIPAN (PUE)	34	81	135
127	SAN JERONIMO XAYACATLAN (PUE)	34	81	135
128	SAN JOSE CHIAPA (PUE)	34-11	81	135
129	SAN JOSE MIAHUATLAN (PUE)	34	81	135
130	SAN JUAN ATENCO (PUE)	34	81	135
131	SAN JUAN ATZOMPA (PUE)	34	81	135
132	SAN MARTIN TEXMELUCAN (PUE)	34-11	81	135
133	SAN MARTIN TOTOLTEPEC (PUE)	34	81	135
134	SAN MATIAS TLALANCALECA (PUE)	11	81	135
135	SAN MIGUEL IXITLAN (PUE)	34	81	135
136	SAN MIGUEL XOXTLA (PUE)	34	81	135
137	SAN NICOLAS BUENOS AIRES (PUE)	34-11	81	135
138	SAN NICOLAS DE LOS RANCHOS (PUE)	34	81	135
139	SAN PABLO ANICANO (PUE)	34	81	135
140	SAN PEDRO CHOLULA (PUE)	34	81	135
141	SAN PEDRO YELOIXTLAHUACA (PUE)	34	81	135
142	SAN SALVADOR EL SECO (PUE)	34-11	81	135
143	SAN SALVADOR EL VERDE (PUE)	34-11	81	135
144	SAN SALVADOR HUIXCOLOTLA (PUE)	34	81	135
145	SAN SEBASTIAN TLACOTEPEC (PUE)	34	81	135
146	SANTA CATARINA TLALTEMPAN (PUE)	34	81	135
147	SANTA INES AHUATEMPAN (PUE)	34	81	135
148	SANTA ISABEL CHOLULA (PUE)	34	81	135
149	SANTIAGO MIAHUATLAN (PUE)	34	81	135
150	HUEHUETLAN EL GRANDE (PUE)	34	81	135
151	SANTO TOMAS HUEYOTLIPAN (PUE)	34	81	135
152	SOLTEPEC (PUE)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
153	TECALI DE HERRERA (PUE)	34	81	135
154	TECAMACHALCO (PUE)	34	81	135
155	TECOMATLAN (PUE)	34	81	135
156	TEHUACAN (PUE)	34	81	135
157	TEHUITZINGO (PUE)	34	81	135
158	TENAMPULCO (PUE)	11	27	135
159	TEOPANTLAN (PUE)	34	81	135
160	TEOTLALCO (PUE)	34	81	135
161	TEPANCO DE LOPEZ (PUE)	34	81	135
162	TEPANGO DE RODRIGUEZ (PUE)	11	27	135
163	TEPATLAXCO DE HIDALGO (PUE)	34	81	135
164	TEPEACA (PUE)	34	81	135
165	TEPEMAXALCO (PUE)	34	81	135
166	TEPEOJUMA (PUE)	34	81	135
167	TEPETZINTLA (PUE)	11	27	135
168	TEPEXCO (PUE)	34	81	135
169	TEPEXI DE RODRIGUEZ (PUE)	34	81	135
170	TEPEYAHUALCO (PUE)	11	27-81	135
171	TEPEYAHUALCO DE CUAUHEMOC	34	81	135
172	TETELA DE OCAMPO (PUE)	11	27-81	135
173	TETELES DE AVILA CASTILLO (PUE)	11	27	135
174	TEZIUTLAN (PUE)	11	27	135
175	TIANGUISMANALCO (PUE)	34	81	135
176	TILAPA (PUE)	34	81	135
177	TLACOTEPEC DE BENITO JUAREZ (PUE)	34	81	135
178	TLACUILOTEPEC (PUE)	11	27	135
179	TLACHICHUCA (PUE)	34-11	81	135
180	TLAHUAPAN (PUE)	11	81	135
181	TLALTENANGO (PUE)	34	81	135
182	TLANEPANTLA (PUE)	34	81	135
183	TLAOLA (PUE)	11	27	135
184	TLAPACOYA (PUE)	11	27	135
185	TLAPANALA (PUE)	34	81	135
186	TLATLAUQUITEPEC (PUE)	11	27-81	135
187	TLAXCO (PUE)	11	27	135
188	TOCHIMILCO (PUE)	34	81	135
189	TOCHTEPEC (PUE)	34	81	135
190	TOTOLTEPEC DE GUERRERO (PUE)	34	81	135
191	TULCINGO (PUE)	34	81	135
192	TUZAMAPAN DE GALEANA (PUE)	11	27	135
193	TZICATLACOYAN (PUE)	34	81	135
194	VENUSTIANO CARRANZA (PUE)	11	27	45-135
195	VICENTE GUERRERO (PUE)	34	81	135
196	XAYACATLAN DE BRAVO (PUE)	34	81	135
197	XICOTEPEC (PUE)	11	27	135
198	XICOTLAN (PUE)	34	81	135
199	XIUTETELCO (PUE)	11	27-81	135
200	XOCHIAPULCO (PUE)	11	27	135
201	XOCHILTEPEC (PUE)	34	81	135
202	XOCHITLAN DE VICENTE SUAREZ (PUE)	11	27	135
203	XOCHITLAN TODOS SANTOS (PUE)	34	81	135
204	YAONAHUAC (PUE)	11	27	135
205	YEHUALTEPEC (PUE)	34	81	135
206	ZACAPALA (PUE)	34	81	135
207	ZACAPOAXTLA (PUE)	11	27-81	135
208	ZACATLAN (PUE)	11	27	135
209	ZAPOTITLAN (PUE)	34	81	135
210	ZAPOTITLAN DE MENDEZ (PUE)	11	27	135
211	ZARAGOZA (PUE)	11	27-81	135
212	ZAUTLA (PUE)	11	27-81	135
213	ZIHUATEUTLA (PUE)	11	27	135
214	ZINACATEPEC (PUE)	34	81	135
215	ZONGOZOTLA (PUE)	11	27	135
216	ZOQUIAPAN (PUE)	11	27	135
217	ZOQUITLAN (PUE)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
QUERETARO				
001	AMEALCO DE BONFIL (QRO)	11	27	45
002	PINAL DE AMOLES (QRO)	11	27	45
003	ARROYO SECO (QRO)	11	27	45
004	CADEREYTA DE MONTES (QRO)	11	27	45
005	COLON (QRO)	11	27	45
006	CORREGIDORA (QRO)	11	27	45
007	EZEQUIEL MONTES (QRO)	11	27	45
008	HUIMILPAN (QRO)	11	27	45
009	JALPAN DE SERRA (QRO)	11	27	45
010	LANDA DE MATAMOROS (QRO)	11	27	45
011	MARQUES, EL (QRO)	11	27	45
012	PEDRO ESCOBEDO (QRO)	11	27	45
013	PEÑAMILLER (QRO)	11	27	45
014	QUERETARO (QRO)	11	27	45
015	SAN JOAQUIN (QRO)	11	27	45
016	SAN JUAN DEL RIO (QRO)	11	27	45
017	TEQUISQUIAPAN (QRO)	11	27	45
018	TOLIMAN (QRO)	11	27	45
QUINTANA ROO				
001	COZUMEL (QTR)	11	27	45
002	FELIPE CARRILLO PUERTO (QTR)	11	27	45
003	ISLA MUJERES (QTR)	11	27	45
004	OTHON P. BLANCO (QTR)	11	27-81	45-135
005	BENITO JUAREZ (QTR)	11	27	45
006	JOSE MARIA MORELOS (QTR)	11	27	45
007	LAZARO CARDENAS (QTR)	11	27	45
008	SOLIDARIDAD (QTR)	11	27	45
SAN LUIS POTOSI				
001	AHUALULCO (SLP)	11	27	45
002	ALAQUINES (SLP)	11	27	45
003	AQUISMON (SLP)	11	27	45
004	ARMADILLO DE LOS INFANTE (SLP)	11	27	45
005	CARDENAS (SLP)	11	27	45
006	CATORCE (SLP)	11	27	45
007	CEDRAL (SLP)	11	27	45
008	CERRITOS (SLP)	11	27	45
009	CERRO DE SAN PEDRO (SLP)	11	27	45
010	CIUDAD DEL MAIZ (SLP)	11	27	45
011	CIUDAD FERNANDEZ (SLP)	11	27	45
012	TANCANHUITZ DE SANTOS (SLP)	11	27	45
013	CIUDAD VALLES (SLP)	11	27	45
014	COXCATLAN (SLP)	11	27	45
015	CHARCAS (SLP)	11	27	45
016	EBANO (SLP)	11	27	45
017	GUADALCAZAR (SLP)	11	27	45
018	HUEHUETLAN (SLP)	11	27	45
019	LAGUNILLAS (SLP)	11	27	45
020	MATEHUALA (SLP)	11	27	45
021	MEXQUITIC DE CARMONA (SLP)	11	27	45
022	MOCTEZUMA (SLP)	11	27	45
023	RAYON (SLP)	11	27	45
024	RIOVERDE (SLP)	11	27	45
025	SALINAS (SLP)	11	27	45
026	SAN ANTONIO (SLP)	11	27	45
027	SAN CIRO DE ACOSTA (SLP)	11	27	45
028	SAN LUIS POTOSI (SLP)	11	27	45
029	SAN MARTIN CHALCHICUAUTLA (SLP)	11	27	45
030	SAN NICOLAS TOLENTINO (SLP)	11	27	45
031	SANTA CATARINA (SLP)	11	27	45
032	SANTA MARIA DEL RIO (SLP)	11	27	45
033	SANTO DOMINGO (SLP)	11	27	45
034	SAN VICENTE TANCUAYALAB (SLP)	11	27	45
035	SOLEDAD DE GRACIANO SANCHEZ (SLP)	11	27	45
036	TAMASOPO (SLP)	11	27	45

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
037	TAMAZUNCHALE (SLP)	11	27	45
038	TAMPACAN (SLP)	11	27	45
039	TAMPAMOLON CORONA (SLP)	11	27	45
040	TAMUIN (SLP)	11	27	45
041	TANLAJAS (SLP)	11	27	45
042	TANQUIAN DE ESCOBEDO (SLP)	11	27	45
043	TIERRANUEVA (SLP)	11	27	45
044	VANEGAS (SLP)	11	27	45
045	VENADO (SLP)	11	27	45
046	VILLA DE ARRIAGA (SLP)	11	27	45
047	VILLA DE GUADALUPE (SLP)	11	27	45
048	VILLA DE LA PAZ (SLP)	11	27	45
049	VILLA DE RAMOS (SLP)	11	27	45
050	VILLA DE REYES (SLP)	11	27	45
051	VILLA HIDALGO (SLP)	11	27	45
052	VILLA JUAREZ (SLP)	11	27	45
053	AXTLA DE TERRAZAS (SLP)	11	27	45
054	XILITLA (SLP)	11	27	45
055	ZARAGOZA (SLP)	11	27	45
056	VILLA DE ARISTA (SLP)	11	27	45
057	MATLAPA (SLP)	11	27	45
058	NARANJO, EL (SLP)	11	27	45
SINALOA				
001	AHOME (SIN)	34-57	81-135-190	135-225
002	ANGOSTURA (SIN)	34	27-81	45-135
003	BADIRAGUATO (SIN)	11	27	45
004	CONCORDIA (SIN)	11	27	45
005	COSALA (SIN)	11	27	45
006	CULIACAN (SIN)	34-11	27	45-135
007	CHOIX (SIN)	11	27	45
008	ELOTA (SIN)	11	27	45
009	ESCUINAPA (SIN)	11	27	45
010	FUERTE, EL (SIN)	34-11	27-81	45-135-225
011	GUASAVE (SIN)	34-57	27-81-135	45-135
012	MAZATLAN (SIN)	11	27	45
013	MOCORITO (SIN)	34-11	27-81	45-135
014	ROSARIO (SIN)	11	27	45
015	SALVADOR ALVARADO (SIN)	34-11	27-81	45-135
016	SAN IGNACIO (SIN)	11	27	45
017	SINALOA (SIN)	34-11	27-81	45-135
018	NAVOLATO (SIN)	34-11	27-81	45-135
SONORA				
001	ACONCHI (SON)	11	27	45
002	AGUA PRIETA (SON)	11	27	45
003	ALAMOS (SON)	34-11	27-81	45-135
004	ALTAR (SON)	11	27	45
005	ARIVECHI (SON)	11	27	45
006	ARIZPE (SON)	11	27	45
007	ATIL (SON)	11	27	45
008	BACADEHUACHI (SON)	11	27	45
009	BACANORA (SON)	11	27	45
010	BACERAC (SON)	11	27	45
011	BACOACHI (SON)	11	27	45
012	BACUM (SON)	11-34-57	27-81-135	45-135-225
013	BANAMICHI (SON)	11	27	45
014	BAVIACORA (SON)	11	27	45
015	BAVISPE (SON)	11	27	45
016	BENJAMIN HILL (SON)	11	27	45
017	CABORCA (SON)	34-11	27-81	45-135
018	CAJEME (SON)	11-34-57	27-81-135	45-135-225
019	CANANEA (SON)	11	27	45
020	CARBO (SON)	11	27	45
021	COLORADA, LA (SON)	11	27	45
022	CUCURPE (SON)	11	27	45
023	CUMPAS (SON)	11	27	45
024	DIVISADEROS (SON)	11	27	45

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
025	EMPALME (SON)	34	27-81	135
026	ETCHOJOA (SON)	34-57	81-135	135-225
027	FRONTERAS (SON)	11	27	45
028	GRANADOS (SON)	11	27	45
029	GUAYMAS (SON)	34-11	27-81-135	45-135-225
030	HERMOSILLO (SON)	34-11	27-81-135	45-135-225
031	HUACHINERA (SON)	11	27	45
032	HUASABAS (SON)	11	27	45
033	HUATABAMPO (SON)	34-57	81-135	135-225
034	HUEPAC (SON)	11	27	45
035	IMURIS (SON)	11	27	45
036	MAGDALENA (SON)	11	27	45
037	MAZATAN (SON)	11	27	45
038	MOCTEZUMA (SON)	11	27	45
039	NACO (SON)	11	27	45
040	NACORI CHICO (SON)	11	27	45
041	NACUZARI DE GARCIA (SON)	11	27	45
042	NAVOJOA (SON)	34-11	27-81	45-135
043	NOGALES (SON)	11	27	45
044	ONAVAS (SON)	11	27	45
045	OPODEPE (SON)	11	27	45
046	OQUITOA (SON)	11	27	45
047	PITIQUITO (SON)	34-11	27-81-135	45-135-225
048	PUERTO PEÑASCO (SON)	34-57	27-81	45-135-225
049	QUIRIEGO (SON)	34-11	27-81	45-135
050	RAYON (SON)	11	27	45
051	ROSARIO (SON)	11	27	45
052	SAHUARIPA (SON)	11	27	45
053	SAN FELIPE DE JESUS (SON)	11	27	45
054	SAN JAVIER (SON)	11	27	45
055	SAN LUIS RIO COLORADO (SON)	34-57-80	81-135-190-244	135-225-315-405
056	SAN MIGUEL DE HORCASITAS (SON)	11	27	45
057	SAN PEDRO DE LA CUEVA (SON)	11	27	45
058	SANTA ANA (SON)	11	27	45
059	SANTA CRUZ (SON)	11	27	45
060	SARIC (SON)	11	27	45
061	SOYOPA (SON)	11	27	45
062	SUAQUI GRANDE (SON)	11	27	45
063	TEPACHE (SON)	11	27	45
064	TRINCHERAS (SON)	11	27	45
065	TUBUTAMA (SON)	11	27	45
066	URES (SON)	11	27	45
067	VILLA HIDALGO (SON)	11	27	45
068	VILLA PESQUEIRA (SON)	11	27	45
069	YECORA (SON)	11	27	45
070	GENERAL PLUTARCO ELIAS CALLES (SON)	34-11	27-81	45-135
071	BENITO JUÁREZ (SON)	34-57	81-135	135-225
072	SAN IGNACIO RIO MUERTO (SON)	34-57	81-135	135-225
TABASCO				
001	BALANCAN (TAB)	11	27-81	45-135
002	CARDENAS (TAB)	11	27-81	45-135
003	CENTLA (TAB)	11	27	45-135
004	CENTRO (TAB)	11	27-81	45-135
005	COMALCALCO (TAB)	11	27-81	45-135
006	CUNDUACAN (TAB)	11	27-81	135
007	EMILIANO ZAPATA (TAB)	11	27-81	45-135
008	HUIMANGUILLO (TAB)	34-11	81	135
009	JALAPA (TAB)	11	81	135
010	JALPA DE MENDEZ (TAB)	11	27	45-135
011	JONUTA (TAB)	11	27	45-135
012	MACUSPANA (TAB)	11	27-81	45-135
013	NACAJUCA (TAB)	11	27-81	45-135
014	PARAISO (TAB)	11	27	45
015	TACOTALPA (TAB)	34-11	81	135
016	TEAPA (TAB)	34-11	81	135
017	TENOSIQUE (TAB)	11	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
TAMAULIPAS				
001	ABASOLO (TAM)	11	27	45
002	ALDAMA (TAM)	11	27	45
003	ALTAMIRA (TAM)	11	27	45
004	ANTIGUO MORELOS (TAM)	11	27	45
005	BURGOS (TAM)	11	27	45
006	BUSTAMANTE (TAM)	11	27	45
007	CAMARGO (TAM)	11	27	45
008	CASAS (TAM)	11	27	45
009	CIUDAD MADERO (TAM)	11	27	45
010	CRUILLAS (TAM)	11	27	45
011	GOMEZ FARIAS (TAM)	11	27	45
012	GONZALEZ (TAM)	11	27	45
013	GSEMEZ (TAM)	11	27	45
014	GUERRERO (TAM)	11	27	45
015	GUSTAVO DIAZ ORDAZ (TAM)	11	27	45
016	HIDALGO (TAM)	11	27	45
017	JAUMAVE (TAM)	11	27	45
018	JIMENEZ (TAM)	11	27	45
019	LLERA (TAM)	11	27	45
020	MAINERO (TAM)	11	27	45
021	MANTE, EL (TAM)	11	27	45
022	MATAMOROS (TAM)	11	27	45
023	MENDEZ (TAM)	11	27	45
024	MIER (TAM)	11	27	45
025	MIGUEL ALEMAN (TAM)	11	27	45
026	MIQUIHUANA (TAM)	11	27	45
027	NUEVO LAREDO (TAM)	11	27	45
028	NUEVO MORELOS (TAM)	11	27	45
029	OCAMPO (TAM)	11	27	45
030	PADILLA (TAM)	11	27	45
031	PALMILLAS (TAM)	11	27	45
032	REYNOSA (TAM)	11	27	45
033	RIO BRAVO (TAM)	11	27	45
034	SAN CARLOS (TAM)	11	27	45
035	SAN FERNANDO (TAM)	11	27	45
036	SAN NICOLAS (TAM)	11	27	45
037	SOTO LA MARINA (TAM)	11	27	45
038	TAMPICO (TAM)	11	27	45
039	TULA (TAM)	11	27	45
040	VALLE HERMOSO (TAM)	11	27	45
041	VICTORIA (TAM)	11	27	45
042	VILLAGRAN (TAM)	11	27	45
043	XICOTENCATL (TAM)	11	27	45
TLAXCALA				
001	AMAXAC DE GUERRERO (TLA)	11	81	135
002	APETATITLAN DE ANTONIO CARVAJAL (TLA)	11	81	135
003	ATLANGATEPEC (TLA)	11	81	135
004	ALTZAYANCA (TLA)	11	81	135
005	APIZACO (TLA)	11	81	135
006	CALPULALPAN (TLA)	11	81	135
007	CARMEN TEQUEXQUITLA, EL (TLA)	11	81	135
008	CUAPIAXTLA (TLA)	11	81	135
009	CUAXOMULCO (TLA)	11	81	135
010	CHIAUTEMPAN (TLA)	11	81	135
011	MUÑOZ DE DOMINGO ARENAS (TLA)	11	81	135
012	ESPAÑITA (TLA)	11	81	135
013	HUAMANTLA (TLA)	11	81	135
014	HUEYOTLIPAN (TLA)	11	81	135
015	IXTACUIXTLA DE MARIANO MATAMOROS (TLA)	11	81	135
016	IXTENCO (TLA)	11	81	135
017	MAZATECOCHCO DE JOSE MARIA MORELOS (TLA)	34	81	135
018	CONTLA DE JUAN CUAMATZI (TLA)	11	81	135
019	TEPETITLA DE LARDIZABAL (TLA)	11	81	135
020	SANCTORUM DE LAZARO CARDENAS (TLA)	11	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
021	NANACAMILPA DE MARIANO ARISTA (TLA)	11	81	135
022	ACUAMANALA DE MIGUEL HIDALGO (TLA)	34-11	81	135
023	NATIVITAS (TLA)	34-11	81	135
024	PANOTLA (TLA)	11	81	135
025	SAN PABLO DEL MONTE (TLA)	34	81	135
026	SANTA CRUZ TLAXCALA (TLA)	11	81	135
027	TENANCINGO (TLA)	34	81	135
028	TEOLOCHOLCO (TLA)	34-11	81	135
029	TEPEYANCO (TLA)	34-11	81	135
030	TERRENATE (TLA)	11	81	135
031	TETLA (TLA)	11	81	135
032	TETLATLAHUCA (TLA)	34-11	81	135
033	TLAXCALA (TLA)	11	81	135
034	TLAXCO (TLA)	11	81	135
035	TOCATLAN (TLA)	11	81	135
036	TOTOLAC (TLA)	11	81	135
037	ZITLALTEPEC DE TRINIDAD SANCHEZ S. (TLA)	34-11	81	135
038	TZOMPANTEPEC (TLA)	11	81	135
039	XALOZTOC (TLA)	11	81	135
040	XALTOCAN (TLA)	11	81	135
041	PAPALOTLA DE XICHTENCATL (TLA)	34	81	135
042	XICOTZINGO (TLA)	34	81	135
043	YAUHQUEMEHCAN (TLA)	11	81	135
044	ZACATELCO (TLA)	34-11	81	135
045	BENITO JUAREZ (TLA)	11	81	135
046	EMILIANO ZAPATA (TLA)	11	81	135
047	LAZARO CARDENAS (TLA)	11	81	135
048	MAGDALENA TLALTELULCO, LA (TLA)	11	81	135
049	SAN DAMIAN TEXOLOC (TLA)	11	81	135
050	SAN FRANCISCO TETLANOHCAN (TLA)	11	81	135
051	SAN JERONIMO ZACUALPAN (TLA)	11	81	135
052	SAN JOSE TEACALCO (TLA)	11	81	135
053	SAN JUAN HUACTZINGO (TLA)	11	81	135
054	SAN LORENZO AXOCOMANITLA (TLA)	34-11	81	135
055	SAN LUCAS TECOPILCO (TLA)	11	81	135
056	SANTA ANA NOPALUCAN (TLA)	11	81	135
057	SANTA APOLONIA TEACALCO (TLA)	34-11	81	135
058	SANTA CATARINA AYOMETLA (TLA)	34	81	135
059	SANTA CRUZ QUILEHTLA (TLA)	34	81	135
060	SANTA ISABEL XILOXOTLA (TLA)	11	81	135
VERACRUZ				
001	ACAJETE (VER)	11	27-81	135
002	ACATLAN (VER)	11	27	135
003	ACAYUCAN (VER)	34	81	135
004	ACTOPAN (VER)	11	27	45-135
005	ACULA (VER)	34	81	135
006	ACULTZINGO (VER)	34	81	135
007	CAMARON DE TEJEDA (VER)	34-11	81	135
008	ALPATLAHUAC (VER)	34	81	135
009	ALTO LUCERO (VER)	11	27	45-135
010	ALTOTONGA (VER)	11	27	45-135
011	ALVARADO (VER)	34-11	81	135
012	AMATITLAN (VER)	34	81	135
013	AMATLAN TUXPAN (VER)	11	27	45
014	AMATLAN DE LOS REYES (VER)	34	81	135
015	ANGEL R. CABADA (VER)	34	81	135
016	ANTIGUA, LA (VER)	11	27-81	135
017	APAZAPAN (VER)	11	81	135
018	AQUILA (VER)	34	81	135
019	ASTACINGA (VER)	34	81	135
020	ATLAHUILCO (VER)	34	81	135
021	ATOYAC (VER)	34	81	135
022	ATZACAN (VER)	34	81	135
023	ATZALAN (VER)	11	27	45-135
024	TLALTETELA (VER)	11	81	135
025	AYAHUALULCO (VER)	11	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
026	BANDERILLA (VER)	11	27	135
027	BENITO JUAREZ (VER)	11	27	45
028	BOCA DEL RIO (VER)	11	81	135
029	CALCAHUALCO (VER)	34-11	81	135
030	CAMERINO Z. MENDOZA (VER)	34	81	135
031	CARRILLO PUERTO (VER)	34	81	135
032	CATEMACO (VER)	34	81	135
033	CAZONES DE HERRERA (VER)	11	27	45
034	CERRO AZUL (VER)	11	27	45
035	CITLALTEPETL (VER)	11	27	45
036	COACOATZINTLA (VER)	11	27	135
037	COAHUITLAN (VER)	11	27	135
038	COATEPEC (VER)	11	27-81	135
039	COATZACOALCOS (VER)	34-11	81	135
040	COATZINTLA (VER)	11	27	45-135
041	COETZALA (VER)	34	81	135
042	COLIPA (VER)	11	27	45
043	COMAPA (VER)	34-11	81	135
044	CORDOBA (VER)	34	81	135
045	COSAMALOAPAN (VER)	34	81	135
046	COSAUTLAN DE CARVAJAL (VER)	11	81	135
047	COSCOMATEPEC (VER)	34	81	135
048	COSOLEACAQUE (VER)	34	81	135
049	COTAXTLA (VER)	34	81	135
050	COXQUIHUI (VER)	11	27	135
051	COYUTLA (VER)	11	27	135
052	CUICHAPA (VER)	34	81	135
053	CUITLAHUAC (VER)	34	81	135
054	CHACALTIANGUIS (VER)	34	81	135
055	CHALMA (VER)	11	27	45
056	CHICONAMEL (VER)	11	27	45
057	CHICONQUIACO (VER)	11	27	45-135
058	CHICONTEPEC (VER)	11	27	45
059	CHINAMECA (VER)	34	81	135
060	CHINAMPA DE GOROSTIZA (VER)	11	27	45
061	CHOAPAS, LAS (VER)	34	81	135
062	CHOCAMAN (VER)	34	81	135
063	CHONTLA (VER)	11	27	45
064	CHUMATLAN (VER)	11	27	135
065	EMILIANO ZAPATA (VER)	11	27-81	135
066	ESPINAL (VER)	11	27	135
067	FILOMENO MATA (VER)	11	27	135
068	FORTIN (VER)	34	81	135
069	GUTIERREZ ZAMORA (VER)	11	27	45
070	HIDALGOTITLAN (VER)	34	81	135
071	HUATUSCO (VER)	34-11	81	135
072	HUAYACOCOTLA (VER)	11	27	45-135
073	HUEYAPAN DE OCAMPO (VER)	34	81	135
074	HUILOAPAN DE CUAUHTEMOC (VER)	34	81	135
075	IGNACIO DE LA LLAVE (VER)	34	81	135
076	ILAMATLAN (VER)	11	27	45
077	ISLA (VER)	34	81	135
078	IXCATEPEC (VER)	11	27	45
079	IXHUACAN DE LOS REYES (VER)	11	81	135
080	IXHUATLAN DEL CAFE (VER)	34	81	135
081	IXHUATLANCILLO (VER)	34	81	135
082	IXHUATLAN DEL SURESTE (VER)	34	81	135
083	IXHUATLAN DE MADERO (VER)	11	27	45-135
084	IXMATLAHUACAN (VER)	34	81	135
085	IXTACZOQUITLAN (VER)	34	81	135
086	JALACINGO (VER)	11	27-81	135
087	XALAPA (VER)	11	27-81	135
088	JALCOMULCO (VER)	11	81	135
089	JALTIPAN (VER)	34	81	135
090	JAMAPA (VER)	34-11	81	135
091	JESUS CARRANZA (VER)	34	81	135
092	XICO (VER)	11	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
093	JILOTEPEC (VER)	11	27	135
094	JUAN RODRIGUEZ CLARA (VER)	34	81	135
095	JUCHIQUE DE FERRER (VER)	11	27	45
096	LANDERO Y COSS (VER)	11	27	45-135
097	LERDO DE TEJADA (VER)	34	81	135
098	MAGDALENA (VER)	34	81	135
099	MALTRATA (VER)	34	81	135
100	MANLIO FABIO ALTAMIRANO (VER)	34-11	81	135
101	MARIANO ESCOBEDO (VER)	34	81	135
102	MARTINEZ DE LA TORRE (VER)	11	27	45
103	MECATLAN (VER)	11	27	135
104	MECAYAPAN (VER)	34	81	135
105	MEDELLIN (VER)	34-11	81	135
106	MIAHUATLAN (VER)	11	27	135
107	MINAS, LAS (VER)	11	27	135
108	MINATITLAN (VER)	34	81	135
109	MISANTLA (VER)	11	27	45-135
110	MIXTLA DE ALTAMIRANO (VER)	34	81	135
111	MOLOACAN (VER)	34-11	81	135
112	NAOLINCO (VER)	11	27	135
113	NARANJAL (VER)	34	81	135
114	NAUTLA (VER)	11	27	45
115	NOGALES (VER)	34	81	135
116	OLUTA (VER)	34	81	135
117	OMEALCA (VER)	34	81	135
118	ORIZABA (VER)	34	81	135
119	OTATITLAN (VER)	34	81	135
120	OTEAPAN (VER)	34	81	135
121	OZULUAMA (VER)	11	27	45
122	PAJAPAN (VER)	34	81	135
123	PANUCO (VER)	11	27	45
124	PAPANTLA (VER)	11	27	45-135
125	PASO DEL MACHO (VER)	34	81	135
126	PASO DE OVEJAS (VER)	11	27-81	135
127	PERLA, LA (VER)	34	81	135
128	PEROTE (VER)	11	27-81	135
129	PLATON SANCHEZ (VER)	11	27	45
130	PLAYA VICENTE (VER)	34	81	135
131	POZA RICA DE HIDALGO (VER)	11	27	45
132	VIGAS DE RAMIREZ, LAS (VER)	11	27-81	135
133	PUEBLO VIEJO (VER)	11	27	45
134	PUENTE NACIONAL (VER)	11	27-81	135
135	RAFAEL DELGADO (VER)	34	81	135
136	RAFAEL LUCIO (VER)	11	27	135
137	REYES, LOS (VER)	34	81	135
138	RIO BLANCO (VER)	34	81	135
139	SALTABARRANCA (VER)	34	81	135
140	SAN ANDRES TENEJAPAN (VER)	34	81	135
141	SAN ANDRES TUXTLA (VER)	34	81	135
142	SAN JUAN EVANGELISTA (VER)	34	81	135
143	SANTIAGO TUXTLA (VER)	34	81	135
144	SAYULA DE ALEMAN (VER)	34	81	135
145	SOCONUSCO (VER)	34	81	135
146	SOCHIAPA (VER)	11	81	135
147	SOLEDAD ATZOMPA (VER)	34	81	135
148	SOLEDAD DE DOBLADO (VER)	34-11	81	135
149	SOTEAPAN (VER)	34	81	135
150	TAMALIN (VER)	11	27	45
151	TAMIAHUA (VER)	11	27	45
152	TAMPICO ALTO (VER)	11	27	45
153	TANCOCO (VER)	11	27	45
154	TANTIMA (VER)	11	27	45
155	TANTOYUCA (VER)	11	27	45
156	TATATILA (VER)	11	27	135
157	CASTILLO DE TEAYO (VER)	11	27	45
158	TECOLUTLA (VER)	11	27	45
159	TEHUIPANGO (VER)	34	81	135

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
160	TEMAPACHE (VER)	11	27	45
161	TEMPOAL (VER)	11	27	45
162	TENAMPA (VER)	11	81	135
163	TENOCHTITLAN (VER)	11	27	45-135
164	TEOCELO (VER)	11	81	135
165	TEPATLAXCO (VER)	34	81	135
166	TEPETLAN (VER)	11	27	45-135
167	TEPETZINTLA (VER)	11	27	45
168	TEQUILA (VER)	34	81	135
169	JOSE AZUETA (VER)	34	81	135
170	TEXCATEPEC (VER)	11	27	45-135
171	TEXHUACAN (VER)	34	81	135
172	TEXISTEPEC (VER)	34	81	135
173	TEZONAPA (VER)	34	81	135
174	TIERRA BLANCA (VER)	34	81	135
175	TIHUATLAN (VER)	11	27	45
176	TLACOJALPAN (VER)	34	81	135
177	TLACOLULAN (VER)	11	27	135
178	TLACOTALPAN (VER)	34	81	135
179	TLACOTEPEC DE MEJIA (VER)	11	81	135
180	TLACHICHILCO (VER)	11	27	45-135
181	TLALIXCOYAN (VER)	34	81	135
182	TLALNELHUAYOCAN (VER)	11	27-81	135
183	TLAPACOYAN (VER)	11	27	45-135
184	TLAQUILPAN (VER)	34	81	135
185	TLILAPAN (VER)	34	81	135
186	TOMATLAN (VER)	34	81	135
187	TONAYAN (VER)	11	27	135
188	TOTUTLA (VER)	11	81	135
189	TUXPAM (VER)	11	27	45
190	TUXTILLA (VER)	34	81	135
191	URSULO GALVAN (VER)	11	27	45-135
192	VEGA DE ALATORRE (VER)	11	27	45
193	VERACRUZ (VER)	11	81	135
194	VILLA ALDAMA (VER)	11	27	135
195	XOXOCOTLA (VER)	34	81	135
196	YANGA (VER)	34	81	135
197	YECUATLAN (VER)	11	27	45
198	ZACUALPAN (VER)	11	27	135
199	ZARAGOZA (VER)	34	81	135
200	ZENTLA (VER)	34-11	81	135
201	ZONGOLICA (VER)	34	81	135
202	ZONTECOMATLAN (VER)	11	27	45-135
203	ZOZOCOLCO DE HIDALGO (VER)	11	27	135
204	AGUA DULCE (VER)	34-11	81	135
205	HIGO, EL (VER)	11	27	45
206	NANCHITAL DE L. CARDENAS DEL R. (VER)	34	81	135
207	TRES VALLES (VER)	34	81	135
208	CARLOS A. CARRILLO(VER)	34	81	135
209	TATAHUICAPAN DE JUÁREZ(VER)	34	81	135
210	UXPANAPA(VER)	34	81	135
YUCATAN				
001	ABALA (YUC)	11	27	45
002	ACANCEH (YUC)	11	27	45
003	AKIL (YUC)	11	27	45
004	BACA (YUC)	11	27	45
005	BOKOBA (YUC)	11	27	45
006	BUCTZOTZ (YUC)	11	27	45
007	CACALCHEN (YUC)	11	27	45
008	CALOTMUL (YUC)	11	27	45
009	CANSAHCAB (YUC)	11	27	45
010	CANTAMAYEC (YUC)	11	27	45
011	CELESTUN (YUC)	11	27	45
012	CENOTILLO (YUC)	11	27	45
013	CONKAL (YUC)	11	27	45
014	CUNCUNUL (YUC)	11	27	45

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
015	CUZAMA (YUC)	11	27	45
016	CHACSINKIN (YUC)	11	27	45
017	CHANKOM (YUC)	11	27	45
018	CHAPAB (YUC)	11	27	45
019	CHEMAX (YUC)	11	27	45
020	CHICXULUB PUEBLO (YUC)	11	27	45
021	CHICHIMILA (YUC)	11	27	45
022	CHIKINDZONOT (YUC)	11	27	45
023	CHOCHOLA (YUC)	11	27	45
024	CHUMAYEL (YUC)	11	27	45
025	DZAN (YUC)	11	27	45
026	DZEMUL (YUC)	11	27	45
027	DZIDZANTUN (YUC)	11	27	45
028	DZILAM DE BRAVO (YUC)	11	27	45
029	DZILAM GONZALEZ (YUC)	11	27	45
030	DZITAS (YUC)	11	27	45
031	DZONCAUICH (YUC)	11	27	45
032	ESPITA (YUC)	11	27	45
033	HALACHO (YUC)	11	27	45
034	HOCABA (YUC)	11	27	45
035	HOCTUN (YUC)	11	27	45
036	HOMUN (YUC)	11	27	45
037	HUHI (YUC)	11	27	45
038	HUNUCMA (YUC)	11	27	45
039	IXIL (YUC)	11	27	45
040	IZAMAL (YUC)	11	27	45
041	KANASIN (YUC)	11	27	45
042	KANTUNIL (YUC)	11	27	45
043	KAUA (YUC)	11	27	45
044	KINCHIL (YUC)	11	27	45
045	KOPOMA (YUC)	11	27	45
046	MAMA (YUC)	11	27	45
047	MANI (YUC)	11	27	45
048	MAXCANU (YUC)	11	27	45
049	MAYAPAN (YUC)	11	27	45
050	MERIDA (YUC)	11	27	45
051	MOCOCHA (YUC)	11	27	45
052	MOTUL (YUC)	11	27	45
053	MUNA (YUC)	11	27	45
054	MUXUPIP (YUC)	11	27	45
055	OPICHEN (YUC)	11	27	45
056	OXXKUTZCAB (YUC)	11	27	45
057	PANABA (YUC)	11	27	45
058	PETO (YUC)	11	27	45
059	PROGRESO (YUC)	11	27	45
060	QUINTANA ROO (YUC)	11	27	45
061	RIO LAGARTOS (YUC)	11	27	45
062	SACALUM (YUC)	11	27	45
063	SAMAHIL (YUC)	11	27	45
064	SANAHCAT (YUC)	11	27	45
065	SAN FELIPE (YUC)	11	27	45
066	SANTA ELENA (YUC)	11	27	45
067	SEYE (YUC)	11	27	45
068	SINANCHE (YUC)	11	27	45
069	SOTUTA (YUC)	11	27	45
070	SUCILA (YUC)	11	27	45
071	SUDZAL (YUC)	11	27	45
072	SUMA (YUC)	11	27	45
073	TAHDZIU (YUC)	11	27	45
074	TAHMEK (YUC)	11	27	45
075	TEABO (YUC)	11	27	45
076	TECOH (YUC)	11	27	45
077	TEKAL DE VENEGAS (YUC)	11	27	45
078	TEKANTO (YUC)	11	27	45
079	TEKAX (YUC)	11	27	45
080	TEKIT (YUC)	11	27	45
081	TEKOM (YUC)	11	27	45

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
082	TELCHAC PUEBLO (YUC)	11	27	45
083	TELCHAC PUERTO (YUC)	11	27	45
084	TEMAX (YUC)	11	27	45
085	TEMOZON (YUC)	11	27	45
086	TEPAKAN (YUC)	11	27	45
087	TETIZ (YUC)	11	27	45
088	TEYA (YUC)	11	27	45
089	TICUL (YUC)	11	27	45
090	TIMUCUY (YUC)	11	27	45
091	TINUM (YUC)	11	27	45
092	TIXCACALCUPUL (YUC)	11	27	45
093	TIXKOKOB (YUC)	11	27	45
094	TIXMEHUAC (YUC)	11	27	45
095	TIXPEHUAL (YUC)	11	27	45
096	TIZIMIN (YUC)	11	27	45
097	TUNKAS (YUC)	11	27	45
098	TZUCACAB (YUC)	11	27	45
099	UAYMA (YUC)	11	27	45
100	UCU (YUC)	11	27	45
101	UMAN (YUC)	11	27	45
102	VALLADOLID (YUC)	11	27	45
103	XOCHEL (YUC)	11	27	45
104	YAXCABA (YUC)	11	27	45
105	YAXKUKUL (YUC)	11	27	45
106	YOBAIN (YUC)	11	27	45
ZACATECAS				
001	APOZOL (ZAC)	11	27	45
002	APULCO (ZAC)	11	27	45
003	ATOLINGA (ZAC)	11	27	45
004	BENITO JUAREZ (ZAC)	11	27	45
005	CALERA (ZAC)	11	27	45
006	CAÑITAS DE FELIPE PESCADOR (ZAC)	11	27	45
007	CONCEPCION DEL ORO (ZAC)	11	27	45
008	CUAUHTEMOC (ZAC)	11	27	45
009	CHALCHIHUITES (ZAC)	11	27	45
010	FRESNILLO (ZAC)	11	27	45
011	TRINIDAD GARCIA DE LA CADENA (ZAC)	11	27	45
012	GENARO CODINA (ZAC)	11	27	45
013	GENERAL ENRIQUE ESTRADA (ZAC)	11	27	45
014	FRANCISCO R. MURGUIA (ZAC)	11	27	45
015	GENERAL JOAQUIN AMARO (ZAC)	11	27	45
016	GENERAL PANFILO NATERA (ZAC)	11	27	45
017	GUADALUPE (ZAC)	11	27	45
018	HUANUSCO (ZAC)	11	27	45
019	JALPA (ZAC)	11	27	45
020	JEREZ (ZAC)	11	27	45
021	JIMENEZ DEL TEUL (ZAC)	11	27	45
022	JUAN ALDAMA (ZAC)	11	27	45
023	JUCHIPILA (ZAC)	11	27	45
024	LORETO (ZAC)	11	27	45
025	LUIS MOYA (ZAC)	11	27	45
026	MAZAPIL (ZAC)	11	27	45
027	MELCHOR OCAMPO (ZAC)	11	27	45
028	MEZQUITAL DEL ORO (ZAC)	11	27	45
029	MIGUEL AUZA (ZAC)	11	27	45
030	MOMAX (ZAC)	11	27	45
031	MONTE ESCOBEDO (ZAC)	11	27	45
032	MORELOS (ZAC)	11	27	45
033	MOYAHUA DE ESTRADA (ZAC)	11	27	45
034	NOCHISTLAN DE MEJIA (ZAC)	11	27	45
035	NORIA DE ANGELES (ZAC)	11	27	45
036	OJOCALIENTE (ZAC)	11	27	45
037	PANUCO (ZAC)	11	27	45
038	PINOS (ZAC)	11	27	45
039	RIO GRANDE (ZAC)	11	27	45
040	SAIN ALTO (ZAC)	11	27	45

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
041	SALVADOR, EL (ZAC)	11	27	45
042	SOMBRERETE (ZAC)	11	27	45
043	SUSTICACAN (ZAC)	11	27	45
044	TABASCO (ZAC)	11	27	45
045	TEPECHITLAN (ZAC)	11	27	45
046	TEPETONGO (ZAC)	11	27	45
047	TEUL DE GONZALEZ ORTEGA (ZAC)	11	27	45
048	TLALTENANGO DE SANCHEZ ROMAN (ZAC)	11	27	45
049	VALPARAISO (ZAC)	11	27	45
050	VETAGRANDE (ZAC)	11	27	45
051	VILLA DE COS (ZAC)	11	27	45
052	VILLA GARCIA (ZAC)	11	27	45
053	VILLA GONZALEZ ORTEGA (ZAC)	11	27	45
054	VILLA HIDALGO (ZAC)	11	27	45
055	VILLANUEVA (ZAC)	11	27	45
056	ZACATECAS (ZAC)	11	27	45
057	TRANCOSO(ZAC)	11	27	45

ANEXO 2

**PERIODOS DE RETORNO PARA ACELERACIONES DEL TERRENO DE 0.15 g
(ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD) O MAYORES**

<i>Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores</i>								
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)	
AGUASCALIENTES	AGUASCALIENTES	AGUASCALIENTES	-102.3000	21.8789	1870	594092	8350	
	CALVILLO	CALVILLO	-102.7183	21.8461	1640	17980	8303	
	JESUS MARIA	JESUS MARIA	-102.3447	21.9622	1880	29150	8407	
	PABELLON DE ARTEAGA	PABELLON DE ARTEAGA	-102.2747	22.1447	1900	24195	8522	
	RINCON DE ROMOS	RINCON DE ROMOS	-102.3192	22.2300	1940	22570	8592	
	SAN FRANCISCO DE LOS ROMO	SAN FRANCISCO DE LOS ROMO	-102.2711	22.0772	1880	10597	8469	
B. CALIFORNIA N.	ENSENADA	VICENTE GUERRERO	-115.9889	30.7258	30	10942	643	
	ENSENADA	LAZARO CARDENAS	-115.9333	30.5256	20	12134	671	
	ENSENADA	RODOLFO SANCHEZ T. (MANEADERO)	-116.5708	31.7275	50	15234	633	
	ENSENADA	ENSENADA	-116.6108	31.8636	20	223492	621	
	MEXICALI	SAN FELIPE	-114.8353	31.0275	10	13123	97	
	MEXICALI	GUADALUPE VICTORIA (KM. 43)	-115.1019	32.2869	10	15561	39	
	MEXICALI	SANTA ISABEL	-115.5756	32.6314	-3	18041	41	
	MEXICALI	MEXICALI	-115.4678	32.6633	3	549873	38	
	PLAYAS DE ROSARITO	PLAYAS DE ROSARITO	-117.0561	32.3422	10	49178	633	
	TECATE	TECATE	-116.6403	32.5722	540	52394	485	
	TIJUANA	TERRAZAS DEL VALLE	-116.8267	32.4875	200	12946	590	
	TIJUANA	JOYA, LA	-117.0031	32.4456	280	16226	621	
	TIJUANA	TIJUANA	-117.0436	32.5347	20	1148681	617	
	B. CALIFORNIA S.	CABOS, LOS	COLONIA DEL SOL	-109.9208	22.9125	80	10159	2421
CABOS, LOS		SAN JOSE DEL CABO	-109.7081	23.0614	10	31102	845	
CABOS, LOS		CABO SAN LUCAS	-109.9156	22.8897	20	37984	2577	
COMONDU		CIUDAD CONSTITUCION	-111.6703	25.0322	50	35589	642	
LORETO		LORETO	-111.3433	26.0128	20	10010	444	
MULEGE		GUERRERO NEGRO	-114.0561	27.9589	3	10235	1073	
MULEGE		SANTA ROSALIA	-112.2669	27.3389	10	10609	394	
PAZ, LA		PAZ, LA	-110.3108	24.1422	10	162954	609	
CAMPECHE		CALKINI	DZITBALCHE	-90.0556	20.3186	10	10123	10000
		CALKINI	CALKINI	-90.0522	20.3739	15	13180	10000
	CAMPECHE	CAMPECHE	-90.5317	19.8422	10	190813	10000	
	CARMEN	CIUDAD DEL CARMEN	-91.8308	18.6433	2	126024	10000	
	CHAMPOTON	CHAMPOTON	-90.7206	19.3547	10	23035	10000	
	ESCARCEGA	ESCARCEGA	-90.7344	18.6067	85	25911	10000	
CHIAPAS	ACALA	ACALA	-92.8056	16.5561	420	11950	233	
	ARRIAGA	ARRIAGA	-93.8986	16.2339	60	23154	89	
	BERRIOZABAL	BERRIOZABAL	-93.2722	16.7986	400	19328	225	

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	CACAHUATAN	CACAHUATAN	-92.1653	14.9892	480	13288	48
	CHIAPA DE CORZO	CHIAPA DE CORZO	-93.0139	16.7069	420	29341	239
	CINTALAPA	CINTALAPA DE FIGUEROA	-93.7217	16.6950	520	32745	160
	COMITAN DE DOMINGUEZ	COMITAN DE DOMINGUEZ	-92.1342	16.2511	1620	70311	227
	FRONTERA COMALAPA	FRONTERA COMALAPA	-92.1414	15.6583	670	13761	95
	HUIXTLA	HUIXTLA	-92.4658	15.1389	40	26990	49
	MAPASTEPEC	MAPASTEPEC	-92.8917	15.4417	40	14836	56
	MARGARITAS, LAS	MARGARITAS, LAS	-91.9814	16.3153	1520	14946	269
	MOTOZINTLA	MOTOZINTLA DE MENDOZA	-92.2481	15.3642	1260	17613	70
	OCOSINGO	OCOSINGO	-92.0961	16.9072	900	26495	434
	OCOZOCOAUTLA DE ESPINOSA	OCOZOCOAUTLA DE ESPINOSA	-93.3750	16.7625	820	28298	206
	PALENQUE	PALENQUE	-91.9822	17.5092	60	29779	1742
	PICHUCALCO	PICHUCALCO	-93.1183	17.5086	50	13118	640
	PIJIJAPAN	PIJIJAPAN	-93.2092	15.6867	50	13931	59
	REFORMA	REFORMA	-93.1464	17.8639	20	22956	2975
	ROSAS, LAS	ROSAS, LAS	-92.3708	16.3625	1300	15454	235
	SAN CRISTOBAL DE LAS CASAS	SAN CRISTOBAL DE LAS CASAS	-92.6383	16.7367	1940	112442	302
	SUCHIAPA	SUCHIAPA	-93.0917	16.6294	530	12253	215
	SUCHIATE	CIUDAD HIDALGO	-92.1514	14.6792	20	12678	42
	TAPACHULA	TAPACHULA DE CORDOVA Y ORDOÑEZ	-92.2606	14.9081	170	179839	43
	TEOPISCA	TEOPISCA	-92.4736	16.5394	1800	11159	277
	TONALA	TONALA	-93.7550	16.0864	60	31212	77
	TUXTLA GUTIERREZ	TUXTLA GUTIERREZ	-93.1167	16.7528	600	424579	235
	VENUSTIANO CARRANZA	VENUSTIANO CARRANZA	-92.5639	16.3381	780	13906	209
	VILLAFLORES	VILLAFLORES	-93.2667	16.2336	540	31153	123
	YAJALON	YAJALON	-92.3303	17.1706	800	13619	495
CHIHUAHUA	ALDAMA	JUAN ALDAMA	-105.9111	28.8386	1270	15481	8190
	ASCENSION	ASCENSION	-107.9964	31.0928	1300	10846	8034
	CAMARGO	SANTA ROSALIA DE CAMARGO	-105.1725	27.6869	1253	37456	8090
	CHIHUAHUA	CHIHUAHUA	-106.0889	28.6353	1561	657876	8317
	CUAUHTEMOC	CUAUHTEMOC	-106.8667	28.4050	1935	85387	8415
	DELICIAS	DELICIAS	-105.4711	28.1933	1170	98615	8090
	HIDALGO DEL PARRAL	HIDALGO DEL PARRAL	-105.6631	26.9325	1720	98876	8095
	JIMENEZ	JOSE MARIANO JIMENEZ	-104.9233	27.1300	1262	31195	8090

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	JUAREZ	PUERTO DE ANAPRA	-106.5597	31.7775	1260	14354	8034
	JUAREZ	JUAREZ	-106.4869	31.7394	1120	1187275	8032
	MADERA	MADERA	-108.1414	29.1900	2100	14810	8070
	MEOQUI	PEDRO MEOQUI	-105.4822	28.2678	1150	19498	8089
	NUEVO CASAS GRANDES	NUEVO CASAS GRANDES	-107.9125	30.4133	1460	50378	8019
	OJINAGA	MANUEL OJINAGA	-104.4164	29.5644	800	20371	8049
COAHUILA	ACUÑA	CIUDAD ACUÑA	-100.9333	29.3200	280	108159	8285
	ALLENDE	ALLENDE	-100.8536	28.3478	380	18679	8284
	CASTAÑOS	CASTAÑOS	-101.4339	26.7839	750	19794	8651
	FRANCISCO I. MADERO	FRANCISCO I. MADERO	-103.2731	25.7750	1100	26354	8650
	FRONTERA	FRONTERA	-101.4492	26.9264	590	62930	8643
	MATAMOROS	MATAMOROS	-103.2281	25.5278	1120	44053	8641
	MONCLOVA	MONCLOVA	-101.4181	26.9008	620	192554	8641
	MUZQUIZ	PALAU	-101.4233	27.8897	440	16080	8270
	MUZQUIZ	CIUDAD MELCHOR MUZQUIZ	-101.5144	27.8775	490	32094	8300
	NAVA	NAVA	-100.7683	28.4208	320	17730	8290
	PARRAS	PARRAS DE LA FUENTE	-102.1825	25.4403	1530	31032	8634
	PIEDRAS NEGRAS	PIEDRAS NEGRAS	-100.5231	28.7000	230	126386	8296
	RAMOS ARIZPE	RAMOS ARIZPE	-100.9475	25.5394	1400	31322	8640
	SABINAS	SABINAS	-101.1200	27.8483	340	47578	8260
	SALTILLO	SALTILLO	-101.0000	25.4333	1700	562587	8632
	SAN BUENAVENTURA	SAN BUENAVENTURA	-101.5483	27.0597	500	17904	8637
	SAN JUAN DE SABINAS	NUEVA ROSITA	-101.2175	27.9386	370	36974	8295
	SAN PEDRO	SAN PEDRO	-102.9833	25.7589	1100	41642	8661
	TORREON	TORREON	-103.4417	25.5444	1120	502964	8644
	ZARAGOZA	ZARAGOZA	-100.9167	28.4917	360	10061	8278
COLIMA	ARMERIA	CIUDAD DE ARMERIA	-103.9644	18.9342	40	15384	25
	COLIMA	COLIMA	-103.7306	19.2431	500	119639	77
	COQUIMATLAN	COQUIMATLAN	-103.8111	19.1972	320	11852	61
	MANZANILLO	MANZANILLO	-104.3156	19.0517	5	94893	21
	TECOMAN	TECOMAN	-103.8744	18.9083	30	74106	27
	VILLA DE ALVAREZ	CIUDAD DE VILLA DE ALVAREZ	-103.7375	19.2667	530	76679	83
DISTRITO FEDERAL	ALVARO OBREGON	ALVARO OBREGON	-99.2000	19.4000	2320	686807	679
	AZCAPOTZALCO	AZCAPOTZALCO	-99.1833	19.4828	2240	441008	773
	BENITO JUAREZ	BENITO JUAREZ	-99.1583	19.4017	2242	360478	687
	COYOACAN	COYOACAN	-99.1617	19.3500	2243	640423	630
	CUAJIMALPA DE MORELOS	SAN LORENZO ACOPIILCO	-99.3256	19.3289	2940	17138	586

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	CUAJIMALPA DE MORELOS	CUAJIMALPA DE MORELOS	-99.2847	19.3744	2620	132605	640
	CUAUHTEMOC	CUAUHTEMOC	-99.1444	19.4431	2230	516255	735
	GUSTAVO A. MADERO	GUSTAVO A. MADERO	-99.1125	19.4822	2240	1235542	782
	IZTACALCO	IZTACALCO	-99.0978	19.3953	2235	411321	688
	IZTAPALAPA	IZTAPALAPA	-99.0931	19.3583	2247	1773343	646
	MAGDALENA CONTRERAS, LA	MAGDALENA CONTRERAS, LA	-99.2139	19.3333	2350	221645	604
	MIGUEL HIDALGO	MIGUEL HIDALGO	-99.1911	19.4067	2265	352640	688
	MILPA ALTA	SAN SALVADOR CUAUHTENCO	-99.0875	19.1908	2750	10323	485
	MILPA ALTA	SAN PABLO OZTOTEPEC	-99.0725	19.1858	2700	11932	483
	MILPA ALTA	VILLA MILPA ALTA	-99.0231	19.1922	2410	16536	490
	MILPA ALTA	SAN ANTONIO TECOMITL	-98.9881	19.2178	2260	18931	508
	TLAHUAC	SAN ANDRES MIXQUIC	-98.9642	19.2244	2240	11739	515
	TLAHUAC	SAN JUAN IXTAYOPAN	-98.9947	19.2419	2240	19359	524
	TLAHUAC	TLAHUAC	-99.0542	19.3042	2250	257092	586
	TLALPAN	SAN MIGUEL AJUSCO	-99.2050	19.2172	2900	19301	491
	TLALPAN	SAN MIGUEL TOPILEJO	-99.1417	19.2006	2700	21966	487
	TLALPAN	TLALPAN	-99.2250	19.3083	2410	534905	575
	VENUSTIANO CARRANZA	VENUSTIANO CARRANZA	-99.1139	19.4167	2265	462806	710
	XOCHIMILCO	XOCHIMILCO	-99.1389	19.2750	2260	364647	545
DURANGO	CANATLAN	CIUDAD CANATLAN	-104.7783	24.5275	1960	10260	8299
	DURANGO	VICTORIA DE DURANGO (DURANGO)	-104.6697	24.0236	1880	427135	8295
	GOMEZ PALACIO	GOMEZ PALACIO	-103.4983	25.5611	1150	210113	8645
	GUADALUPE VICTORIA	CIUDAD GUADALUPE VICTORIA	-104.1222	24.4461	2000	14156	8374
	LERDO	CIUDAD LERDO	-103.5244	25.5361	1140	58862	8645
	POANAS	VILLA UNION	-104.0444	23.9747	1900	10168	8429
	PUEBLO NUEVO	SALTO, EL	-105.3603	23.7783	2520	19210	8288
	SANTIAGO PAPASQUIARO	SANTIAGO PAPASQUIARO	-105.4192	25.0439	1720	22571	8173
	VICENTE GUERRERO	VICENTE GUERRERO	-103.9878	23.7311	1960	14444	8454
GUANAJUATO	ABASOLO	ABASOLO	-101.5292	20.4500	1710	24532	5359
	ACAMBARO	ACAMBARO	-100.7217	20.0314	1860	55516	2292
	ALLENDE	SAN MIGUEL DE ALLENDE	-100.7442	20.9142	1910	59691	7827
	APASEO EL ALTO	APASEO EL ALTO	-100.6219	20.4544	1850	24300	5534
	APASEO EL GRANDE	APASEO EL GRANDE	-100.6869	20.5458	1770	21506	6222

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	CELAYA	SAN MIGUEL OCTOPAN	-100.7478	20.5736	1760	11452	6416
	CELAYA	SAN JUAN DE LA VEGA	-100.7611	20.6250	1770	13500	6707
	CELAYA	CELAYA	-100.8153	20.5278	1750	277750	6152
	COMONFORT	EMPALME ESCOBEDO (ESCOBEDO)	-100.7500	20.6714	1790	12321	6970
	COMONFORT	COMONFORT	-100.7569	20.7139	1790	21187	7210
	CORTAZAR	CORTAZAR	-100.9614	20.4817	1730	53886	5806
	CUERAMARO	CUERAMARO	-101.6742	20.6247	1720	13241	6468
	DOLORES HIDALGO	DOLORES HIDALGO	-100.9328	21.1550	1920	50391	8174
	GUANAJUATO	MARFIL	-101.2858	20.9964	1920	14480	8024
	GUANAJUATO	GUANAJUATO	-101.2569	21.0167	2000	74874	8054
	IRAPUATO	IRAPUATO	-101.3478	20.6731	1730	319148	6882
	JARAL DEL PROGRESO	JARAL DEL PROGRESO	-101.0667	20.3722	1730	16862	4842
	LEON	CENTRO FAMILIAR LA SOLEDAD	-101.7500	21.1339	1930	18526	8100
	LEON	LEON DE LOS ALDAMA	-101.6808	21.1186	1800	1020818	8090
	MANUEL DOBLADO	CIUDAD MANUEL DOBLADO	-101.9494	20.7272	1720	12558	6972
	MOROLEON	MOROLEON	-101.1903	20.1286	1810	40512	2935
	PENJAMO	SANTA ANA PACUECO	-102.0161	20.3461	1670	10314	4179
	PENJAMO	PENJAMO	-101.7225	20.4300	1770	32035	5093
	PURISIMA DEL RINCON	PURISIMA DE BUSTOS	-101.8794	21.0294	1750	25274	7951
	ROMITA	ROMITA	-101.5169	20.8692	1750	18385	7626
	SALAMANCA	VALTIERRILLA	-101.1278	20.5311	1710	11372	6112
	SALAMANCA	SALAMANCA	-101.1975	20.5692	1720	137000	6314
	SALVATIERRA	SALVATIERRA	-100.8783	20.2139	1760	34066	3553
	SAN FELIPE	SAN FELIPE	-101.2139	21.4797	2080	24935	8257
	SAN FRANCISCO DEL RINCON	SAN FRANCISCO DEL RINCON	-101.8581	21.0172	1750	65183	7944
	SAN JOSE ITURBIDE	SAN JOSE ITURBIDE	-100.3875	20.9978	2100	15868	7612
	SAN LUIS DE LA PAZ	SAN LUIS DE LA PAZ	-100.5167	21.2975	2100	42588	8155
	SANTA CRUZ DE J. ROSAS	JUVENTINO ROSAS	-100.9953	20.6422	1750	35775	6785
	SILAO	SILAO	-101.4269	20.9425	1780	61661	7860
	TARIMORO	TARIMORO	-100.7583	20.2875	1770	12044	4129
	URIANGATO	URIANGATO	-101.1800	20.1378	1800	45691	3000
	VALLE DE SANTIAGO	VALLE DE SANTIAGO	-101.1917	20.3917	1720	58837	4980
	VILLAGRAN	VILLAGRAN	-100.9956	20.5119	1730	22949	6035

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	YURIRIA	YURIRIA	-101.1278	20.2111	1740	22145	3509
GUERRERO	ACAPULCO DE JUAREZ	ACAPULCO DE JUAREZ	-99.8978	16.8711	30	620656	16
	ARCELIA	ARCELIA	-100.2839	18.3150	390	16114	167
	ATOYAC DE ALVAREZ	ATOYAC DE ALVAREZ	-100.4342	17.2089	160	19514	20
	CHILAPA DE ALVAREZ	CHILAPA DE ALVAREZ	-99.1767	17.5986	1400	22511	116
	CHILPANCINGO DE LOS BRAVO	CHILPANCINGO DE LOS BRAVO	-99.5008	17.5514	1250	142746	95
	COYUCA DE BENITEZ	COYUCA DE BENITEZ	-100.0875	17.0072	40	11878	17
	EDUARDO NERI	ZUMPANGO DEL RIO	-99.5264	17.6519	1050	20112	109
	HUITZUCO DE LOS FIGUEROA	CIUDAD DE HUITZUCO	-99.3347	18.3053	940	15446	175
	IGUALA DE LA INDEPENDENCIA	IGUALA DE LA INDEPENDENCIA	-99.5392	18.3436	710	104759	179
	JOSE AZUETA	ZIHUATANEJO	-101.5511	17.6444	20	56853	24
	OMETEPEC	OMETEPEC	-98.4056	16.6831	330	16933	21
	PETATLAN	PETATLAN	-101.2739	17.5372	40	20012	22
	PUNGARABATO	CIUDAD ALTAMIRANO	-100.6681	18.3603	230	23336	165
	SAN MARCOS	SAN MARCOS	-99.3911	16.7944	50	11679	18
	TAXCO DE ALARCON	TAXCO DE ALARCON	-99.6033	18.5564	1750	50488	215
	TECPAN DE GALEANA	TECPAN DE GALEANA	-100.6297	17.2208	40	13924	19
	TEOLOAPAN	TEOLOAPAN	-99.8731	18.3669	1660	20208	180
	TIXTLA DE GUERRERO	TIXTLA DE GUERRERO	-99.3986	17.5656	1340	20099	103
	TLAPA DE COMONFORT	TLAPA DE COMONFORT	-98.5764	17.5461	1100	31235	130
HIDALGO	ACTOPAN	ACTOPAN	-98.9431	20.2678	2000	25398	2882
	APAN	APAN	-98.4500	19.7094	2480	25119	1387
	CUAUTEPEC DE HINOJOSA	CUAUTEPEC DE HINOJOSA	-98.3086	20.0342	2260	15697	2426
	HUEJUTLA DE REYES	HUEJUTLA DE REYES	-98.4200	21.1403	140	34141	6119
	IXMIQUILPAN	IXMIQUILPAN	-99.2192	20.4822	1700	30831	3334
	MINERAL DE LA REFORMA	PACHUCA	-98.7139	20.1000	2400	29797	2437
	MINERAL DEL MONTE	MINERAL DEL MONTE	-98.6717	20.1397	2660	10238	2579
	MIXQUIAHUALA DE JUAREZ	MIXQUIAHUALA	-99.2142	20.2294	2100	21453	2688
	PACHUCA DE SOTO	PACHUCA DE SOTO	-98.7361	20.1225	2000	231602	2501
	PROGRESO DE OBREGON	PROGRESO	-99.1889	20.2431	2100	15701	2740
	SANTIAGO	SANTIAGO	-98.3561	20.0389	2180	14826	2415

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	TULANTEPEC DE LUGO GUERRERO	TULANTEPEC					
	TEPEAPULCO	TEPEAPULCO	-98.5519	19.7844	2520	14171	1546
	TEPEAPULCO	CIUDAD SAHAGUN	-98.5806	19.7717	2450	28231	1498
	TEPEJI DEL RIO DE OCAMPO	TEPEJI DE OCAMPO	-99.3414	19.9039	2150	31221	1644
	TEZONTEPEC DE ALDAMA	TEZONTEPEC DE ALDAMA	-99.2728	20.1925	2000	23903	2553
	TIZAYUCA	TIZAYUCA	-98.9806	19.8408	2270	33182	1563
	TLAXCOAPAN	TLAXCOAPAN	-99.2214	20.0908	2080	12119	2231
	TULA DE ALLENDE	SAN MARCOS	-99.3367	20.0278	2050	10400	1999
	TULA DE ALLENDE	SAN MIGUEL VINDHO	-99.3258	19.9900	2100	10488	1882
	TULA DE ALLENDE	LLANO, EL	-99.3172	20.0567	2060	11191	2099
	TULA DE ALLENDE	TULA DE ALLENDE	-99.3428	20.0539	2030	26881	2085
	TULANCINGO DE BRAVO	TULANCINGO	-98.3794	20.0872	2160	94637	2552
	ZACUALTIPAN DE ANGELES	ZACUALTIPAN	-98.6531	20.6439	1980	16216	3780
	ZIMAPAN	ZIMAPAN	-99.3819	20.7369	1780	11818	3950
JALISCO	ACATIC	ACATIC	-102.9094	20.7792	1680	11005	5605
	AHUALULCO DE MERCADO	AHUALULCO DE MERCADO	-103.9761	20.7003	1340	14042	1096
	AMECA	AMECA	-104.0472	20.5478	1230	34703	740
	ARANDAS	ARANDAS	-102.3439	20.7050	2060	39478	6492
	ATOTONILCO EL ALTO	ATOTONILCO EL ALTO	-102.5083	20.5500	1600	26235	5232
	AUTLAN DE NAVARRO	AUTLAN DE NAVARRO	-104.3694	19.7708	900	39310	76
	AYOTLAN	AYOTLAN	-102.3269	20.5286	1610	10131	5365
	BARCA, LA	BARCA, LA	-102.5497	20.2772	1520	32134	3038
	CASIMIRO CASTILLO	CASIMIRO CASTILLO	-104.4353	19.6022	360	10656	45
	CHAPALA	AJIJIC	-103.2617	20.2994	1540	13031	1700
	CHAPALA	CHAPALA	-103.1892	20.2900	1530	19311	1883
	CIHUATLAN	CIHUATLAN	-104.5619	19.2375	20	15697	21
	COCULA	COCULA	-103.8222	20.3653	1340	13715	789
	COLOTLAN	COLOTLAN	-103.2664	22.1142	1660	12283	8370
	DEGOLLADO	DEGOLLADO	-102.1392	20.4469	1780	10217	4941
	ENCARNACION DE DIAZ	ENCARNACION DE DIAZ	-102.2369	21.5242	1810	20772	8279
	ETZATLAN	ETZATLAN	-104.0806	20.7647	1400	12526	1026
	GRULLO, EL	GRULLO, EL	-104.2169	19.8053	880	19984	120
	GUADALAJARA	GUADALAJARA	-103.3461	20.6764	1550	1646183	3014
	JALOSTOTITLAN	JALOSTOTITLAN	-102.4653	21.1683	1750	21291	7890
	JAMAY	JAMAY	-102.7094	20.2900	1530	15498	2880

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	JOCOTEPEC	JOCOTEPEC	-103.4294	20.2836	1540	15639	1307
	LAGOS DE MORENO	LAGOS DE MORENO	-101.9333	21.3558	1900	79592	8242
	MAGDALENA	MAGDALENA	-103.9797	20.9064	1380	13471	1597
	OCOTLAN	OCOTLAN	-102.7717	20.3508	1530	75942	3151
	PONCITLAN	PONCITLAN	-102.9278	20.3811	1520	12418	2898
	PUERTO VALLARTA	IXTAPA	-105.2044	20.7142	40	17785	59
	PUERTO VALLARTA	PUERTO VALLARTA	-105.2311	20.6133	10	151432	46
	SALTO, EL	QUINCE, EL	-103.2833	20.5414	1520	11286	2581
	SALTO, EL	PINTAS, LAS	-103.3247	20.5761	1540	15681	2572
	SALTO, EL	SALTO, EL	-103.1783	20.5189	1530	18462	2904
	SALTO, EL	PINTITAS, LAS	-103.3058	20.5644	1540	19060	2599
	SAN JUAN DE LOS LAGOS	SAN JUAN DE LOS LAGOS	-102.3308	21.2458	1750	42411	8098
	SAN JULIAN	SAN JULIAN	-102.1794	21.0103	2060	12117	7783
	SAN MIGUEL EL ALTO	SAN MIGUEL EL ALTO	-102.4022	21.0297	1850	21098	7675
	SAYULA	SAYULA	-103.6006	19.8828	1360	24051	462
	TALA	TALA	-103.7011	20.6483	1330	30236	1708
	TAMAZULA DE GORDIANO	TAMAZULA DE GORDIANO	-103.2536	19.6756	1120	17481	453
	TECALITLAN	TECALITLAN	-103.3064	19.4692	1140	12828	260
	TEOCALTICHE	TEOCALTICHE	-102.5739	21.4336	1740	21518	8097
	TEPATITLAN DE MORELOS	CAPILLA DE GUADALUPE	-102.5917	20.8278	2050	11825	6685
	TEPATITLAN DE MORELOS	TEPATITLAN DE MORELOS	-102.7611	20.8167	1800	74262	6310
	TEQUILA	TEQUILA	-103.8367	20.8828	1180	24024	1954
	TIZAPAN EL ALTO	TIZAPAN EL ALTO	-103.0433	20.1583	1550	13669	1667
	TLAJOMULCO DE ZUDIGA	SANTA CRUZ DEL VALLE	-103.3381	20.5467	1530	13908	2423
	TLAJOMULCO DE ZUDIGA	SAN AGUSTIN	-103.4650	20.5467	1590	14355	2039
	TLAJOMULCO DE ZUDIGA	SAN SEBASTIAN EL GRANDE	-103.4269	20.5325	1555	14695	2102
	TLAJOMULCO DE ZUDIGA	TLAJOMULCO DE ZUDIGA	-103.4467	20.4728	1560	16177	1816
	TLAQUEPAQUE	SANTA ANITA	-103.4439	20.5500	1570	12842	2115
	TLAQUEPAQUE	TLAQUEPAQUE	-103.3106	20.6383	1540	458674	2978
	TONALA	TONALA	-103.2411	20.6236	1660	315278	3231
	TOTOTLAN	TOTOTLAN	-102.7931	20.5425	1540	10467	4449
	TUXPAN	TUXPAN	-103.3756	19.5539	1140	25998	286
	VILLA HIDALGO	VILLA HIDALGO	-102.5889	21.6736	1930	11552	8184
	YAHUALICA DE GONZALEZ GALLO	YAHUALICA DE GONZALEZ GALLO	-102.8906	21.1817	1800	14225	7376

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	ZACOALCO DE TORRES	ZACOALCO DE TORRES	-103.5694	20.2278	1350	15648	958
	ZAPOPAN	NUEVO MEXICO	-103.4342	20.7578	1600	26734	3032
	ZAPOPAN	TESISTAN	-103.4794	20.7969	1600	27796	3012
	ZAPOPAN	ZAPOPAN	-103.3919	20.7203	1560	910690	3033
	ZAPOTILTIC	ZAPOTILTIC	-103.4158	19.6247	1300	22092	317
	ZAPOTLAN EL GRANDE	CIUDAD GUZMAN	-103.4625	19.7028	1520	85118	350
	ZAPOTLANEJO	ZAPOTLANEJO	-103.0683	20.6222	1515	27608	4000
MEXICO	ACOLMAN	TEPEXPAN	-98.9144	19.6136	2250	36131	1054
	AMECAMECA	AMECAMECA DE JUAREZ	-98.7628	19.1278	2480	29949	468
	APAXCO	APAXCO DE OCAMPO	-99.1700	19.9733	2190	12703	1878
	ATENCO	SAN SALVADOR ATENCO	-98.9125	19.5583	2240	14518	947
	ATIZAPAN DE ZARAGOZA	CIUDAD LOPEZ MATEOS	-99.2469	19.5611	2280	467544	895
	ATLACOMULCO	ATLACOMULCO DE FABELA	-99.8744	19.7975	2570	19988	1320
	CAPULHUAC	CAPULHUAC DE MIRAFUENTES	-99.4647	19.1917	2630	18434	460
	CHALCO	SAN MATEO HUITZILZINGO	-98.9253	19.2258	2260	10653	520
	CHALCO	SAN MARTIN CUAUTLALPAN	-98.8328	19.2728	2280	10694	572
	CHALCO	CHALCO DE DIAZ COVARRUBIAS	-98.8975	19.2647	2240	125027	556
	CHICOLOAPAN	CHICOLOAPAN DE JUAREZ	-98.9011	19.4153	2250	77101	731
	CHICONCUAC	CHICONCUAC DE JUAREZ	-98.8925	19.5583	2250	17113	950
	CHIMALHUACAN	CHIMALHUACAN	-98.9542	19.4375	2400	482530	750
	COACALCO DE BERRIOZABAL	SAN FRANCISCO COACALCO	-99.0931	19.6333	2440	252291	1062
	COYOTEPEC	COYOTEPEC	-99.2056	19.7756	2300	31623	1326
	CUAUTITLAN	CUAUTITLAN	-99.1792	19.6669	2250	65139	1107
	CUAUTITLAN IZCALLI	HUILANGO	-99.2564	19.6806	2300	13972	1115
	CUAUTITLAN IZCALLI	CUAUTITLAN IZCALLI	-99.2114	19.6461	2260	433830	1061
	ECATEPEC DE MORELOS	ECATEPEC DE MORELOS	-99.0600	19.6097	2250	1621827	1021
	HUIXQUILUCAN	NAUCALPAN DE JUAREZ	-99.2767	19.3969	2620	107951	666
	IXTAPALUCA	SAN FRANCISCO ACUAUTLA	-98.8586	19.3442	2300	19681	652
	IXTAPALUCA	IXTAPALUCA	-98.8822	19.3186	2260	235827	620
	IXTAPAN DE LA SAL	IXTAPAN DE LA SAL	-99.6753	18.8442	1880	15856	294
	IXTLAHUACA	SAN PEDRO LOS BABOS	-99.8336	19.6667	2540	10679	1030

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	JALTENCO	ALBORADA JALTENCO	-99.0689	19.6619	2240	16790	1121
	JILOTEPEC	JILOTEPEC DE MOLINA ENRIQUEZ	-99.5344	19.9542	2450	10459	1746
	JUCHITEPEC	JUCHITEPEC DE MARIANO RIVAPALACIO	-98.8792	19.0997	2560	13360	438
	LERMA	SAN PEDRO TULTEPEC	-99.5081	19.2667	2590	11496	509
	LERMA	SANTA MARIA ATARASQUILLO	-99.4606	19.3264	2650	12180	575
	LERMA	LERMA DE VILLADA	-99.5119	19.2847	2570	16303	528
	MELCHOR OCAMPO	MELCHOR OCAMPO	-99.1392	19.7047	2250	31045	1186
	METEPEC	METEPEC	-99.6047	19.2511	2620	158695	489
	NAUCALPAN DE JUAREZ	NAUCALPAN DE JUAREZ	-99.2378	19.4753	2400	835053	756
	NEXTLALPAN	SANTA ANA NEXTLALPAN	-99.0725	19.7403	2250	11319	1268
	NEZAHUALCOYOTL	CIUDAD NEZAHUALCOYOTL	-98.9889	19.4000	2440	1225083	703
	NICOLAS ROMERO	VILLA NICOLAS ROMERO	-99.3142	19.6250	2400	216192	1002
	OCOYOACAC	OCOYOACAC	-99.4619	19.2722	2580	22145	517
	OTZOLOTEPEC	VILLA CUAUHEMOC	-99.5578	19.4319	2580	16445	681
	OZUMBA	OZUMBA DE ALZATE	-98.7936	19.0392	2340	17906	403
	PAZ, LA	REYES ACAQUILPAN, LOS	-98.9800	19.3606	2330	211298	658
	SAN MARTIN DE LAS PIRAMIDES	SAN MARTIN DE LAS PIRAMIDES	-98.8339	19.7028	2280	11695	1254
	SAN MATEO ATENCO	SAN MATEO ATENCO	-99.5333	19.2703	2570	57440	512
	TECAMAC	TECAMAC DE FELIPE VILLANUEVA	-98.9683	19.7131	2250	13696	1237
	TECAMAC	SANTA MARIA AJOLOAPAN	-98.9639	19.7625	2250	14280	1347
	TECAMAC	REYES ACOZAC, LOS	-98.9817	19.7736	2250	19886	1373
	TECAMAC	SAN MARTIN AZCATEPEC	-98.9728	19.6867	2300	35512	1185
	TECAMAC	OJO DE AGUA	-99.0100	19.6803	2350	74143	1166
	TEJUPILCO	TEJUPILCO DE HIDALGO	-100.1528	18.9058	1330	22494	363
	TEMASCALCINGO	TEMASCALCINGO DE J. MARIA VELASCO	-100.0036	19.9147	2380	11598	1678
	TENANCINGO	TENANCINGO DE DEGOLLADO	-99.5906	18.9608	2020	29800	333
	TENANGO DEL VALLE	TENANGO DE ARISTA	-99.5889	19.1025	2600	18840	404
	TEOLOYUCAN	TEOLOYUCAN	-99.1811	19.7442	2250	49145	1250
	TEOTIHUACAN	TEOTIHUACAN DE ARISTA	-98.8608	19.6897	2270	20252	1219

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	TEPETLIXPA	TEPETLIXPA	-98.8206	19.0258	2300	11969	393
	TEPOTZOTLAN	TEPOTZOTLAN	-99.2236	19.7161	2300	38645	1188
	TEQUIXQUIAC	TEQUIXQUIAC	-99.1447	19.9094	2200	18845	1712
	TEXCOCO	SANTIAGO CUAUTLALPAN	-98.9014	19.4314	2260	10843	751
	TEXCOCO	TULANTONGO	-98.8706	19.5319	2260	12543	903
	TEXCOCO	SAN MIGUEL COATLINCHAN	-98.8722	19.4489	2300	19315	778
	TEXCOCO	TEXCOCO DE MORA	-98.8819	19.5056	2250	101711	850
	TEZOYUCA	TEZOYUCA	-98.9125	19.5914	2300	12133	1011
	TIANGUISTENCO	SANTIAGO TIANGUISTENCO	-99.4683	19.1806	2620	18063	453
	TLALMANALCO	TLALMANALCO DE VELAZQUEZ	-98.8025	19.2044	2400	13434	518
	TLALMANALCO	SAN RAFAEL	-98.7578	19.2089	2600	19704	525
	TLALNEPANTLA DE BAZ	TLALNEPANTLA	-99.1947	19.5367	2250	714735	860
	TOLUCA	SANTIAGO TLACOTEPEC	-99.6711	19.2239	2820	12906	471
	TOLUCA	SAN ANDRES CUEXCONTITLAN	-99.6256	19.3544	2590	14088	597
	TOLUCA	SAN PEDRO TOTOLTEPEC	-99.5722	19.3108	2585	16872	553
	TOLUCA	SAN MATEO OTZACATIPAN	-99.6033	19.3264	2600	16912	568
	TOLUCA	SAN PABLO AUTOPAN	-99.6622	19.3575	2610	27329	598
	TOLUCA	TOLUCA DE LERDO	-99.6539	19.2922	2680	435125	530
	TULTEPEC	SANTIAGO TEYAHUALCO	-99.1239	19.6600	2230	37517	1107
	TULTEPEC	TULTEPEC	-99.1281	19.6850	2250	49824	1152
	TULTITLAN	TULTITLAN DE MARIANO ESCOBEDO	-99.1694	19.6450	2250	21911	1069
	TULTITLAN	FUENTES DEL VALLE	-99.1386	19.6325	2250	56212	1052
	TULTITLAN	SAN PABLO DE LAS SALINAS	-99.0917	19.6656	2250	146560	1125
	TULTITLAN	BUENAVISTA	-99.1694	19.6083	2300	193707	1000
	VALLE DE BRAVO	VALLE DE BRAVO	-100.1306	19.1925	1820	25409	445
	VALLE DE CHALCO SOLIDARIDAD	XICO	-98.9389	19.2917	2220	322784	583
	XALATLACO	XALATLACO	-99.4164	19.1811	2700	12276	455
	XONACATLAN	XONACATLAN	-99.5297	19.4033	2575	17668	652
	ZINACANTEPEC	SAN JUAN DE LAS HUERTAS	-99.7564	19.2453	2860	10718	480
	ZINACANTEPEC	SAN ANTONIO ACAHUALCO	-99.7736	19.2767	2810	12550	508
	ZINACANTEPEC	SAN MIGUEL ZINACANTEPEC	-99.7333	19.2833	2740	42603	517
	ZUMPANGO	SAN JUAN ZITLALTEPEC	-99.1478	19.8092	2250	17117	1434

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	ZUMPANGO	ZUMPANGO DE OCAMPO	-99.0992	19.7969	2250	41084	1411
MICHOACAN	APATZINGAN	APATZINGAN DE LA CONSTITUCION	-102.3508	19.0881	320	93756	281
	ARIO	ARIO DE ROSALES	-101.7078	19.2067	1900	14209	421
	CHERAN	CHERAN	-101.9547	19.6861	2380	12616	968
	COALCOMAN DE VAZQUEZ PALLARES	COALCOMAN DE VAZQUEZ PALLARES	-103.1600	18.7769	1020	10439	55
	COTIJA	COTIJA DE LA PAZ	-102.7047	19.8094	1640	13580	996
	GABRIEL ZAMORA	LOMBARDIA	-102.0508	19.1575	640	11123	509
	HIDALGO	CIUDAD HIDALGO	-100.5533	19.6911	2060	54854	1092
	HUETAMO	HUETAMO DE NUÑEZ	-100.8969	18.6264	300	21335	221
	JACONA	JACONA DE PLANCARTE	-102.3033	19.9564	1580	48197	1583
	JIQUILPAN	JIQUILPAN DE JUAREZ	-102.7172	19.9936	1560	25778	1418
	LAZARO CARDENAS	BUENOS AIRES	-102.2861	18.0200	60	10431	24
	LAZARO CARDENAS	MIRA, LA	-102.3303	18.0356	40	14162	24
	LAZARO CARDENAS	ORILLA, LA	-102.2269	17.9953	10	15761	24
	LAZARO CARDENAS	GUACAMAYAS, LAS	-102.2122	18.0175	20	37671	27
	LAZARO CARDENAS	CIUDAD LAZARO CARDENAS	-102.2097	17.9558	10	73396	24
	MARAVATIO	MARAVATIO DE OCAMPO	-100.4425	19.8928	2020	28218	1694
	MORELIA	MORELOS	-101.2386	19.6483	1940	11379	1005
	MORELIA	MORELIA	-101.1853	19.7017	1920	549996	1106
	MUGICA	NUEVA ITALIA DE RUIZ	-102.0939	19.0244	420	30508	304
	NUEVO PARANGARICUTIRO	NUEVO SAN JUAN PARANGARICUTIRO	-102.1283	19.4161	1880	11983	558
	PARACHO	PARACHO DE VERDUZCO	-102.0475	19.6414	2220	15554	881
	PATZCUARO	PATZCUARO	-101.6094	19.5158	2140	47993	730
	PERIBAN	PERIBAN DE RAMOS	-102.4142	19.5169	1640	11571	605
	PIEDAD, LA	PIEDAD DE CABADAS, LA	-102.0247	20.3386	1640	70703	4108
	PUREPERO	PUREPERO DE ECHAIZ	-102.0069	19.9100	2020	13900	1567
	PURUANDIRO	PURUANDIRO	-101.5156	20.0875	1890	27428	2572
	QUIROGA	QUIROGA	-101.5228	19.6653	2060	13163	1006
	REYES, LOS	REYES DE SALGADO, LOS	-102.4742	19.5894	1300	36095	699
	SAHUAYO	SAHUAYO DE MORELOS	-102.7239	20.0569	1540	57827	1697
	SALVADOR	SANTA CLARA DEL	-101.6383	19.4047	2220	11959	606

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	ESCALANTE	COBRE					
	TACAMBARO	TACAMBARO DE CODALLOS	-101.4567	19.2350	1640	20517	455
	TANGANCICUARO	TANGANCICUARO DE ARISTA	-102.2050	19.8883	1710	14791	1433
	TEPALCATEPEC	TEPALCATEPEC	-102.8444	19.1894	420	14888	235
	URUAPAN	URUAPAN	-102.0614	19.4261	1620	225816	590
	VENUSTIANO CARRANZA	VENUSTIANO CARRANZA	-102.6525	20.1147	1530	11328	2066
	YURECUARO	YURECUARO	-102.2831	20.3369	1530	20297	3859
	ZACAPU	ZACAPU	-101.7906	19.8161	1990	49086	1319
	ZAMORA	ZAMORA DE HIDALGO	-102.2831	19.9850	1580	122881	1680
	ZINAPECUARO	ZINAPECUARO DE FIGUEROA	-100.8269	19.8583	1880	14547	1585
	ZITACUARO	HEROICA ZITACUARO	-100.3586	19.4375	1940	76771	671
MORELOS	AXOCHIAPAN	AXOCHIAPAN	-98.7528	18.5022	1030	16262	207
	AYALA	SAN PEDRO APATLACO	-98.9597	18.7931	1280	11598	290
	CUAUTLA	CUAUTLA	-98.9547	18.8117	1300	136932	297
	CUERNAVACA	CUERNAVACA	-99.2342	18.9186	1510	327162	328
	EMILIANO ZAPATA	TRES DE MAYO	-99.2083	18.8686	1400	15109	311
	EMILIANO ZAPATA	EMILIANO ZAPATA	-99.1842	18.8394	1250	31897	302
	JIUTEPEC	PROGRESO	-99.1533	18.8800	1350	12722	318
	JIUTEPEC	JIUTEPEC	-99.1758	18.8817	1350	142459	317
	JOJUTLA	JOJUTLA	-99.1803	18.6147	890	20398	234
	PUENTE DE IXTLA	XOXOCOTLA	-99.2439	18.6850	1030	18318	251
	PUENTE DE IXTLA	PUENTE DE IXTLA	-99.3197	18.6167	900	20129	232
	TEMIXCO	TEMIXCO	-99.2272	18.8544	1290	85914	306
	TEPALCINGO	TEPALCINGO	-98.8436	18.5964	1160	10965	232
	TEPOZTLAN	TEPOZTLAN	-99.0997	18.9853	1710	14776	357
	TLALTIZAPAN	SANTA ROSA TREINTA	-99.1789	18.6983	990	15692	256
	TLAQUILTENANGO	TLAQUILTENANGO	-99.1603	18.6289	920	17639	238
	XOCHITEPEC	XOCHITEPEC	-99.2297	18.7817	1110	15521	280
	YAUTEPEC	JOYA, LA	-99.1222	18.8842	1500	12180	321
	YAUTEPEC	YAUTEPEC DE ZARAGOZA	-99.0631	18.8836	1210	38380	322
	YECAPIXTLA	JUAN MORALES	-98.9219	18.8114	1340	11219	298
	YECAPIXTLA	YECAPIXTLA	-98.8519	18.8811	1500	13358	327
	ZACATEPEC DE HIDALGO	ZACATEPEC DE HIDALGO	-99.1911	18.6564	930	21900	245
NAYARIT	ACAPONETA	ACAPONETA	-105.3606	22.4922	30	18145	7633
	COMPOSTELA	VARAS, LAS	-105.1367	21.1781	20	12547	271
	COMPOSTELA	COMPOSTELA	-104.9006	21.2369	860	15797	491
	IXTLAN DEL RIO	IXTLAN DEL RIO	-104.3675	21.0339	1140	21157	951

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	RUIZ	RUIZ	-105.1453	21.9500	20	12457	3606
	SANTIAGO IXCUINTLA	VILLA HIDALGO (EL NUEVO)	-105.2308	21.7433	30	10826	1723
	SANTIAGO IXCUINTLA	SANTIAGO IXCUINTLA	-105.2064	21.8111	40	17950	2308
	TECUALA	TECUALA	-105.4569	22.3969	15	14584	7086
	TEPIC	TEPIC	-104.8939	21.5161	915	265817	1205
	TUXPAN	TUXPAN	-105.2992	21.9433	10	22248	3349
	XALISCO	XALISCO	-104.9014	21.4439	915	23716	949
NUEVO LEON	ALLENDE	CIUDAD DE ALLENDE	-100.0200	25.2833	460	21023	8657
	ANAHUAC	ANAHUAC	-100.1319	27.2403	155	15976	8650
	APODACA	CIUDAD APODACA	-100.1886	25.7814	430	270369	8650
	CADEREYTA JIMENEZ	CADEREYTA JIMENEZ	-100.0011	25.5903	330	55468	8656
	CIENEGA DE FLORES	CIENEGA DE FLORES	-100.1667	25.9531	400	10261	8643
	GARCIA	GARCIA	-100.5989	25.8119	700	25059	8650
	GENERAL ESCOBEDO	CIUDAD GENERAL ESCOBEDO	-100.3267	25.8083	510	230556	8619
	GUADALUPE	CIUDAD GUADALUPE	-100.2347	25.6789	480	669842	8620
	HIDALGO	HIDALGO	-100.4506	25.9753	540	14159	8647
	JUAREZ	COAHUILA	-100.1361	25.6639	420	10467	8645
	JUAREZ	ARBOLEDAS DE SAN ROQUE	-100.1542	25.6103	430	10567	8641
	JUAREZ	JARDINES DE LA SILLA (JARDINES)	-100.1875	25.6292	500	10600	8626
	JUAREZ	CIUDAD BENITO JUAREZ	-100.0944	25.6472	370	13230	8484
	LINARES	LINARES	-99.5667	24.8597	350	53681	8627
	MONTEMORELOS	MONTEMORELOS	-99.8264	25.1869	430	37713	8646
	MONTERREY	CIUDAD MONTERREY	-100.3083	25.6711	530	1110909	8638
	SABINAS HIDALGO	CIUDAD SABINAS HIDALGO	-100.1842	26.5028	300	30910	8662
	SAN NICOLAS DE LOS GARZA	CIUDAD SAN NICOLAS DE LOS GARZA	-100.3019	25.7414	500	496878	8661
	SAN PEDRO GARZA GARCIA	SAN PEDRO GARZA GARCIA	-100.4014	25.6639	640	125945	8662
	SANTA CATARINA	CIUDAD SANTA CATARINA	-100.4619	25.6753	680	225976	8665
	SANTIAGO	SANTIAGO	-100.1522	25.4267	500	33344	8659
OAXACA	CIUDAD IXTEPEC	CIUDAD IXTEPEC	-95.1000	16.5628	160	22261	87
	CUILAPAM DE GUERRERO	CUILAPAM DE GUERRERO	-96.7806	16.9958	1560	10227	114
	HUAJUAPAN DE LEON	HUAJUAPAN DE LEON	-97.7761	17.8047	1600	43073	154
	HEROICA CIUDAD DE TLAXIACO	HEROICA CIUDAD DE TLAXIACO	-97.6792	17.2694	2040	13856	126

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	JUCHITAN DE ZARAGOZA	JUCHITAN DE ZARAGOZA	-95.0194	16.4333	30	64642	72
	LOMA BONITA	LOMA BONITA	-95.8806	18.1069	25	30692	221
	MATIAS ROMERO	MATIAS ROMERO	-95.0417	16.8722	180	19979	120
	MIAHUATLAN DE PORFIRIO DIAZ	MIAHUATLAN DE PORFIRIO DIAZ	-96.5931	16.3278	1550	16724	25
	OAXACA DE JUAREZ	OAXACA DE JUAREZ	-96.7200	17.0678	1555	251846	122
	OCOTLAN DE MORELOS	OCOTLAN DE MORELOS	-96.6753	16.7917	1500	12583	83
	SALINA CRUZ	SALINA CRUZ	-95.1958	16.1825	22	72218	38
	SAN ANTONIO DE LA CAL	SAN ANTONIO DE LA CAL	-96.7006	17.0283	1540	14866	119
	SAN BLAS ATEMPA	SAN BLAS ATEMPA	-95.2256	16.3264	40	11305	54
	SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC	SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC	-96.1239	18.0861	20	84199	206
	SAN PEDRO MIXTEPEC DISTR. 22	PUERTO ESCONDIDO	-97.0667	15.8625	40	18484	11
	SAN PEDRO POCHUTLA	SAN PEDRO POCHUTLA	-96.4653	15.7444	150	12404	11
	SAN SEBASTIAN TUTLA	FRACCIONAMIENTO EL ROSARIO	-96.6917	17.0444	1540	11642	121
	SANTA CRUZ XOXOCOTLAN	SANTA CRUZ XOXOCOTLAN	-96.7333	17.0264	1530	46494	118
	SANTA LUCIA DEL CAMINO	SANTA LUCIA DEL CAMINO	-96.6933	17.0625	1540	40549	122
	SANTA MARIA ATZOMPA	SANTA MARIA ATZOMPA	-96.7778	17.1014	1580	13433	125
	SANTA MARIA HUATULCO	CRUCECITA	-96.1350	15.7689	15	12585	11
	SANTIAGO PINOTEPA NACIONAL	SANTIAGO PINOTEPA NACIONAL	-98.0522	16.3417	205	24347	13
	SANTO DOMINGO TEHUANTEPEC	SANTO DOMINGO TEHUANTEPEC	-95.2389	16.3244	55	37068	54
	TLACOLULA DE MATAMOROS	TLACOLULA DE MATAMOROS	-96.4758	16.9536	1600	11087	115
	UNION HIDALGO	UNION HIDALGO	-94.8297	16.4750	20	12080	80
	VILLA DE TUTUTEPEC	RIO GRANDE	-97.4333	16.0111	30	12214	11
	VILLA DE ZAACHILA	VILLA DE ZAACHILA	-96.7500	16.9500	1490	11610	107
PUEBLA	ACAJETE	ACAJETE	-97.9511	19.1033	2420	16608	420
	ACATLAN	ACATLAN DE OSORIO	-98.0483	18.2014	1180	14976	512
	ACATZINGO	ACATZINGO DE HIDALGO	-97.7819	18.9797	2140	20577	442
	AJALPAN	AJALPAN	-97.2592	18.3764	1210	22261	680
	ALTEPEXI	ALTEPEXI	-97.2983	18.3656	1240	15247	177
	AMOZOC	CASA BLANCA	-98.1167	19.0444	2230	13733	645
	AMOZOC	AMOZOC DE MOTA	-98.0447	19.0442	2320	47528	195

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	ATLIXCO	ATLIXCO	-98.4375	18.9069	1840	82838	253
	CHALCHICOMULA DE SESMA	CIUDAD SERDAN	-97.4464	18.9869	2530	20340	211
	CHIAUTLA	CHIAUTLA DE TAPIA	-98.6036	18.2981	980	10581	1276
	CHIETLA	ATENCINGO	-98.6053	18.5114	1100	11867	518
	CHIGNAHUAPAN	CIUDAD DE CHIGNAHUAPAN	-98.0306	19.8378	2300	14834	568
	CORONANGO	SANTA MARIA CORONANGO	-98.3067	19.1303	2180	12467	569
	CUAUTLANCINGO	SAN JUAN CUAUTLANCINGO	-98.2722	19.0878	2140	16297	200
	CUAUTLANCINGO	SANCTORUM	-98.2539	19.0972	2140	21083	471
	HUAUCHINANGO	HUAUCHINANGO	-98.0525	20.1747	1520	46671	517
	HUEJOTZINGO	SANTA ANA XALMIMILULCO	-98.3781	19.2050	2220	13001	627
	HUEJOTZINGO	HUEJOTZINGO	-98.4061	19.1600	2260	20005	425
	IZUCAR DE MATAMOROS	IZUCAR DE MATAMOROS	-98.4650	18.6008	1280	39693	1941
	LIBRES	CIUDAD DE LIBRES	-97.6861	19.4631	2380	12249	170
	NEALTICAN	SAN BUENAVENTURA NEALTICAN	-98.4286	19.0497	2220	10423	206
	PUEBLA	SANTA MARIA XONACATEPEC	-98.1033	19.0875	2330	10149	476
	PUEBLA	SAN MIGUEL CANOA	-98.1028	19.1500	2600	12896	429
	PUEBLA	HEROICA PUEBLA DE ZARAGOZA	-98.1972	19.0433	2135	1271673	488
	QUECHOLAC	PALMARITO TOCHAPAN	-97.6353	18.9014	2170	14422	541
	RAFAEL LARA GRAJALES	CIUDAD DE RAFAEL LARA GRAJALES	-97.8050	19.2233	2380	10517	439
	REYES DE JUAREZ, LOS	REYES DE JUAREZ, LOS	-97.8125	18.9439	2100	15757	528
	SAN ANDRES CHOLULA	TLAXCALANCINGO	-98.2750	19.0289	2140	18718	499
	SAN ANDRES CHOLULA	SAN ANDRES CHOLULA	-98.2994	19.0492	2130	29251	453
	SAN GABRIEL CHILAC	SAN GABRIEL CHILAC	-97.3517	18.3206	1220	11121	499
	SAN MARTIN TEXMELUCAN	SAN RAFAEL TLANALAPAN	-98.4678	19.2897	2300	10839	210
	SAN MARTIN TEXMELUCAN	SANTA MARIA MOYOTZINGO	-98.4044	19.2433	2320	22571	597
	SAN MARTIN TEXMELUCAN	SAN MARTIN TEXMELUCAN	-98.4333	19.2833	2360	70713	433
	SAN PEDRO CHOLULA	SANTIAGO MOMOXPAN	-98.2667	19.0717	2160	15328	403
	SAN PEDRO CHOLULA	CHOLULA DE RIVADABIA	-98.3061	19.0614	2220	70715	2278
	SAN SALVADOR EL SECO	SAN SALVADOR EL SECO	-97.6403	19.1342	2400	14037	452
	SAN SALVADOR	SAN SALVADOR	-97.7706	18.9200	2020	10069	3221

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	HUIXCOLOTLA	HUIXCOLOTLA					
	SANTIAGO MIAHUATLAN	SANTIAGO MIAHUATLAN	-97.4417	18.5525	1780	11329	241
	TECAMACHALCO	TECAMACHALCO	-97.7275	18.8833	2020	24108	2934
	TEHUACAN	TEHUACAN	-97.3928	18.4619	1620	204598	478
	TEPATLAXCO DE HIDALGO	TEPATLAXCO DE HIDALGO	-97.9706	19.0789	2380	13865	2220
	TEPEACA	TEPEACA	-97.9022	18.9661	2240	22940	642
	TEZIUTLAN	TEZIUTLAN	-97.3603	19.8169	1920	56029	461
	XICOTEPEC	XICOTEPEC DE JUAREZ	-97.9547	20.2722	1150	35385	360
	ZACATLAN	ZACATLAN	-97.9603	19.9314	2020	28773	224
	ZINACATEPEC	SAN SEBASTIAN ZINACATEPEC	-97.2447	18.3328	1120	13628	463
QUINTANA ROO	BENITO JUAREZ	CANCUN	-86.8336	21.1611	8	397191	10000
	COZUMEL	COZUMEL	-86.9417	20.5167	5	59225	10000
	FELIPE CARRILLO PUERTO	FELIPE CARRILLO PUERTO	-88.0453	19.5786	30	18545	10000
	ISLA MUJERES	ISLA MUJERES	-86.7517	21.2581	5	10024	10000
	OTHON P. BLANCO	CHETUMAL	-88.3053	18.5036	10	121602	10000
	SOLIDARIDAD	PLAYA DEL CARMEN	-87.0767	20.6239	15	43613	10000
QUERETARO	CADEREYTA DE MONTES	CADEREYTA	-99.8133	20.6933	2040	10317	4359
	CORREGIDORA	PUEBLITO, EL	-100.4425	20.5369	1820	38667	5931
	EZEQUIEL MONTES	EZEQUIEL MONTES	-99.8936	20.6639	1970	11140	4535
	QUERETARO	SANTA ROSA JAUREGUI	-100.4492	20.7403	1950	15301	7025
	QUERETARO	SANTIAGO DE QUERETARO	-100.3928	20.5875	1820	536463	6078
	SAN JUAN DEL RIO	SAN JUAN DEL RIO	-99.9939	20.3878	1920	99483	3732
	TEQUISQUIAPAN	TEQUISQUIAPAN	-99.8958	20.5206	1880	25929	4059
SINALOA	AHOME	AHOME	-109.1714	25.9183	10	10377	2685
	AHOME	MOCHIS, LOS	-108.9922	25.7933	10	200906	3109
	CULIACAN	ELDORADO	-107.3678	24.3236	10	13575	6751
	CULIACAN	COSTA RICA	-107.3892	24.5908	20	21661	7738
	CULIACAN	CULIACAN ROSALES	-107.3844	24.7992	60	540823	8094
	ELOTA	CRUZ, LA	-106.8919	23.9186	20	11428	7548
	ESCUINAPA	ESCUINAPA	-105.7783	22.8339	20	27914	8199
	FUERTE, EL	FUERTE, EL	-108.6172	26.4161	80	10728	8276
	GUASAVE	ADOLFO RUIZ CORTINES	-108.7178	25.7044	20	12433	5331
	GUASAVE	JUAN JOSE RIOS	-108.8211	25.7572	10	23472	4780
	GUASAVE	GABRIEL LEYVA SOLANO (B. JUAREZ)	-108.6300	25.6617	20	26266	5574
	GUASAVE	GUASAVE	-108.4706	25.5744	50	62801	6617
	MAZATLAN	VILLA UNION	-106.2147	23.1897	20	13140	8180

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	MAZATLAN	MAZATLAN	-106.4153	23.2361	10	327989	7759
	NAVOLATO	LIC. BENITO JUAREZ (CAMPO GOBIERNO)	-107.5403	24.6586	10	20152	7166
	NAVOLATO	NAVOLATO	-107.7011	24.7647	10	26095	7021
	ROSARIO	ROSARIO, EL	-105.8569	22.9903	20	13998	8256
	SALVADOR ALVARADO	GUAMUCHIL	-108.0794	25.4639	50	57547	7845
SAN LUIS POTOSI	CARDENAS	CARDENAS	-99.6439	21.9967	1220	14738	8353
	CERRITOS	CERRITOS	-100.2817	22.4328	1150	12932	8635
	CHARCAS	CHARCAS	-101.1156	23.1300	2010	10925	8651
	CHARCAS	GARABATILLO	-101.1944	23.0753	2300	116	8649
	CIUDAD VALLES	PED)O MONDRAGON	-98.9814	22.0728	240	X	8287
	CIUDAD FERNANDEZ	CIUDAD FERNANDEZ	-100.0108	21.9422	980	27066	8372
	CIUDAD VALLES	CIUDAD VALLES	-99.0097	21.9819	70	105721	8286
	EBANO	EBANO	-98.3753	22.2139	50	22133	8301
	MATEHUALA	MATEHUALA	-100.6436	23.6456	1570	64206	8651
	RIOVERDE	RIOVERDE	-99.9967	21.9319	980	46691	8367
	SALINAS	SALINAS DE HIDALGO	-101.7144	22.6275	2070	13432	8626
	SAN LUIS POTOSI	SAN LUIS POTOSI	-100.9761	22.1511	1860	629208	8535
	SANTA MARIA DEL RIO	SANTA MARIA DEL RIO	-100.7361	21.7975	1710	11629	8351
	SOLEDAD DE GRACIANO SANCHEZ	SOLEDAD DE GRACIANO SANCHEZ	-100.9369	22.1869	1850	169574	8568
	TAMAZUNCHALE	TAMAZUNCHALE	-98.7917	21.2611	140	20699	6925
	TAMUIN	TAMUIN	-98.7789	22.0033	20	14177	8299
SONORA	AGUA PRIETA	AGUA PRIETA	-109.5489	31.3258	1210	60420	8018
	BENITO JUAREZ	VILLA JUAREZ	-109.8417	27.1289	10	13841	6524
	CABORCA	HEROICA CABORCA	-112.1592	30.7156	280	49917	7488
	CAJEME	PUEBLO YAQUI	-110.0356	27.3542	20	13956	6389
	CAJEME	ESPERANZA	-109.9283	27.5814	40	32415	7965
	CAJEME	CIUDAD OBREGON	-109.9350	27.4892	40	250790	7748
	CANANEA	CANANEA	-110.3006	30.9819	1600	30515	7890
	EMPALME	EMPALME	-110.8142	27.9617	10	38533	3793
	GUAYMAS	HEROICA GUAYMAS	-110.8989	27.9183	10	97593	2540
	HERMOSILLO	MIGUEL ALEMAN (LA DOCE)	-111.4775	28.8403	70	22505	3270
	HERMOSILLO	HERMOSILLO	-110.9542	29.0989	210	545928	7682
	HUATABAMPO	HUATABAMPO	-109.6422	26.8275	10	29789	5537
	MAGDALENA	MAGDALENA DE KINO	-110.9675	30.6269	760	22023	7886
	NACCOZARI DE GARCIA	NACCOZARI DE GARCIA	-109.6856	30.3742	1100	11193	8016
	NAVOJOA	NAVOJOA	-109.4453	27.0808	50	98187	8058
	NOGALES	HEROICA NOGALES	-110.9458	31.3186	1200	156854	7894

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	PUERTO PEDASCO	PUERTO PEDASCO	-113.5369	31.3167	10	30466	527
	SAN LUIS RIO COLORADO	SAN LUIS RIO COLORADO	-114.7625	32.4767	40	126645	78
TABASCO	BALANCAN	BALANCAN	-91.5356	17.8069	30	11024	10000
	CARDENAS	CARDENAS	-93.3756	18.0000	10	78637	2674
	CENTLA	FRONTERA	-92.6464	18.5344	10	20965	10000
	CENTRO	PARRILLA 1 RA. SECCION	-92.9172	17.9125	20	11400	4378
	CENTRO	OCUILTZAPOTLAN	-92.8617	18.1350	10	15824	9039
	CENTRO	VILLAHERMOSA	-92.9281	17.9906	20	330846	5773
	COMALCALCO	COMALCALCO	-93.2250	18.2711	10	37991	7285
	CUNDUACAN	CUNDUACAN	-93.1750	18.0667	10	16593	5140
	EMILIANO ZAPATA	EMILIANO ZAPATA	-91.7633	17.7408	10	17246	9524
	HUIMANGUILLO	HUIMANGUILLO	-93.3917	17.8292	20	24654	1397
	JALPA DE MENDEZ	JALPA DE MENDEZ	-93.0622	18.1756	10	14198	8079
	MACUSPANA	BENITO JUAREZ (SAN CARLOS)	-92.5289	17.8317	20	12098	5847
	MACUSPANA	MACUSPANA	-92.5978	17.7594	10	28183	3824
	PARAISO	PARAISO	-93.2122	18.3956	10	22085	8724
	TEAPA	TEAPA	-92.9528	17.5481	40	24403	963
	TENOSIQUE	TENOSIQUE DE PINO SUAREZ	-91.4264	17.4708	20	30042	2147
TAMAULIPAS	ALDAMA	ALDAMA	-98.0736	22.9194	130	11371	8309
	ALTAMIRA	ALTAMIRA	-97.9369	22.3958	10	41713	8282
	ALTAMIRA	MIRAMAR	-97.8694	22.3375	10	58104	8280
	CIUDAD MADERO	CIUDAD MADERO	-97.8314	22.2764	10	182325	8278
	GONZALEZ	GONZALEZ	-98.4306	22.8281	80	10266	8302
	GONZALEZ	URSULO GALVAN (ESTACION MANUEL)	-98.3197	22.7278	70	11253	8305
	GUSTAVO DIAZ ORDAZ	CIUDAD GUSTAVO DIAZ ORDAZ	-98.5969	26.2322	40	11746	8272
	MANTE, EL	CIUDAD MANTE	-98.9714	22.7433	80	80533	8278
	MATAMOROS	HEROICA MATAMOROS	-97.5042	25.8797	73	376279	8270
	MIGUEL ALEMAN	CIUDAD MIGUEL ALEMAN	-99.0300	26.3981	50	18368	8273
	NUEVO LAREDO	NUEVO LAREDO	-99.5081	27.4864	188	308828	8244
	REYNOSA	REYNOSA	-98.2778	26.0922	40	403718	8281
	RIO BRAVO	CIUDAD RIO BRAVO	-98.0903	25.9817	20	80140	8285
	SAN FERNANDO	SAN FERNANDO	-98.1583	24.8475	40	27053	8301
	TAMPICO	TAMPICO	-97.8686	22.2553	10	295442	8277
	VALLE HERMOSO	VALLE HERMOSO	-97.8144	25.6736	10	43018	8275
	VICTORIA	CIUDAD VICTORIA	-99.1461	23.7361	320	249029	8310
TLAXCALA	APIZACO	APIZACO	-98.1400	19.4156	2400	48049	1166
	CALPULALPAN	CALPULALPAN	-98.5692	19.5878	2580	27451	1094

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	CARMEN TEQUEXQUITLA, EL	TEQUIXQUITLA	-97.6558	19.3244	2380	11566	1075
	CHIAUTEMPAN	CHIAUTEMPAN	-98.1925	19.3139	2280	44561	875
	CONTLA DE JUAN CUAMATZI	CONTLA	-98.1678	19.3333	2320	22646	970
	HUAMANTLA	HUAMANTLA	-97.9233	19.3114	2500	40854	926
	MAGDALENA TLALTELULCO, LA	MAGDALENA TLALTELULCO, LA	-98.1939	19.2758	2320	13697	735
	NANACAMILPA DE M. ARISTA	CIUDAD DE NANACAMILPA	-98.5353	19.4925	2720	10768	903
	PAPALOTLA DE XICOHTENCATL	PAPALOTLA	-98.2039	19.1686	2240	19135	566
	SAN PABLO DEL MONTE	VILLA VICENTE GUERRERO	-98.1700	19.1189	2300	47804	531
	TENANCINGO	TENANCINGO	-98.2011	19.1469	2260	10102	549
	TEOLOCHOLCO	TEOLOCHOLCO	-98.1908	19.2433	2320	14462	631
	TETLA DE LA SOLIDARIDAD	TETLA	-98.1033	19.4406	2440	11490	1302
	TLAXCALA	TLAXCALA DE XICOHTENCATL	-98.2386	19.3167	2240	73213	752
	TLAXCO	TLAXCO	-98.1186	19.6139	2600	11571	1348
	XALOZTOC	XALOZTOC	-98.0486	19.4036	2500	16098	1273
	XICOHTZINCO	XICOHTZINCO	-98.2333	19.1739	2200	10226	566
	ZACATELCO	ZACATELCO	-98.2397	19.2158	2200	31700	599
VERACRUZ	ACAYUCAN	ACAYUCAN	-94.9133	17.9483	100	47826	289
	AGUA DULCE	AGUA DULCE	-94.1472	18.1369	20	37901	1162
	ALTOTONGA	ALTOTONGA	-97.2439	19.7631	1890	15464	2111
	ALVARADO	ALVARADO	-95.7606	18.7703	10	22608	817
	ANGEL R. CABADA	ANGEL R. CABADA	-95.4458	18.5944	10	10830	730
	ANTIGUA, LA	JOSE CARDEL	-96.3764	19.3694	20	17686	1660
	ATOYAC	GRAL. M. ALEMAN (POTRERO NUEVO)	-96.8000	18.8906	520	13880	552
	BANDERILLA	BANDERILLA	-96.9461	19.5903	1560	15422	1796
	BOCA DEL RIO	BOCA DEL RIO	-96.1072	19.1008	10	10863	1273
	BOCA DEL RIO	VERACRUZ	-96.1222	19.1417	10	123891	1363
	CAMERINO Z. MENDOZA	CIUDAD MENDOZA	-97.1808	18.8033	1340	34955	411
	CARLOS A. CARRILLO	CARLOS A. CARRILLO	-95.7447	18.3739	5	17608	356
	CATEMACO	CATEMACO	-95.1136	18.4194	340	23631	682
	CERRO AZUL	CERRO AZUL	-97.7389	21.1903	140	21512	6514
	CHOAPAS, LAS	CHOAPAS, LAS	-94.0928	17.9100	10	41426	652
	COATEPEC	COATEPEC	-96.9581	19.4569	1200	45339	1410
	COATZACOALCOS	ALLENDE	-94.4050	18.1500	10	20944	732
	COATZACOALCOS	COATZACOALCOS	-94.4353	18.1378	50	225973	694
	COATZINTLA	COATZINTLA	-97.4600	20.4814	120	26003	3643

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	CORDOBA	CORDOBA	-96.9317	18.8911	850	133807	517
	COSAMALOAPAN DE CARPIO	COSAMALOAPAN	-95.7953	18.3650	5	28496	334
	COSCOMATEPEC	COSCOMATEPEC DE BRAVO	-97.0461	19.0717	1520	12646	683
	COSOLEACAQUE	COSOLEACAQUE	-94.6369	17.9953	40	20249	383
	COSOLEACAQUE	MINATITLAN	-94.5764	18.0086	40	39703	419
	CUITLAHUAC	CUITLAHUAC	-96.7200	18.8114	380	12069	503
	FORTIN	FORTIN DE LAS FLORES	-96.9978	18.8969	1000	20229	510
	GUTIERREZ ZAMORA	GUTIERREZ ZAMORA	-97.0839	20.4492	20	14422	3828
	HUATUSCO	HUATUSCO DE CHICUELLAR	-96.9603	19.1497	1300	26848	814
	ISLA	ISLA	-95.5283	18.0275	60	24036	235
	IXTACZOQUITLAN	IXTACZOQUITLAN	-97.0633	18.8503	1130	23022	464
	JALTIPAN	JALTIPAN DE MORELOS	-94.7164	17.9639	60	30474	342
	JUAN RODRIGUEZ CLARA	JUAN RODRIGUEZ CLARA	-95.4033	17.9919	130	12070	237
	LERDO DE TEJADA	LERDO DE TEJADA	-95.5203	18.6281	10	18539	745
	MALTRATA	MALTRATA	-97.2772	18.8114	1720	10273	399
	MARIANO ESCOBEDO	PALMIRA	-97.1078	18.8842	1300	12261	486
	MARTINEZ DE LA TORRE	INDEPENDENCIA	-97.0528	20.0578	80	15940	3108
	MARTINEZ DE LA TORRE	MARTINEZ DE LA TORRE	-97.0542	20.0606	80	49565	3113
	MEDELLIN	TEJAR, EL	-96.1614	19.0733	10	10288	1165
	MINATITLAN	MINATITLAN	-94.5586	17.9889	20	109193	409
	MISANTLA	MISANTLA	-96.8542	19.9272	300	22748	2923
	NANCHITAL DE L. CARDENAS	NANCHITAL DE L. CARDENAS	-94.4086	18.0711	10	25909	603
	NARANJOS AMATLAN	NARANJOS	-97.6867	21.3497	60	19271	7447
	NOGALES	NOGALES	-97.1628	18.8219	1280	20530	428
	OLUTA	OLUTA	-94.8969	17.9278	90	11245	285
	ORIZABA	ORIZABA	-97.1036	18.8497	1230	118552	458
	OTEAPAN	OTEAPAN	-94.6639	18.0064	50	12115	384
	PANUCO	PANUCO	-98.1775	22.0553	30	34192	8281
	PAPANTLA	POZA RICA	-97.4167	20.5083	140	19378	3692
	PAPANTLA	PAPANTLA DE OLARTE	-97.3200	20.4478	180	48804	3638
	PASO DEL MACHO	PASO DEL MACHO	-96.7256	18.9694	480	11787	655
	PEROTE	PEROTE	-97.2428	19.5600	2400	30848	1518
	POZA RICA DE HIDALGO	POZA RICA DE HIDALGO	-97.4539	20.5350	50	151441	3730

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	PUEBLO VIEJO	BENITO JUAREZ	-97.8411	22.1994	10	12725	8277
	PUEBLO VIEJO	ANAHUAC	-97.8581	22.2069	10	12796	8277
	RIO BLANCO	RIO BLANCO	-97.1517	18.8344	1300	39286	440
	SAN ANDRES TUXTLA	SAN ANDRES TUXTLA	-95.2122	18.4497	300	54853	651
	SANTIAGO TUXTLA	SANTIAGO TUXTLA	-95.2994	18.4617	180	15348	613
	SAYULA DE ALEMAN	SAYULA DE ALEMAN	-94.9597	17.8817	80	10824	263
	SOLEDAD DE DOBLADO	SOLEDAD DE DOBLADO	-96.4161	19.0453	100	12017	908
	TANTOYUCA	TANTOYUCA	-98.2261	21.3450	150	25492	7328
	TEMAPACHE	ALAMO	-97.6750	20.9167	40	22923	4807
	TEMPOAL	TEMPOAL DE SANCHEZ	-98.3947	21.5206	50	12291	8089
	TIERRA BLANCA	TIERRA BLANCA	-96.3606	18.4478	60	44565	371
	TIHUATLAN	TIHUATLAN	-97.5350	20.7150	100	11791	4032
	TLAPACOYAN	TLAPACOYAN	-97.2114	19.9619	430	31674	2769
	TRES VALLES	TRES VALLES	-96.1350	18.2406	40	17558	228
	TUXPAM	ALTO LUCERO	-97.4433	20.9508	20	10850	5008
	TUXPAM	TUXPAM DE RODRIGUEZ CANO	-97.4031	20.9589	10	74527	5080
	VERACRUZ	VALENTE DIAZ	-96.2167	19.1553	30	13765	1285
	VERACRUZ	VERACRUZ	-96.1378	19.1992	10	411582	1468
	XALAPA	XALAPA-ENRIQUEZ	-96.9275	19.5400	1460	373076	1657
	XICO	XICO	-97.0083	19.4214	1320	14967	1309
YUCATAN	HUNUCMA	HUNUCMA	-89.8744	21.0153	8	20978	10000
	IZAMAL	IZAMAL	-89.0178	20.9314	13	14075	10000
	KANASIN	KANASIN	-89.5575	20.9317	10	37674	10000
	MAXCANU	MAXCANU	-90.0008	20.5831	13	11229	10000
	MERIDA	MERIDA	-89.6217	20.9678	9	662530	10000
	MOTUL	MOTUL DE CARRILLO PUERTO	-89.2831	21.0950	7	19868	10000
	MUNA	MUNA	-89.7131	20.4847	19	10695	10000
	OXKUTZCAB	OXKUTZCAB	-89.4183	20.3028	33	20244	10000
	PETO	PETO	-88.9214	20.1256	35	16572	10000
	PROGRESO	PROGRESO	-89.6633	21.2844	2	44354	10000
	TEKAX	TEKAX DE ALVARO OBREGON	-89.2881	20.2019	37	21580	10000
	TICUL	TICUL	-89.5339	20.3953	25	28502	10000
	TIZIMIN	TIZIMIN	-88.1508	21.1422	17	39525	10000
	UMAN	UMAN	-89.7500	20.8833	7	26657	10000
	VALLADOLID	VALLADOLID	-88.2014	20.6906	25	37332	10000
ZACATECAS	CALERA	VICTOR ROSALES	-102.7022	22.9489	2160	25709	8640
	FRESNILLO	FRESNILLO	-102.8675	23.1756	2185	97023	8648

Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores							
ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
	GUADALUPE	GUADALUPE	-102.5175	22.7461	2275	78879	8660
	JALPA	JALPA	-102.9794	21.6314	1390	13586	8035
	JEREZ	JEREZ DE GARCIA SALINAS	-102.9903	22.6486	2000	37558	8641
	JUAN ALDAMA	JUAN ALDAMA	-103.3944	24.2894	1990	14058	8631
	LORETO	LORETO	-101.9875	22.2733	2030	19634	8623
	MIGUEL AUZA	MIGUEL AUZA	-103.4497	24.2939	2058	12592	8625
	NOCHISTLAN DE MEJIA	NOCHISTLAN DE MEJIA	-102.8456	21.3606	1850	15499	7840
	OJOCALIENTE	OJOCALIENTE	-102.2514	22.5700	2040	18150	8618
	RIO GRANDE	RIO GRANDE	-103.0364	23.8225	1860	29214	8640
	SOMBRERETE	SOMBRERETE	-103.6397	23.6347	2300	18668	8652
	TLALTENANGO DE SANCHEZ ROMAN	TLALTENANGO DE SANCHEZ ROMAN	-103.3036	21.7817	1680	14136	7909
	TRANCOSO	TRANCOSO	-102.3644	22.7314	2240	10383	8641
	VALPARAISO	VALPARAISO	-103.5678	22.7703	1890	10468	8625
	VILLANUEVA	VILLANUEVA	-102.8831	22.3536	1900	11057	8609
	ZACATECAS	ZACATECAS	-102.5753	22.7717	2440	113947	8652

II. ELABORACIÓN DE MAPAS DE PELIGROS VOLCÁNICOS

Alicia Martínez Bringas, Ángel Gómez Vázquez y Servando De la Cruz-Reyna

RESUMEN

En comparación con otros desastres naturales, los causados por actividad volcánica son poco frecuentes aunque letales. Sin embargo, el costo asociado a este tipo de desastres es alto, debido a que son capaces de afectar amplias regiones alrededor de los volcanes y pueden llegar a extenderse a grandes distancias. Una adecuada evaluación de los peligros volcánicos debe estar basada primordialmente en la reconstrucción de la historia eruptiva de cada volcán. En este trabajo se indica en términos generales cuáles son los requerimientos para la elaboración de mapas de peligros volcánicos.

2.1 INTRODUCCIÓN

Los peligros volcánicos son más sencillos de manejar en comparación con otros peligros naturales, ya que su lugar de origen es puntual y por la extensión limitada del área en la cual existen volcanes activos.

Los mayores desastres han ocurrido en volcanes con muchos años de inactividad. Estos periodos de ausencia de actividad propicia el olvido y la falta de interés en la historia eruptiva de estos volcanes, lo que trae consigo consecuencias catastróficas.

Aunque es prácticamente imposible disponer de un calendario completo con todas las erupciones de un volcán, debe intentarse al menos la identificación de los periodos de actividad más importantes.

La forma de comportarse de un volcán en el pasado describe la posible actividad precursora y la secuencia de eventos durante una erupción o una secuencia de erupciones, así como el tipo y magnitud de la actividad futura.

Contar con el conocimiento de los peligros volcánicos que pudieran presentarse en un volcán determinado, dará como resultado una reducción en pérdidas humanas y económicas. Además, permitirá una mejora en técnicas de construcción de viviendas y edificaciones en general, implementación de medidas restrictivas a la construcción en áreas de peligro y al desarrollo de mejores planes de evacuación y mitigación de desastres.

La elaboración de mapas de peligro volcánico son de naturaleza compleja y de un alto contenido técnico especializado. En general su confección queda restringida a profesionales en materia de vulcanología.

2.1.1 Volcanes de México

El vulcanismo es una manifestación de la energía interna de la Tierra. En México gran parte del vulcanismo está relacionado con la zona de subducción formada por las placas de Rivera y Cocos con la gran placa Norteamericana, y tiene su expresión volcánica en la Faja Volcánica Mexicana (FVM). Esta Faja es una elevación volcánica con orientación Este-Oeste, que se extiende más de 1,200 km y su ancho varía de 20 a 150 km.

La FVM, ubicada sobre el paralelo 19°, alberga a los principales volcanes activos del país. Su vulcanismo es extremadamente variado, desde actividad efusiva cuyos productos más importantes son los derrames de lava, hasta erupciones altamente explosivas con predominio de depósitos piroclásticos tanto de flujo como de caída.

La FVM se caracteriza por la diversidad de volcanes, desde grandes estratovolcanes hasta extensos campos de pequeños conos de cenizas y volcanes escudo. Sin embargo, existen otros centros eruptivos en el país que no pertenecen a la FVM, como son los volcanes del estado de Chiapas, el volcán Tres Vírgenes en Baja California Norte, cuyo mecanismo de formación es de otro origen, etc.

En México hay más de 2,000 volcanes, de los cuales alrededor de 15 se consideran activos o peligrosos. En la figura 2.1 se muestran las zonas volcánicas de México, así como la ubicación de algunos de los volcanes considerados como de alta peligrosidad.



Figura 2.1 Zonas volcánicas de México señaladas con líneas punteadas y algunos volcanes considerados peligrosos (Tomado de USGS/CVO, 2003)

De acuerdo con el catálogo de Volcanes de México del Smithsonian Institution (Siebert *et al*, 2003), existen en México 68 volcanes y campos volcánicos clasificados como Cuaternarios o geológicamente recientes (*volcanes formados durante la era en que aparece el Hombre, y que comprende los últimos 1.8 millones de años*). De especial importancia son los volcanes que han mostrado actividad en los últimos 10,000 años, periodo al que se denomina “holoceno”.

Los volcanes se clasifican, para efectos del análisis de peligro, de acuerdo con criterios relacionados con sus tasas eruptivas y con las magnitudes que han sido capaces de producir.

La tasa de erupción promedio en México durante los últimos 500 años ha sido de unas 15 erupciones de diversos tamaños por siglo. Si bien la mayoría de esas erupciones han sido de magnitudes bajas, otras han sido destructivas en grado moderado, como las del volcán de Colima de 1576 y 1818, o las del San Martín Tuxtla de 1664 y 1793, o en mayor grado, como la ocurrida en el volcán El Chichón en 1982, que causó numerosas víctimas, devastó 150 km² de áreas boscosas y de cultivo y destruyó varios miles de cabezas de ganado.

Otras erupciones, como el nacimiento del volcán monogenético Parícutín produjeron flujos de lava que provocaron la destrucción de poblaciones y tierras cultivables, pero sin causar víctimas. Casos análogos de volcanes monogenéticos recientes son el Jorullo, que nació en Michoacán en 1759, y el Xitle, que nació en el valle de México, hace aproximadamente 1,670 años. Los efectos de los flujos de lava del Xitle pueden apreciarse muy claramente en la zona arqueológica de Cuicuilco en el sur del Distrito Federal.

Los 68 volcanes y campos volcánicos Cuaternarios de México se han clasificado bajo los siguientes criterios:

Categoría 1: Se consideran de peligro alto los volcanes que hayan producido erupciones con un Índice de Explosividad Volcánica (VEI por sus siglas en inglés) (tabla 2.2) igual o mayor a 3 con un tiempo medio de recurrencia de 500 años o menos, o que hayan producido al menos una erupción con VEI 3 o mayor en los últimos 500 años.

Categoría 2: Se consideran de peligro medio los volcanes que hayan producido erupciones con VEI igual o mayor a 3 con un tiempo medio de recurrencia mayor que 500 pero menor que 2,000 años, o que hayan producido al menos una erupción con VEI 3 o mayor en los últimos 500 a 2,000 años.

Categoría 3: Se consideran de peligro moderado los volcanes que hayan producido erupciones con VEI igual o mayor a 3 con un tiempo medio de recurrencia mayor que 2,000, pero menor a 10,000 años, o que hayan producido al menos una erupción con VEI 3 o mayor en los últimos 2,000 a 10,000 años. La figura 2.2 incluye a los volcanes de las categorías 1, 2 y 3.

Categoría 4: Se consideran de peligro latente los volcanes que hayan producido erupciones con VEI mayor a 4 con un tiempo medio de recurrencia mayor a 10,000 años, o que hayan producido al menos una erupción con VEI mayor a 4 en los últimos 100,000 años. La figura 2.3 muestra los volcanes de México en esta categoría.

Categoría 5: Se consideran de peligro indefinido los volcanes que hayan producido erupciones con VEI igual o mayor que 3, con un tiempo medio de recurrencia indeterminado (esto es, que sólo exista un dato), o que hayan producido al menos una erupción con VEI 3 en algún momento de su historia holocénica (últimos 10,000 años). La figura 2.4 muestra las ubicaciones de volcanes clasificados en esta categoría.



Figura 2.2 La figura muestra algunos de los volcanes de México que han tenido erupciones en tiempos geológicos muy recientes o históricos. Nótese que algunos de los volcanes señalados (como el Xitle o el Parícutín) son monogenéticos y se incluyen en el mapa como representativos de extensos campos volcánicos donde puede nacer otro volcán de ese tipo. Los volcanes mostrados en esta figura caen en las categorías 1, 2 y 3



Figura 2.3 Volcanes de México en la categoría 4, que se consideran de peligro latente por haber producido erupciones con VEI mayor a 4 con un tiempo medio de recurrencia mayor a 10,000 años, o por haber producido al menos una erupción con VEI mayor a 4 en los últimos 100,000 años



Figura 2.4 Volcanes y campos volcánicos en la categoría 5, que se consideran de peligro indefinido por haber producido erupciones con VEI igual o mayor que 3, con un tiempo medio de recurrencia indeterminado (esto es, que sólo existe un dato), o por haber producido al menos una erupción con VEI 3 en algún momento de su historia holocénica (últimos 10,000 años). Este tipo de volcanes deben ser reevaluados después de contar con mayores datos de su historia eruptiva

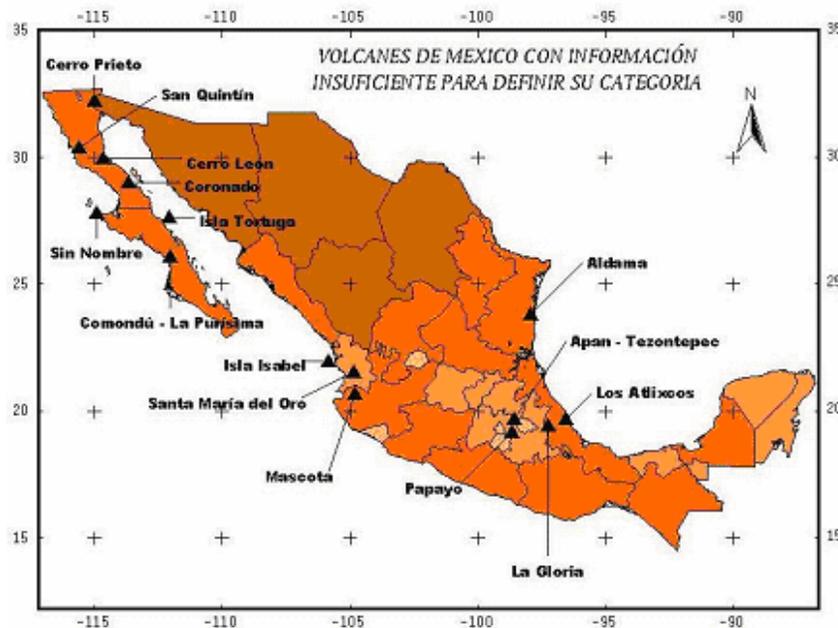


Figura 2.5 Volcanes listados como de "información insuficiente". La probabilidad de que un volcán de este tipo se reactive de manera abrupta e inicie su actividad con erupciones intensas sin una evolución previa es virtualmente nula

Una última categoría se le ha clasificado como “**volcanes con información insuficiente**”. Aunque es muy improbable que los volcanes de ésta representen un nivel significativo de peligro, deben ser estudiados para contar con los elementos mínimos para su evaluación definitiva, la que sólo podrá realizarse cuando se cuente con los elementos geológicos que definan las probabilidades de erupción de estos volcanes (figura 2.5).

2.2. IDENTIFICACIÓN DEL PELIGRO

2.2.1 Definiciones de conceptos relativos a los volcanes

La Tierra, es un sistema muy complejo que inició su evolución hace un poco más de 4,500 millones de años, cuando la Tierra se condensó en una esfera, cuya superficie se enfriaba con relativa rapidez. Algunos miles de millones de años después y hasta la actualidad, la superficie ha alcanzado un grado de equilibrio que le permite sustentar la vida.

La Tierra presenta una estructura interna, en la cual se pueden distinguir tres regiones concéntricas: La primera es la *corteza*, que se constituye como una especie de cáscara relativamente delgada comparada con el diámetro del planeta. La corteza incluye a los continentes y el fondo marino. La segunda llamada *manto terrestre*, es una gruesa capa de material rocoso y, la tercera es el *núcleo*, situado en el centro, está a su vez conformado por dos capas, una externa y fluida, y otra interna sólida.

El manto terrestre es una gran masa de material rocoso, con cierta plasticidad, muy densa, muy caliente y que fácilmente se funde en el caso de que se disminuya la presión a la que está sometido, o si se aumenta su temperatura un poco más, dando por resultado el *magma*. El magma es una roca líquida que tiene una menor densidad que la sólida y por ello tiende a subir y se puede acumular en la corteza formando las llamadas “cámaras” magmáticas.

El magma acumulado en la corteza no siempre sale a la superficie. En algunos casos permanece inmóvil por largo tiempo en el subsuelo, hasta enfriarse y solidificarse y por lo general sólo aflora a la superficie cuando la porción de corteza que la cubre se erosiona. En otros casos el magma sale a la superficie, produciendo una *erupción volcánica*.

Un *volcán* se define como aquel sitio donde sale material magmático o sus derivados, formando una acumulación que por lo general toma una forma aproximadamente cónica alrededor del punto de salida. Generalmente los volcanes tienen en su cumbre o en sus costados, grandes cavidades de forma aproximadamente circular denominadas *cráteres*.

Los volcanes que se forman por la acumulación de materiales emitidos por varias erupciones a lo largo del tiempo geológico se llaman *poligenéticos*, o *volcanes centrales*. Otro tipo de volcanes que nacen, desarrollan una erupción que puede durar algunos años y se extinguen sin volver a tener actividad se le denomina *monogenético*, en lugar de ocurrir otra erupción en ese volcán, puede nacer otro volcán similar en la misma región, son muy abundantes en México.

Se dice que un volcán es *activo*, cuando existe magma fundido en su interior, o cuando existe la posibilidad de recibir nuevas aportaciones de magma y por tanto mantiene el potencial de producir erupciones. Por ello, aun volcanes que no muestran ninguna manifestación externa pueden ser clasificados como activos o peligrosos. En muchos casos es difícil decir si un volcán es activo o no.

Por lo general, se dice entonces que un volcán es activo si ha mostrado algún tipo de actividad eruptiva relativamente reciente. Esto significa que un volcán que haya presentado actividad durante los últimos diez mil años puede ser considerado “activo”. Sin embargo, este número es convencional, ya que un volcán con once mil años de inactividad no necesariamente está muerto, ni un volcán que haya tenido su última erupción hace 8 ó 9 mil años necesariamente volverá a hacer erupción.

Los volcanes activos no se encuentran dispersos arbitrariamente sobre la superficie de la Tierra, sino que se distribuyen por diferentes regiones definidas por los procesos tectónicos de escala global, como las interacciones de las placas tectónicas que conforman la corteza y las corrientes convectivas del manto terrestre que las mueven.

La actividad volcánica puede tener efectos destructivos, pero también efectos benéficos. Las tierras de origen volcánico son fértiles, por lo general altas, de buen clima, lo que explica el crecimiento de los centros de población en esos sitios. Los habitantes de esas regiones y los usuarios de los servicios disponibles deben adquirir una percepción clara de los beneficios y de los riesgos que implica vivir ahí. Esto es especialmente importante en zonas donde hay volcanes que no han manifestado actividad reciente. Al no existir testigos o documentos de las erupciones, puede formarse entre la población una percepción incorrecta del riesgo volcánico.

En todo el mundo existen alrededor de 1,300 volcanes continentales activos, de éstos, 550 han tenido alguna erupción en tiempos históricos, a lo largo de la historia de la humanidad, poblaciones asentadas cerca de estos 550 volcanes en distintas partes del mundo han soportado los efectos de la actividad volcánica. El potencial destructivo de los volcanes representa actualmente una amenaza a la vida y propiedades de millones de personas en el mundo.

Es sumamente difícil estimar el valor de los daños materiales ocasionados por las erupciones, pero en algunos casos éstas han involucrado la pérdida de ciudades enteras, la destrucción de bosques y cosechas, y el colapso de las economías de las regiones afectadas por largos periodos.

Para tratar el problema de los daños provocados por fenómenos naturales y buscar soluciones que permitan reducir su impacto, es necesario proceder metódicamente. En primer lugar se requiere definir y cuantificar los conceptos que relacionan a los fenómenos naturales con su impacto sobre la sociedad.

2.2.2 Las erupciones volcánicas

Las erupciones volcánicas resultan del ascenso del magma que se encuentra en la parte interna o debajo de un volcán activo. Cuando el magma se acerca o alcanza la superficie, pierde todos o parte de los gases que lleva en solución, formando gran cantidad de burbujas en su interior. Las erupciones son entonces emisiones de mezclas de magma (roca fundida rica en materiales volátiles), gases volcánicos que se separan de éste (vapor de agua, bióxido de carbono, bióxido de azufre y otros) y fragmentos de rocas de la corteza. Estos materiales pueden ser arrojados con distintos grados de violencia, dependiendo de la presión de los gases provenientes del magma o de agua subterránea sobrecalentada por el mismo.

Cuando la presión dentro del magma se libera a una tasa similar a la que se acumula, es decir, cuando el magma puede liberar los gases en solución con facilidad, el magma puede salir a la superficie sin explotar y se tiene una *erupción efusiva*. Si el magma acumula más presión de la que puede liberar, las burbujas en su interior crecen hasta tocarse y el magma se fragmenta violentamente, produciendo una *erupción explosiva*.

Las erupciones explosivas pueden producir densas columnas de ceniza que ocasionalmente penetran la estratosfera y alcanzan alturas superiores a los 20 km, estas son las llamadas *columnas eruptivas*.

La tasa de erupción promedio en México durante los últimos 500 años ha sido de cerca de 15 erupciones de diversos tamaños por siglo. La mayoría de esas erupciones han sido de magnitudes bajas, sin embargo, otras han sido destructivas en grado moderado, como las del Colima de 1576 y 1818, o las del San Martín Tuxtla de 1664 y 1793, o en mayor grado la erupción del volcán El Chichón en 1982, que causó numerosas víctimas, devastó 150 km² de áreas boscosas y de cultivo y destruyó varios miles de cabezas de ganado.

Otras erupciones, como el nacimiento del volcán monogenético Parícutín que produjo flujos de lava, provocando la destrucción de poblaciones y tierras cultivables, pero sin causar víctimas. Casos análogos de volcanes monogenéticos recientes son el Jorullo, que nació en Michoacán en 1759, y el Xitle, que nació en el valle de México, hace unos 1670 años.

2.2.3 Tipos de vulcanismo y erupciones

Es necesario identificar los volcanes, tipo y periodicidad de las erupciones. Existen dos tipos de vulcanismo; el monogenético y el poligenético:

Vulcanismo monogenético: es aquel en que la erupción ocurre durante una sola etapa, a través de una fisura o boca y construye un pequeño edificio en forma de maar, cono escoriáceo, domo o volcán escudo. Su duración varía de meses a aproximadamente 10 años y es predominantemente efusiva.

Vulcanismo poligenético: es aquel en el cual se forman edificios volcánicos por la acumulación de materiales emitidos por varias erupciones a lo largo del tiempo geológico. Se producen erupciones con un rango amplio de intensidades. Construye edificios tipo estratovolcán y grandes calderas.

Los volcanes pueden ser de diferentes tipos (figura 2.6), entre los que se encuentran las calderas, los conos cineríticos, maares, volcanes escudo, estratovolcanes y domos. Saber a qué tipo pertenece un volcán, proporciona mucha información acerca de la actividad que ha presentado en el pasado.

Caldera: Depresión circular o elíptica grande (1 a 100 km de diámetro), a veces reconocer su existencia a simple vista resulta difícil. Se forma cuando el magma se obtiene de un reservorio somero. En un año común, algún tipo de actividad se presenta en cerca de 18 calderas en el mundo.

Cono Cinerítico: Es una montaña con laderas muy inclinadas, que se forma debido a la acumulación de partículas y lava mezclada con gases. Es el volcán más simple de todos. En general son monogenéticos. Alcanzan alturas entre 30 y 450 m. Sus magmas son de baja viscosidad. Uno de los conos cineríticos más recientes, es el volcán Parícutín, que construyó un cono con una altura de 424 m y produjo un flujo de lava que cubrió 25 km cuadrados.

Maar: Son conos con cráteres muy grandes de bajo relieve, que corta el nivel freático, por lo que forma un lago en el fondo llamado “mare”. Se forma por erupciones explosivas someras. Las explosiones son generalmente provocadas por el calentamiento del agua freática, cuando el magma

invade estos niveles. También son conocidos como Axalapascos, que en Náhuatl significa “cuenca de tierra y arena con agua”.

Volcán Escudo: Es un volcán amplio con pendientes suaves (menos de 10°) construidas por erupciones de lava basáltica fluida. El nombre proviene del parecido con los escudos de los guerreros. Los volcanes más grandes del mundo son volcanes escudo.

Estratovolcán: Son volcanes con formas cónicas y pendientes pronunciadas, construidos por la erupción de flujos de lava viscosa, flujos piroclásticos y tefra. Se desarrollan, generalmente, en periodos de cientos o miles de años. Estos volcanes pueden producir una variedad de tipos de magma, incluyendo basalto, andesita, dacita y riolita. Todos estos magmas, con excepción del basalto, generan erupciones explosivas. De los 1511 volcanes que han hecho erupción en el mundo en los últimos 10,000 años, 699 son estratovolcanes.

Domos: Los domos están formados por masas de lava relativamente pequeñas. Esta lava es demasiado viscosa para fluir a grandes distancias, por lo que se apila sobre y alrededor de su centro emisor. Presentan pendientes fuertes que tienden a derrumbarse y formar flujos de bloques y cenizas. Ocurren típicamente en las cimas de algunos volcanes. Los domos son acompañados por actividad explosiva. Llegan a medir hasta 200 m de diámetro y 500 m de altura.

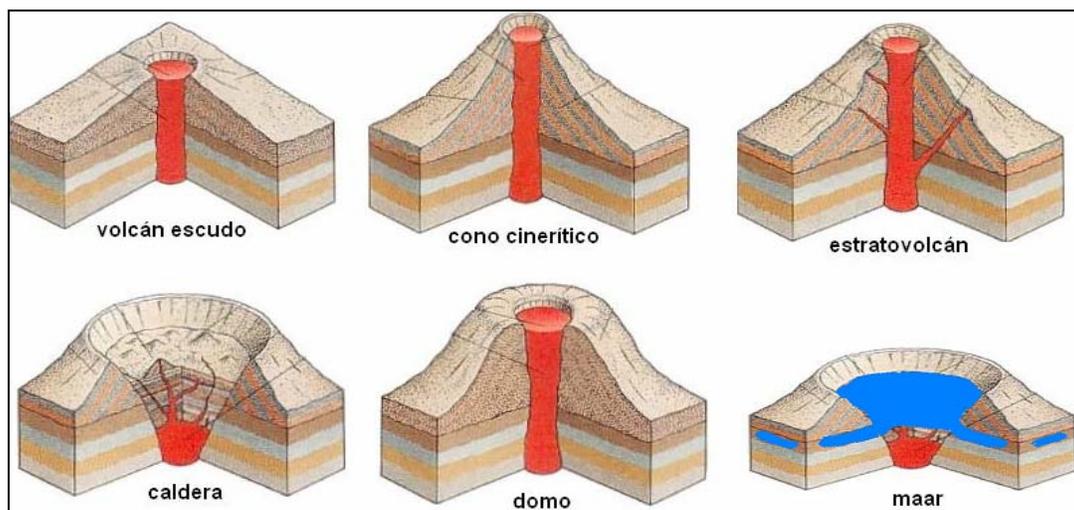


Figura 2.6 Tipos de volcanes

Los tipos de erupciones más conocidas son:

Erupción efusiva o Hawaiana: Es una erupción dominada por la salida continua de lava de baja viscosidad que puede formar flujos o ríos de lava. El gas se libera fácilmente. La extrusión puede durar minutos o días. Son típicas de volcanes escudo. La erupción histórica más larga, ocurrió en Islandia en 1783, y produjo 15 km³ cúbicos de material en 8 meses.

Erupción Estromboliana: Las erupciones estrombolianas están caracterizadas por una intermitente explosión o fuente de lava basáltica de viscosidad mayor a la Hawaiana, proviene de un

solo cráter o fisura. Cada episodio de ésta obedece a la liberación de gases volcánicos, lo que ocurre, típicamente, cada varios minutos, algunas veces en forma rítmica y otras en forma irregular. Origina columnas eruptivas de hasta 10,000 m de altura.

Erupción Vulcaniana: La erupción vulcaniana es un tipo de erupción explosiva que lanza fragmentos de lava nueva que no toman una forma redondeada durante su viaje por el aire. Esto se debe a que la lava es muy viscosa o ya está solidificada. Producen columnas eruptivas de 10 a 20 km de altura, con velocidades iniciales de hasta 200 m/s.

Erupción Pliniana y Peleana: Las erupciones plinianas son grandes eventos explosivos que forman enormes columnas de tefra y gas que se elevan hasta la estratosfera (entre 20 y 45 km). Las emisiones son continuas y de magma viscoso. Algunas de estas erupciones han provocado que cantidades de aerosoles (pequeñas gotas de líquidos) queden en la estratosfera, provocando que la temperatura en la superficie de la Tierra, baje un poco. Por ejemplo la erupción del Chichón en 1982. En la figura 2.7 se muestran de forma esquemática la forma de los distintos tipos de erupciones.

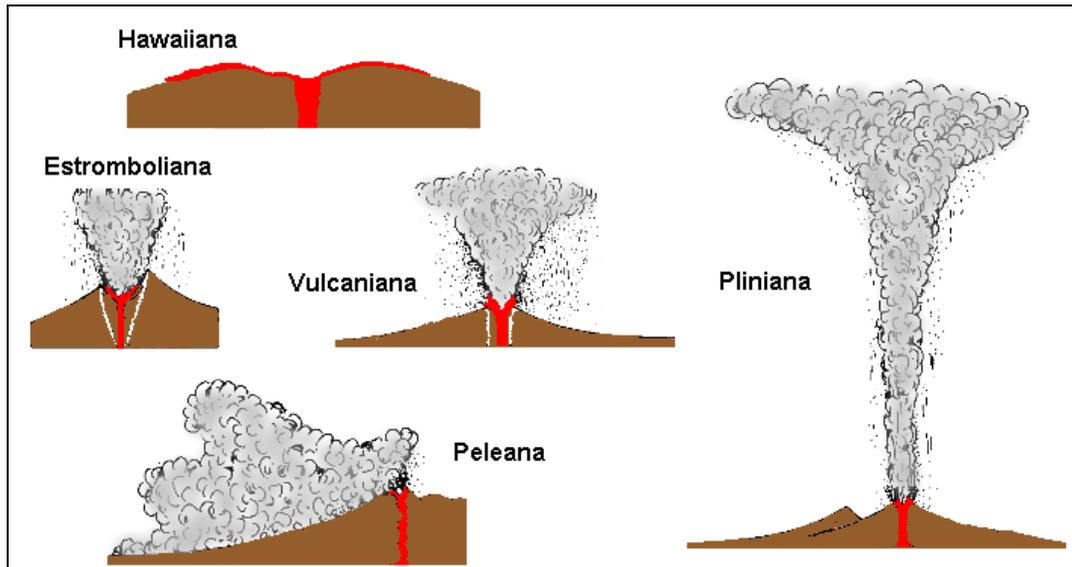


Figura 2.7 Tipos de erupciones

En la tabla 2.1 se mencionan los tipos de erupciones, el tipo de volcán que las presenta y algunas otras características y ejemplos de volcanes del mundo que lo han presentado.

Tabla 2.1 Tipos de erupciones y naturaleza de la actividad volcánica

Tipo de erupción	Ejemplos	Magma	Actividad efusiva	Explosividad	Tipo de volcanes
Hawaiana	Mauna Loa	Caliente (más de 1200°C) baja viscosidad	Lavas extensas a partir de fisuras	Baja	Volcanes escudo, planicies lávicas y erupciones fisurales
Estromboliana	Stromboli y Parícutín	Intermedio, mixto, viscosidad moderada	Lavas escasas, poco extensas	Variable	Conos de lavas y cenizas abruptos
Vulcaniana	Vesubio	Frío (menos de 900°C), viscoso	Lavas escasas, piroclastos abundantes	Moderada a violenta	Estratovolcanes y calderas
Pliniana Y Peleana	Pinatubo y St. Helen	Frío (menos de 900°C), muy viscoso	Piroclastos y domos	Muy violenta	Estratovolcanes y calderas

Actualmente, una de las formas más aceptadas de cuantificar las erupciones explosivas (forma que no es válida para las erupciones efusivas) es la escala del *Índice de Explosividad Volcánica* (VEI, por sus siglas en inglés). Esta escala fue definida por Newhall y Self en 1982, y es una escala compuesta en la que se toman en cuenta diversas características de una erupción como son: el volumen de magma emitido, la energía térmica liberada, el alcance de los productos fragmentados, el grado de destrucción causada, la altura de la columna eruptiva, la duración de la erupción, etc. La tabla 2.2 muestra la escala VEI en términos de algunos de los parámetros eruptivos relevantes.

Tabla 2.2 Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en inglés)

VEI	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción	No explosiva	Pequeña	Moderada	Moderada a grande	Grande	Muy grande	--	--	--
Volumen emitido (m ³)	< 10,000	10,000 – 1,000,000	Uno a diez millones	Diez a cien millones	Cien a mil millones	Uno a diez km ³	Diez a cien km ³	Cien a mil km ³	Más de 1000 km ³
Altura de la columna (km)	0,1	0,1 – 1	1 - 5	3 - 15	10 - 25	Más de 25	--	--	--
Duración en horas	-1	-1	1 - 6	1 - 6	1 - 12	6 - 12	Más de 12	--	--
Inyección a la troposfera	Mínima	Leve	Moderada	Sustancial	Grande	--	--	--	--
Inyección a la estratosfera	Nula	Nula	Nula	Posible	Definida	Significativa	Grande	--	--

Adaptado de: Newhall y Self (1982).

2.3 PELIGROS VOLCÁNICOS

Muchos de los procesos geológicos que tienen su origen en los volcanes son potencialmente peligrosos (figura 2.8).

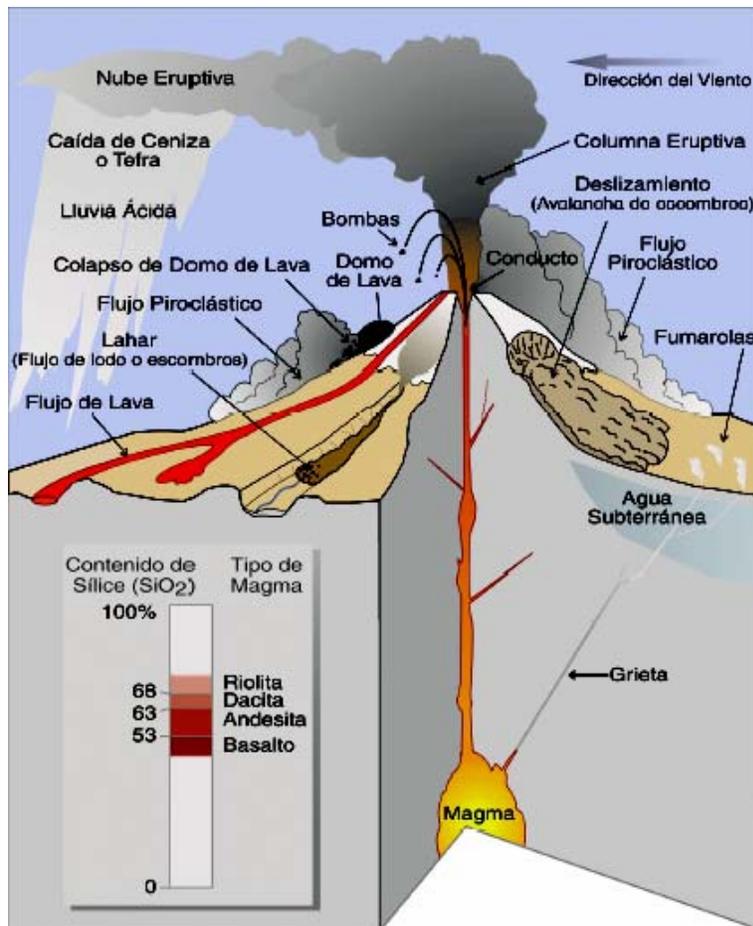


Figura. 2.8 Los peligros volcánicos. Este dibujo simplificado muestra un volcán del tipo al que pertenecen la mayoría de los volcanes más grandes y peligrosos del mundo. (Tomado del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Reduciendo el riesgo de los peligros volcánicos)

2.3.3.1 Cenizas volcánicas y efectos

Las cenizas volcánicas son lava que ha sido molida y convertida en polvo o arena por erupciones volcánicas. Durante una explosión, los fragmentos más gruesos caen rápidamente en las cercanías del volcán, sólo la ceniza más fina es arrastrada por el viento a grandes distancias que van de cientos hasta miles de kilómetros, y puede afectar áreas muy extensas y a un gran número de personas (figura 2.9).

La caída de cenizas puede provocar alguno de los siguientes efectos: el agravamiento de enfermedades pulmonares, trastornos gastrointestinales por la ingestión de agua y alimentos

contaminados con flúor y posiblemente con metales pesados (arsénico, mercurio, etc.); daños oculares como conjuntivitis y abrasiones en la córnea.

Las cenizas obstruyen las corrientes de agua, presas, alcantarillas, plantas de aguas residuales y todo tipo de maquinaria. Las cenizas se amontonan en carreteras, vías férreas y senderos y además puede ser resbalosa.

Capas de cenizas de 2 a 3 cm de espesor pueden causar el colapso de techos con pendientes menores a 20° , así como en estructuras de mala calidad. Las cenizas secas tienen un peso de $400\text{--}700\text{ kg/m}^3$, la lluvia puede incrementarlo de un 50 a un 100%. Una capa de cenizas de 10 cm de espesor representará una carga extra de $40\text{--}70\text{ kg/m}^2$ si está seca, y de $100\text{--}125\text{ kg/m}^2$ si está húmeda.

Una densa caída de cenizas altera el suministro de energía. La repentina demanda multitudinaria de luz puede hacer que el servicio eléctrico se agote o falle. Los equipos electrónicos pueden sufrir importantes daños, cortocircuitos e interferencias de radio y televisión.

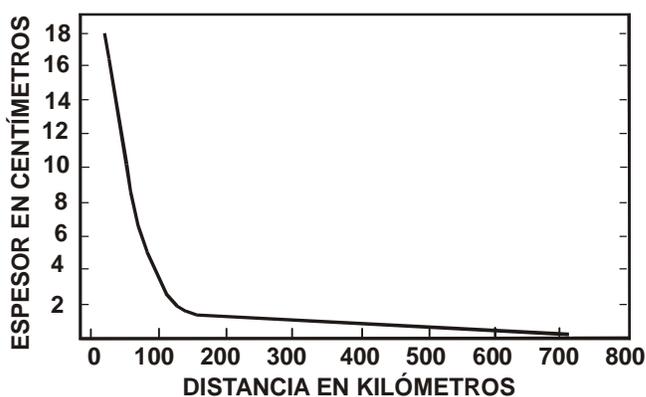


Figura 2.9 *Distribución de espesores de cenizas alcanzados en erupciones recientes de tipo pliniano*

Los efectos sobre la agricultura dependen del tipo de cultivo, de su grado de desarrollo y evidentemente del espesor de la capa de cenizas caída. Sin embargo, en climas cálidos la vegetación se recupera en muy poco tiempo. Pueden ocasionar accidentes de automóviles (debido a que las carreteras se tornan resbaladizas y disminuye la visibilidad). Finalmente, las cenizas lanzadas en una erupción afecta el tráfico aéreo, ya que al atravesar las nubes de vapor y cenizas, los motores de los aviones pueden pararse.

De las mediciones de la acumulación de cenizas producidas por erupciones recientes de tipo pliniano, se han obtenido en promedio los siguientes espesores: hasta una decena de metros en la zona cercana al cráter (menos de 12 km), de 20 a 50 cm a distancias de entre 12 y 35 km y de 5 a 10 cm hasta distancias de 85 km (figura 2.9). Para la determinación del impacto de las cenizas en una región determinada, se requiere información adicional de patrones de viento locales.

El viento y el tipo de erupción son los dos factores principales que controlan la dispersión de la ceniza de un volcán que entra en erupción. El tipo de erupción determinará el volumen y el tamaño de la ceniza (figura 2.10), así como la variedad de altitudes a la cual la ceniza es propulsada o elevada.

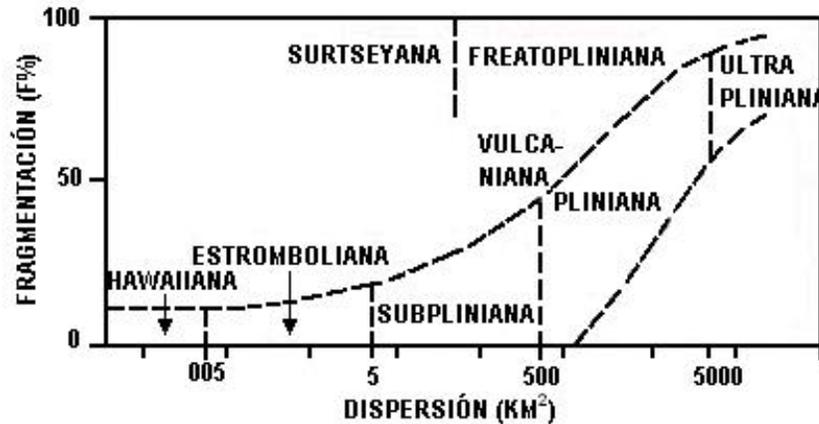


Figura 2.10 Distancia alcanzada por la ceniza desde el centro de emisión de acuerdo al porcentaje de fragmentación y tipo de erupción

2.3.3.2 Flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos son uno de los fenómenos más destructivos que se pueden presentar en un volcán en actividad. Los flujos piroclásticos son mezclas calientes de gases, cenizas y fragmentos de roca, que descienden por los flancos del volcán a velocidades de hasta más de 100 km por hora, con temperaturas por lo general arriba de 100 °C. La parte inferior y más densa del flujo se arrastra por el fondo de las barrancas y los valles, mientras que la parte superior, menos densa, puede sobrepasar los valles y alcanzar alturas importantes sobre el fondo de los valles e inclusive sobrepasar relieves topográficos importantes.

Durante la generación de un flujo piroclástico, es prácticamente imposible que cualquier cosa que se encuentre a su paso se salve ya sean construcciones o seres vivos. El flujo es capaz de arrasar con construcciones bien edificadas y hasta con bosques enteros, sin dejar nada de pie, y puede llegar a viajar distancias que van del orden de metros a centenas de metros.

2.3.3.3 Lahar o flujos de lodo

Los lahares comprenden una mezcla de materiales volcánicos (rocas, cenizas, pómez, escoria), mayoritariamente cenizas, movilizadas por el agua proveniente de la fusión del casquete glaciar, de un lago cratérico o por fuertes lluvias. El agua se mezcla con el material volcánico suelto que se encuentra en su camino y se transforma rápidamente en un flujo muy móvil con características similares al concreto utilizado en la industria de la construcción.

Dada la densidad de esta mezcla, estos flujos pueden transportar grandes bloques de roca (de hasta varios metros de diámetro) y otros objetos como puentes, casas, árboles y vehículos. Son fenómenos muy destructivos, que pueden recorrer distancias muy grandes, pudiendo superar fácilmente los 100 km, se han observado velocidades de 40 a 100 km/h en lahares históricos. El principal peligro para la vida humana es el enterramiento o el impacto de bloques y otros escombros. Las edificaciones y otros bienes que estén en el camino del flujo son destrozados, enterrados o arrasados. Se debe evacuar, aunque en ocasiones basta subir unos cuantos metros para estar a salvo.

2.3.3.4 Ondas de presión o de choque

Se originan durante las erupciones explosivas debido al rápido movimiento del material, su energía disminuye con la distancia desde su centro de emisión, pero pueden llegar a tener la energía suficiente para causar daños a estructuras distantes. Erupciones moderadas pueden producir pequeños daños a distancias mayores de 10 km del volcán, especialmente rotura de cristales y heridas al proyectarse éstos. En la erupción del Volcán Tambora en Indonesia, en 1815, se reportó una onda de choque que produjo la ruptura de vidrios de ventanales ubicados a 400 km de distancia.

2.3.3.5 Derrumbe del edificio volcánico y avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros son grandes deslizamientos que pueden ocurrir en un volcán, producidos por la inestabilidad de los flancos del mismo. Este tipo de fenómeno puede producirse por una intrusión de magma en el edificio volcánico, por un sismo de gran magnitud o por el debilitamiento de la estructura del volcán, produciéndose la destrucción parcial del mismo.

Las avalanchas de escombros son muy móviles. La mayor parte de los estratovolcanes han sufrido al menos un evento de este tipo durante su historia geológica. Las avalanchas pueden alcanzar grandes dimensiones que provocan la destrucción total de lo que encuentra a su paso. El alcance es de pocas decenas de kilómetros, aunque en ocasiones, debido a la acción de la gravedad, el material puede llegar a recorrer distancias de hasta 100 km y cubrir varios cientos de kilómetros.

2.3.3.6 Flujos o coladas de lava y domos

Es la manifestación volcánica más conocida, y presentan poco peligro para las personas. Los flujos de lava son derrames de roca fundida, originados en un cráter o en fracturas de los flancos del volcán, que descienden por los flancos y las barrancas del mismo a bajas velocidades. La lava avanza a bajas velocidades, que disminuye conforme se va enfriando hasta sólo unos pocos metros por hora o por día. Estos flujos generan daño parcial o la destrucción total a las construcciones, por enterramiento, trituración o incendio. Los domos de lava actúan en ocasiones como "tapones" que dificultan la liberación de gases desde el interior del volcán, dando lugar a explosiones que pueden producir flujos piroclásticos.

2.3.3.7 Sismos volcánicos

Los sismos volcánicos son de magnitudes pequeñas y raras veces ocurren en sitios alejados del volcán. Cuando un sismo es de origen volcánico, el movimiento de la tierra es rápido. Los daños producidos por ellos son insignificantes, pero es importante destacar que muchas zonas volcánicas también son zonas sísmicas. Los efectos dañinos de los sismos volcánicos generalmente se detectan en las áreas aledañas, cerca de 10 km del cráter. Sin embargo, éstos pueden tener como consecuencia eventos tales como avalanchas de escombros, o contribuir en eventos como el colapso estructural del volcán mismo.

2.3.3.8 Gases volcánicos

Los volcanes emiten gases durante las erupciones, incluso si el volcán no está en erupción, las grietas del subsuelo facilitan el movimiento de los gases hacia la superficie a través de pequeñas aberturas por medio de las llamadas fumarolas. En ocasiones, la liberación de los gases se produce en grandes cantidades. Más del 90% de todo el gas emitido por los volcanes es vapor de agua, el cual en su gran mayoría es agua subterránea proveniente de lluvias y ríos.

Otros gases volcánicos comunes son el bióxido de carbono (CO₂), bióxido de azufre (SO₂), y varios otros compuestos de cloro (Cl), flúor (F), monóxido de carbono (CO), y nitrógeno (N). El gas bióxido de azufre puede reaccionar con las gotas de agua de la atmósfera y producir lluvia ácida, lo cual ocasiona corrosión y daños a la vegetación. El bióxido de carbono es más pesado que el aire, por lo que puede asentarse o mantenerse en áreas bajas en concentraciones letales para la gente y los animales.

2.3.3.9 Tsunamis

La mayoría de los tsunamis se originan por terremotos en el fondo del mar; sin embargo, decenas de tsunamis históricos de origen volcánico han causado numerosas muertes y grandes daños a las propiedades a lo largo de las playas marinas y lacustres, aún a grandes distancias de las erupciones. Algunos volcanes en el mundo han producido olas de hasta 35 metros de altura, causando grandes pérdidas materiales y humanas (Volcán Krakatoa, Indonesia, 1883). Se conocen algunos mecanismos que pueden producir dichos tsunamis volcánicos como son los sismos volcánicos, explosiones, colapsos o hundimientos, deslizamientos, lahares o flujos piroclásticos que entran en contacto con aguas y ondas de choque atmosféricas que se acoplan al mar.

2.4 DIAGNÓSTICO DE PELIGROS VOLCÁNICOS

Los resultados de una evaluación inicial de los peligros volcánicos conducen a identificar si un volcán en el área de estudio representa una amenaza, a corto o a largo plazo.

Los datos esenciales necesarios para una evaluación adecuada de los peligros volcánicos deben incluir lo siguiente:

- a) Registros completos de las erupciones históricas
- b) Actividad eruptiva deducida a partir del registro geológico
- c) Datos geológicos (especialmente estratigráficos), petrológicos y geoquímicos sobre la naturaleza, distribución y volumen de los productos eruptivos.
- d) Fechación de los productos volcánicos y de los eventos interpretados a partir de los mismos.

En conjunto todos estos datos permiten la reconstrucción del comportamiento eruptivo del volcán en el pasado, lo cual provee la base para evaluar los peligros potenciales de futuras erupciones. Al establecer un registro estratigráfico está implícita la clasificación del tipo de volcán en términos de la morfología y características eruptivas.

También está implícita la necesidad de determinar los tipos de roca de los depósitos volcánicos, pues ambos son indicadores de la propensión a explosiones violentas. Una vez que se determina la secuencia estratigráfica, los depósitos son clasificados en cuanto a tipo de peligro (tefra, flujo piroclástico, flujo de lava, etc.) y fechados.

Las evaluaciones de los peligros volcánicos generalmente toman como premisa el asumir que en general las mismas áreas en los alrededores del volcán serían afectadas por eventos similares eruptivos en el futuro a una tasa promedio igual que en el pasado.

Mientras más largo sea el periodo de tiempo que abarca la base de datos utilizada para reconstruir el comportamiento eruptivo pasado, más útil y confiable será la evaluación resultante de los peligros volcánicos.

Los datos sobre vientos (dirección predominante y velocidad) son relevantes en la evaluación de peligros de caída de tefra. La topografía y los estudios interpretativos de suelos son importantes para la evaluación de tefra, flujo piroclástico y peligros de lahares. La ubicación de reservorios y otras fuentes principales de agua que pueden causar inundaciones o contribuir al movimiento de los lahares, son datos de importancia especial para la mitigación de los peligros volcánicos.

En esta fase del estudio se requiere un diagnóstico del potencial de desarrollo de la región. Los resultados de una evaluación inicial de los peligros volcánicos conducirán a las diferentes necesidades de información si un volcán en el área de estudio es identificado como una amenaza inminente, a corto o a largo plazo.

Durante la parte preliminar de un estudio de peligros volcánicos, se hace una revisión inicial de la información disponible, se puede utilizar la información del Smithsonian Institution, Global Volcanism Program. En este momento, la mayoría de los puntos claves de la tabla 2.3 pueden ser contestados con un aceptable grado de confianza, llevando a cabo una evaluación inicial de los peligros volcánicos. No se requiere de ningún experto especializado para esta tarea.

Tabla 2.3 Puntos clave que se deben considerar en la evaluación de la peligrosidad de un volcán

Puntos claves
<ul style="list-style-type: none"> • Ubicación geográfica • Observar si existen montañas o cerros en las cercanías (<100 km) de la zona de interés • Determinar si alguno de ellos es un volcán • Reconstrucción del comportamiento eruptivo pasado: <ul style="list-style-type: none"> • Registros de erupciones históricas • Periodicidad y tipo de erupciones • Datos geológicos de naturaleza, distribución y volumen de los productos eruptivos • Tipo y características del volcán • Determinar si es activo o peligroso • Investigar si ya existe algún mapa de peligros para ese volcán • Identificar las amenazas volcánicas de la zona de estudio y los sitios donde se han manifestado (con base en la reconstrucción del pasado eruptivo) • Determinar si las erupciones volcánicas son una preocupación en el área de interés • Determinar cuán inminente es una erupción

Fuentes de información para el nombre del volcán, ubicación, tasa de erupción, fecha de última erupción, efectos y peligros volcánicos: Smithsonian Institution. Global Volcanism Network (Washington D.C.: Smithsonian Institution) y Simkin, T., and Siebert, L., 1994, Volcanoes of the World.

2.4.1 Identificación de un volcán activo

Si se tiene la seguridad de la cercanía de un volcán al lugar donde vivimos, es importante saber si es activo o no. Un volcán activo presentará varios fenómenos que son fáciles de reconocer.

Fumarolas: Un fenómeno muy común en volcanes activos es la presencia de fumarolas. Las fumarolas son las salidas de vapor de agua, y otros gases, a temperaturas muy altas, alrededor de 100 °C, a través de grietas que se encuentran sobre el volcán y en ocasiones a sus alrededores.

Azufre: La presencia de azufre puede ser algo común en volcanes activos. El azufre es un mineral de color amarillo, de textura suave y olor fétido. El azufre siempre se acumula en el cráter del volcán y en las zonas de fumarolas, en forma de roca o como parte de otras rocas.

Sismos: Los sismos aunque de baja magnitud, son otro fenómeno que se presenta en volcanes activos. México es un país en el que ocurren muchos sismos, sin embargo muy pocos son de origen volcánico.

Deslaves o desgajamientos: Otro fenómeno que puede presentarse en un volcán activo son los deslaves o desgajamientos de tierra. Los derrumbes en ocasiones son provocados por la actividad interna sobre terrenos muy empinados, pero también pueden presentarse sin actividad volcánica, a causa de lluvias intensas que reblandezcan la tierra. La tala excesiva en zonas volcánicas también puede producir desgajamientos de tierra sin que esto sea producto de la actividad volcánica.

Aunque todos estos fenómenos son comunes en volcanes activos, la presencia de uno solo de éstos no necesariamente significa que un volcán está activo, pero la combinación de ellos si puede significar algo acerca del estado del volcán.

2.5 EVALUACIÓN DEL PELIGRO VOLCÁNICO

El “*peligro*” o “*amenaza*” está relacionada con la posible ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural, que puede manifestarse en un sitio y durante un tiempo de exposición prefijado. Técnicamente, se expresa como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con un nivel de severidad, en un sitio específico y durante un periodo de tiempo.

Desafortunadamente, debido a la complejidad de los sistemas físicos en los cuales un gran número de variables pueden condicionar el proceso, la ciencia aún no cuenta con técnicas que le permitan modelar con alta precisión dichos sistemas y por lo tanto los mecanismos generadores de cada una de las amenazas. Por esta razón, la evaluación de la amenaza, en la mayoría de los casos, se realiza combinando el análisis probabilístico con el análisis del comportamiento físico de la fuente generadora, utilizando información de eventos que han ocurrido en el pasado y modelando con algún grado de aproximación los sistemas físicos involucrados.

En otras palabras, para poder cuantificar la probabilidad de que se presente un evento de una u otra intensidad durante un periodo de exposición, es necesario contar con información, lo más completa posible, del número de eventos que han ocurrido en el pasado y de la intensidad que tuvieron los mismos.

El peligro o amenaza volcánica alrededor de un volcán puede representarse de varias formas. La más utilizada se basa en el principio de que un volcán activo es capaz de repetir o exceder lo que ha hecho en el pasado.

Igualmente, es importante diferenciar entre un "evento posible" y un "evento probable", puesto que el primero se refiere a un fenómeno que puede suceder, mientras que el segundo se refiere a un fenómeno esperado debido a que existen razones o argumentos técnico-científicos para creer que ocurrirá o se verificará en un tiempo determinado.

Por otra parte, es común en la literatura técnica utilizar el concepto de "periodo de retorno" o intervalo de recurrencia de un evento, que corresponde al tiempo "promedio" entre eventos con características similares en una región. Este es un concepto estadístico importante de tener en cuenta, ya que en ocasiones se tiene la idea errónea de que este intervalo es determinístico; como ejemplo, si el periodo de retorno de una erupción volcánica es de 250 años y hace diez que se presentó, esto no significa que falten otros 240 años para que se repita (Fiske 1984).

En resumen, evaluar la amenaza es "pronosticar" la ocurrencia de un fenómeno con base en: el estudio de su mecanismo generador, el monitoreo del sistema perturbador y/o el registro de eventos en el tiempo. Un pronóstico puede ser a corto plazo, generalmente basado en la búsqueda e interpretación de señales o eventos premonitorios; a mediano plazo, basado en la información probabilística de parámetros indicadores, y a largo plazo, basado en la determinación del evento máximo probable en un periodo de tiempo.

Es importante diferenciar la amenaza o peligro del evento que la caracteriza, puesto que la amenaza significa la potencialidad de la ocurrencia de un evento con cierto grado de severidad, mientras que el evento en sí mismo representa al fenómeno en términos de sus características, su dimensión y ubicación geográfica.

2.5.1 Probabilidad de ocurrencia del peligro

Al analizar la amenaza o peligro volcánico debe empezarse por definir el intervalo de tiempo considerado. Un criterio podría ser el considerar todos aquellos eventos que pudieran producirse en los próximos 50 ó 60 años. Es necesario destacar la importancia que tiene establecer una buena base cronológica de los eventos ocurridos con anterioridad, con el fin de poder determinar con la menor incertidumbre los posibles periodos de retorno de cada uno de los eventos. Sin embargo, se debe tener en consideración que son pocos los volcanes en los que se puede disponer de un catálogo completo de erupciones, en general sólo se contará con unos pocos centenares de años de historia.

La mayoría de los volcanes entran en erupción en intervalos de tiempo irregulares. El tiempo transcurrido entre dos erupciones se conoce como tiempo de reposo y el tiempo de erupción corresponde a la duración de la misma.

Un primer paso en la evaluación del peligro, consiste en la estimación de la probabilidad de que ocurra alguna erupción o manifestación específica de magnitud suficiente para ser potencialmente destructiva, en un intervalo de tiempo determinado. Para ello se utilizan dos parámetros fundamentales. Uno es el Índice de Explosividad Volcánica *VEI* (tabla 2.2), que representa una medida de la energía total que libera una erupción y de la tasa a la que libera esa energía. El otro es la tasa eruptiva, esto es la tasa media a la que han ocurrido erupciones de cierta magnitud o rango de magnitudes en el tiempo $\lambda(VEI)$. El inverso de este parámetro es el tiempo medio de recurrencia para ese tipo de erupciones $\tau(VEI) = 1/\lambda(VEI)$.

En términos generales, existe una cierta correlación entre el *VEI* y el potencial destructivo que puede tener una erupción. Esta correlación no es muy precisa, ya que en ocasiones erupciones con valores *VEI* bajos o moderados pueden resultar muy dañinas. Sin embargo, las erupciones con *VEI* altos tienden a ser siempre destructivas para el entorno de los volcanes que las originan.

Al clasificar las erupciones por su tamaño o magnitud, se tiene que los patrones de ocurrencia de erupciones de un volcán pueden ser descritos por distribuciones estadísticas utilizadas

para describir procesos estocásticos definidos como eventos que ocurren en el tiempo y que satisfacen una serie de condiciones básicas:

- Los eventos ocurren secuencialmente a lo largo del tiempo. Si se utilizan intervalos de tiempo de duración adecuada, pueden obtenerse los resultados excluyentes: en un intervalo de tiempo dado, ocurre o no ocurre una erupción .
- La probabilidad de ocurrencia de un evento es constante.
- Cada evento es estadísticamente independiente.

Este tipo de secuencia se denomina proceso de Bernoulli y permite representar numerosos fenómenos naturales y artificiales, entre ellos, las secuencias de erupciones volcánicas explosivas en volcanes, o en grupos de volcanes. (De la Cruz-Reyna, 1991, 1993, 1996; De la Cruz-Reyna y Carrasco-Núñez, 2002).

Para llevar a cabo el análisis estadístico, se considerarán las tasas de ocurrencia como el número de casos favorables (eventos de Bernoulli) en una población de casos totales (número de años de cada muestra). Entonces, dada una probabilidad de ocurrencia p , y una probabilidad de no-ocurrencia $1-p$, el número de ocurrencias en un número dado de intentos (o intervalos de tiempo) de Bernoulli, está dado por la distribución Binomial. La probabilidad de x ocurrencias en n intentos o intervalos es:

$$B(n,x) = {}_n C_x p^x (1-p)^{n-x}$$

Donde ${}_n C_x$ es el número de combinaciones de n elementos tomados de x a la vez.

Considerando que el proceso de Bernoulli describe la secuencia eruptiva de cualquier volcán, el cual se considera estacionario, ya que un proceso no-estacionario rendiría resultados diferentes, una primera estimación de las probabilidades de ocurrencia de futuras erupciones puede ser obtenida de las tasas asociadas a las categorías de peligro, usando distribuciones probabilísticas simples, como la Binomial.

Todavía no es posible un pronóstico exacto del carácter de una erupción futura, sin embargo, sí es posible determinar la probabilidad de ocurrencia, el tipo de erupción esperada y la extensión de las áreas vulnerables, a través del adecuado uso de los patrones de la actividad volcánica pasada.

Debido a esto es necesaria la reconstrucción cronológica de los eventos eruptivos pasados de un volcán determinado. La clasificación del tamaño y magnitud de la actividad pasada es importante en la identificación del patrón o distribución estadística que describe la ocurrencia temporal de las erupciones.

Como se mencionó anteriormente, el primer paso para determinar la probabilidad de ocurrencia de una erupción de determinado tamaño o magnitud, es el conocer la frecuencia con que han ocurrido las erupciones en el pasado, es decir, la tasa de ocurrencia de las erupciones en un volcán de acuerdo a su Índice de Explosividad (tabla 2.2), esta tasa puede obtenerse mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{\text{núm. total de erupciones en la categoría VEI}}{\text{duración total de la muestra}}$$

el inverso $1/\lambda$ representa el tiempo promedio entre erupciones.

No en todos los casos es posible contar con un registro completo de la actividad pasada de un volcán. En esos casos la reconstrucción cuantitativa de la historia de un volcán sobre un periodo suficientemente largo, puede proporcionar una muestra representativa de su comportamiento pasado.

Como ejemplo se presenta la probabilidad de ocurrencia de por lo menos una erupción de VEI 2 y 4 en el volcán Citlaltépetl en los próximos 50 años.

VEI	Número de erupciones
2	6 erupciones en los últimos 467 años
4	3 erupciones en los últimos 13,000 años

tasa de ocurrencia λ

VEI	λ
2	0.0128
4	0.000231

Bajo el supuesto que el proceso de Bernoulli describe la secuencia eruptiva estacionaria del volcán, la estimación de la probabilidad de ocurrencia de erupciones en los próximos 50 años puede obtenerse usando una distribución Binomial.

Utilizando la distribución estadística binomial $B(n, x) = C_x P^x (1 - P)^{n-x}$, se tiene:

VEI	λ	$1/\lambda$ (años)	$P_1(50)$ (Probabilidad de que ocurra por lo menos una erupción en los próximos 50 años)
2	0.0128	78	0.48
4	0.000231	4329	0.011

Es decir que en el volcán Citlaltépetl en los últimos 467 años, ha ocurrido una erupción con VEI=2 en promedio cada 78 años, y la probabilidad de que ocurra una en los próximos 50 años es de 0.48. Estas cifras sólo intentan dar una idea del orden de las probabilidades. Cada caso debe ser analizado en el contexto de la historia eruptiva del volcán en cuestión.

El análisis de los patrones de ocurrencia de una erupción explosiva ayudará a hacer estimaciones cuantitativas de los niveles de amenaza.

2.5.2 Mapas de peligros volcánicos

En el estudio de la peligrosidad volcánica se ha tenido la necesidad de dividir a cada una de las manifestaciones volcánicas en elementos muy sencillos que son evaluados en forma independiente, constituyendo cada uno de ellos un peligro volcánico. Los peligros volcánicos pueden prolongarse durante meses y los factores de peligro son múltiples: lahares, flujos de lava, gases, etc.

Los peligros volcánicos tienen características físicas como son la magnitud, es decir, su volumen y energía, su alcance, duración y tiempo de propagación. La información de cada peligro debe ser representada como una capa en un sistema de información geográfica, por lo que deben estar adecuadamente referenciados y cuantificados, con la finalidad de conformar mapas de peligro volcánico.

Cada peligro volcánico debe ser analizado individualmente y deben determinarse los parámetros físicos necesarios para la modelación numérica del mismo. Los modelos proporcionarán cierta semejanza al fenómeno y darán a conocer con anticipación los alcances máximos, lo cual permitirá evaluar el grado de exposición para cada zona que circunda al volcán.

Para la identificación de los mecanismos eruptivos se debe considerar toda la información disponible para aquellos eventos ocurridos desde el comienzo del Cuaternario. Esta información se obtiene a partir del análisis de los registros geológicos, también se deben conocer las áreas de origen de cada uno de los peligros, y a partir de esta información se podrán aplicar modeladores para simular los efectos que un evento tipo podría llegar a producir.

Los mapas de peligros volcánicos, representan cartográficamente la extensión o área probable que puede ser afectada por todos los productos que un volcán es capaz de generar durante una erupción, y que son capaces de producir daños en su entorno.

Los estudios primordiales para su elaboración son: (1) levantamiento geológico del volcán y área volcánica, (2) caracterización geoquímica de los productos (lavas, tefras, etc.), (3) cronoestratigrafía detallada de los depósitos, características y distribución, (4) características y distribución de lava y depósitos laháricos, (5) establecer la evolución y comportamiento eruptivo y (6) conocer las características de las erupciones históricas, si las hay.

Los mapas de peligro son dinámicos y tienen vigencia, generalmente, hasta que se presenta una nueva erupción. Debido a que las transformaciones que ocurren durante y después de una erupción cambiarán el relieve y habrá nuevas condiciones que harán necesario modificar el mapa. Cuando las erupciones son pequeñas, las transformaciones son pequeñas, y en consecuencia el mapa mantendrá su vigencia.

Un mapa de peligros representa las áreas que pueden ser afectadas por diferentes procesos volcánicos, mediante una zonificación basada en datos geológicos, cronológicos y morfoestructurales. De esta forma, las áreas de mayor peligro de ser afectadas por lahares, flujos piroclásticos, etc., serán nuevamente afectadas por estos procesos en una futura erupción. Sin embargo, no puede descartarse la posibilidad de que ocurran erupciones de gran magnitud que superen la zonificación del mapa. No obstante, se considera poco probable esta situación en un plazo corto a mediano.

Los mapas de peligros deben también distinguir entre los riesgos primarios, como los flujos piroclásticos, o las lluvias de fragmentos, describiendo sus velocidades, alcances y efectos sobre el hombre y el medio, y los riesgos secundarios, incluyendo todos aquellos efectos que pueden presentarse durante o después de la erupción, como flujos de lodo y otros impactos sobre el medio ambiente. Normalmente estos mapas se representan en escalas entre 1:50,000 y 1:250,000. Sin embargo, un mejor detalle puede obtenerse en escalas de 1:25,000 o de 1:10,000.

A la fecha sólo han sido publicados los mapas de peligros para el volcán Popocatepetl (Macías *et al*, 1995), el mapa más reciente publicado para el volcán de Colima (Navarro y Cortés, 2003) y del Pico de Orizaba (Sheridan *et al*, 2001). Otro mapa anterior del volcán de Colima

(Martín del Pozzo, 1995) publicado en otra escala está disponible en el Instituto de Geofísica de la UNAM. Asimismo, está en desarrollo un mapa de peligros para el volcán Tacaná (Macías *et al*, en preparación). La figura 2.11 es un ejemplo de mapa de peligros volcánicos del Pico de Orizaba.



Figura 2.11 Mapa de Peligros del volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba). (Elaborado por: Sheridan *et al*, UNAM)

En resumen, un mapa de peligros representa una situación presente, una realidad natural frente a las amenazas volcánicas, con las diversas zonas y grados de peligros, en un territorio en torno al volcán. Es primordial la utilización de un mapa de peligros para reducir el impacto de los procesos volcánicos en una zona amenazada por un volcán peligroso o activo, a través de planes de emergencia, planificación de uso del terreno, etc., con la finalidad de mitigar el riesgo.

2.5.3 Criterios de evaluación de la vulnerabilidad

Para lograr una evaluación completa, es necesario determinar la vulnerabilidad de los distintos elementos de la sociedad como son personas, bienes, medios de producción, obras de infraestructura, etc., con respecto a cada una de las manifestaciones volcánicas.

El “**peligro**” es la probabilidad de que alguna manifestación volcánica específica y potencialmente dañina, como por ejemplo los flujos piroclásticos o la lluvia de cenizas, pueda presentarse en un área o región particular en el entorno de un volcán, en un intervalo de tiempo determinado.

La “**vulnerabilidad**” es el grado o porcentaje de pérdida o daño que puede sufrir una población, infraestructura o en la productividad, por efecto de alguna de las manifestaciones volcánicas.

Si el peligro o probabilidad de ocurrencia, y la vulnerabilidad se expresan como fracciones entre 0 y 1, el riesgo se puede cuantificar como una cantidad entre 0 y 1 que representa la proporción o probabilidad de que ocurra un daño o pérdida de vidas, bienes, o productividad en una zona volcánica por efecto de una manifestación eruptiva.

En el análisis del riesgo volcánico, es muy importante distinguir claramente la diferencia entre el fenómeno volcánico (erupciones) y su impacto (el efecto que pueden llegar a tener sobre el entorno del volcán), que si es grande puede transformarse en un desastre. Por lo que si bien no es posible evitar la ocurrencia de erupciones, sí es posible evitar que se transformen en desastres.

La naturaleza de las manifestaciones volcánicas como son flujos piroclásticos, flujos de lodo o lahares, flujos de lava, y avalanchas de escombros producidas por derrumbes y deslizamientos hacen muy difícil definir funciones de vulnerabilidad que permitan establecer el porcentaje o proporción de pérdida de algún elemento de la estructura social ante esos fenómenos.

Tabla 2.4 Resumen de las propiedades físicas estimadas de algunos peligros volcánicos

Peligros	Distancias hasta las cuales se han experimentado efectos		Área afectada		Velocidad		Temperatura (°C)
	Promedio (km)	Máximo (km)	Promedio (km ²)	Máximo (km ²)	Promedio (m/s)	Máximo (m/s)	
Caída de cenizas (tefra)	20-30	>800	100	>100,000	15	30	Usualmente la del medio ambiente
Proyectiles balísticos	2	15	10	80	50-10	100	1000
Flujos piroclásticos y derrumbes o avalanchas	10	100	5-20	10,000	20-30	100	600-800
Lahares	10	300	5-20	200-300	3-10	>30	100
Flujos de lava	3-4	>100	2	>1,000	5	30	700-1150
Lluvia ácida y gases	20-30	>2,000	100	20,000	15	30	Medio ambiente
Ondas de choque	10-15	>800	1,000	>100,000	300	500	Medio ambiente
Rayos	10	>100	300	3,000	12x10 ⁵	12X10 ⁵	Por encima del punto de incandescencia

Fuente: Modificado de Blong, R.H. Volcanic Hazards (Sydney, Australia: Macquarie University Academic Press, 1984)

La experiencia de numerosas erupciones sugiere asignar una vulnerabilidad del 100% a cualquier elemento de la sociedad ante cualquiera de las manifestaciones directas. Esto quiere decir, que ante estas manifestaciones puede esperarse una pérdida total de estructuras para habitación o usos laborales, obras de infraestructura, bosques y tierras laborables (por lo menos temporalmente).

Tabla 2.5 Periodos de alerta de los peligros volcánicos y capacidad para causar daño

Peligros	Periodo de alerta	Capacidad para causar daño severo	Probabilidad de lesiones severas o muerte
Caída de tefra	Minutos a horas	Menor-moderado	Bajo-moderado
Proyectiles balísticos	Segundos	Extremo	Muy alto
Flujos piroclásticos y derrumbes o avalancha	Segundos	Extremo	Extremo
Lahares	Minutos a horas	Muy alto	Muy alto
Flujos de lava	Usualmente horas o días	Extremo	Muy alto
Lluvia ácida y gases	Minutos a horas	Muy bajo	Usualmente muy bajo
Ondas de choque	Segundos a minutos	Menor	Muy bajo
Rayos	Instantáneo	Moderado	Muy alto

Fuente: Modificado de Blong, R.H. Volcanic Hazards (Sydney, Australia: Macquarie University Academic Press, 1984).

La vida humana y de animales también es amenazada en forma total por las manifestaciones volcánicas, con la posible excepción de los flujos de lava, ya que por la lentitud de su avance, es por lo general posible escapar de ellos.

Tabla 2.6 Probables efectos de los peligros volcánicos

Peligro	Efecto
Proyección de bombas y escorias. Cenizas	Daños por impacto. Incendios.
Caída de piroclastos. Cenizas	Recubrimiento por cenizas. Colapso de estructuras. Daños a la agricultura.
Lava y Domos	Daños a estructuras. Incendios. Recubrimiento por lava.
Coladas y oleadas piroclásticas. Flujos piroclásticos	Daños a estructuras. Incendios. Recubrimiento por cenizas.
Lahares	Daños a estructuras. Arrastres de materiales. Recubrimiento por barros.
Colapso total o parcial del edificio volcánico	Daños a estructuras. Recubrimiento por derrumbes. Avalanchas. Tsunami inducido.
Deslizamiento de laderas	Arrastre de materiales. Recubrimientos por derrumbes. Daños a estructuras.
Gases volcánicos	Envenenamiento. Contaminación de aire y agua.
Onda de choque	Rotura de cristales y paneles
Temblores volcánicos	Colapso del edificio volcánico. Deslizamiento de masas.
Deformación del terreno	Fallas. Daños a estructuras
Variaciones en el sistema geotérmico de acuíferos	Cambios en la temperatura y calidad del agua

Por lo tanto, ante las manifestaciones volcánicas, pueden esperarse pérdidas casi totales de bienes, y la única forma de proteger la vida humana es por medio de evacuaciones preventivas. Poblaciones e instalaciones estratégicas pueden ser protegidas por medio de diques y otras estructuras especialmente diseñadas para controlar el curso de los flujos de lodo y reducir su energía.

Las tablas 2.4 a 2.8 muestran las características de las manifestaciones volcánicas que determinan la vulnerabilidad ante ellas, sus velocidades y sus alcances, los tiempos característicos en que se desarrollan, etc.

Tabla 2.7 Víctimas de erupciones volcánicas de 1783 a 1997

Evento	No. de víctimas	Porcentaje
Flujos Piroclásticos	59,200	26.9%
Avalanchas de escombros	9,962	4.5%
Cenizas y Proyectiles	9,206	4.1%
Flujos de lava	618	0.3%
Lahar (lodo volcánico)	37,993	17.1%
Tsunami volcánico	37,420	16.9%
Hambruna y Epidemias	67,144	30.3%
Otros	64	0.03%
Total	221,907	100.03%

Tabla 2.8 Tipos de erupciones volcánicas y sus efectos

Erupciones efusivas				
Manifestación	Peligro asociado	Velocidad	Alcance	Efecto más frecuente
Lava líquida	Flujos de lava	Baja	Corto	Destrucción del terreno
Cenizas	Lluvia de cenizas	Media	Intermedio	Acumulación de ceniza
Erupciones explosivas				
Fragmentos de todos tamaños	Flujos piroclásticos	Muy alta	Corto a intermedio	Devastación
Cenizas	Lluvia de cenizas	Media	Largo a muy largo	Acumulación de cenizas, bloqueo de drenajes
Lodo (agua y fragmentos)	Flujo de lodo (lahar)	Media a alta	Intermedio a largo	Devastación
Derrumbe o deslizamiento	Avalancha de escombros	Alta a muy alta	Intermedio a largo	Devastación

2.5.4 Riesgo volcánico

El riesgo volcánico involucra al peligro volcánico tal como se describió anteriormente, más la distribución y vulnerabilidad de la población y de la infraestructura de producción, y comunicaciones alrededor del volcán. Esta información también puede representarse en un mapa convencional, pero considerando el gran número de datos que comprende y su variabilidad en el tiempo, es más conveniente procesarla y representarla por medio de un sistema de información geográfica.

Con la información de los mapas de peligro volcánico, la base de datos topográficos a una escala adecuada y los datos de la distribución de la población, es posible elaborar una zonificación del riesgo representada en mapas detallados al nivel de municipios o poblaciones individuales, en los que puedan identificarse los sitios vulnerables a peligros específicos.

2.5.5 Metodología a seguir para determinar la peligrosidad volcánica en un área

El objetivo de esta guía es proporcionar los elementos que lleven, en forma metódica, a evaluar cada uno de los factores de peligro o amenaza en primer lugar, y de vulnerabilidad después, para lograr una adecuada percepción del riesgo. Esta percepción permitirá diseñar las medidas óptimas de preparación y prevención para enfrentar, reducir o evitar los riesgos volcánicos en México.

1. En un mapa de México, localizar el área o comunidad y definir si se encuentra dentro de alguna de las zonas volcánicas de México (Faja volcánica Mexicana, Península de Baja California y Chiapas), y/o cerca de un volcán considerado peligroso (figura 2.1).
2. Si la zona de interés se encuentra dentro de las zonas volcánicas de México. Ubicar la zona de estudio en un plano topográfico escala 1:500,000 o 1:250,000. Estos planos los elabora el INEGI.
3. En primer lugar se debe ubicar la posición geográfica de las comunidades cercanas respecto a uno o varios de los volcanes del capítulo 2.1.1 Trazar un círculo de un mínimo de 35 km a un máximo de 100 km de diámetro, tomando como centro el área de interés, e identificar los volcanes dentro del círculo (figura 2.12). La distancia de 35 a 100 km es arbitraria, basada en la distancia desde un volcán dentro de la cual los lahares, cenizas, flujos piroclásticos, etc. pueden ser peligrosos. El radio puede variar, según factores tales como diferencias en elevación entre el volcán y las áreas amenazadas, las pendientes, la morfología de los canales, y los vientos predominantes.

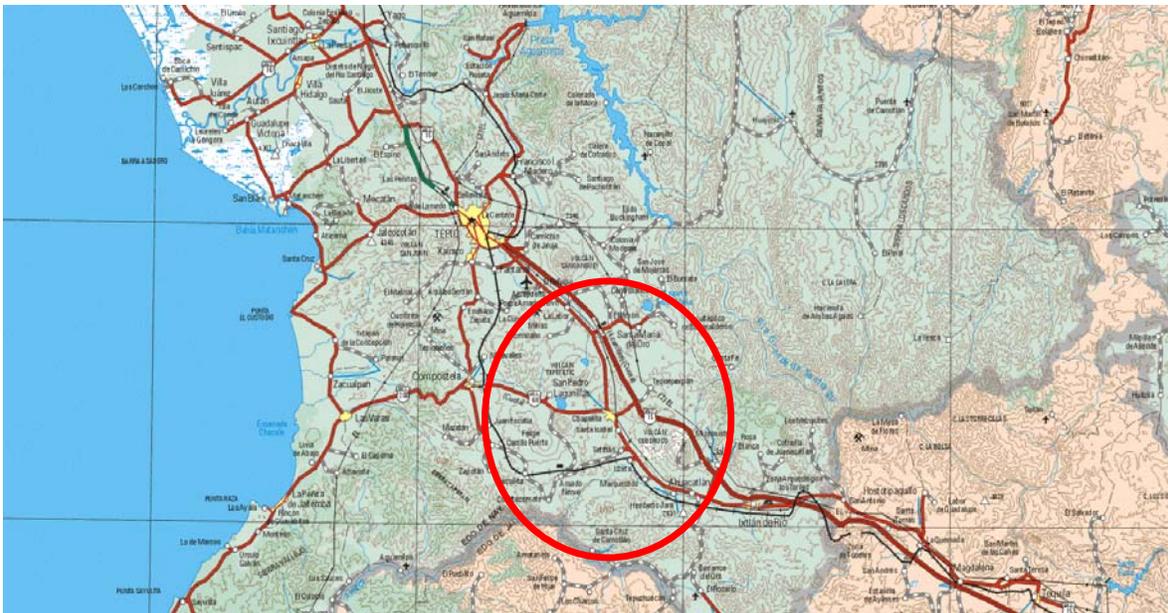


Figura 2.12 Mapa topográfico de Nayarit. La población Chapalilla encerrada en un círculo de 100 km, el volcán Ceboruco queda dentro del círculo

4. Si su comunidad se asienta a una distancia menor a 35 km de alguno de los volcanes o campos volcánicos listados en las categorías 1 a 3, señaladas en la sección 2.1.1, deben llevarse a cabo las medidas mínimas de evaluación y prevención entre los que se incluye la elaboración de un mapa de peligros. En el caso de las comunidades, bienes o centros de producción localizados en barrancas, depresiones o valles asociados con los sistemas de drenaje hidrológico de cualquiera de los volcanes en las categorías 1 a 3, la influencia de productos o manifestaciones peligrosas, como flujos de lodo, pueden extenderse a distancias considerablemente mayores. Debe tomarse en cuenta que los efectos derivados de las lluvias de cenizas pueden extenderse sobre distancias aún mayores que los lahares y flujos piroclásticos.

5. Si se trata de un volcán o campo volcánico de las categorías 4, 5 o “con información insuficiente”, se recomienda coordinarse con su unidad local o estatal de Protección Civil, para que se solicite a una institución de investigación una evaluación de nivel de la actividad y probabilidad (peligro) asociado al volcán en cuestión.
6. Consultar el CD “Volcanoes of México” del Smithsonian Institution, Global Volcanism Program, para obtener información geológica y eruptiva del volcán o volcanes del área de interés, o solicitar al CENAPRED la información contenida en el CD. En las figuras 2.2 a 2.5, se representan gráficamente los volcanes contenidos en el CD.
7. Si en el CD no existiera información del volcán, será necesario buscar bibliografía e información de todo tipo relacionada con el volcán, desde artículos científicos, hasta historias y crónicas locales. Buscar si ya ha sido elaborada la historia eruptiva del volcán (tabla 2.9), para lo cual se sugiere contar con el apoyo de algún especialista, como ingenieros, geólogos, geofísicos, historiadores, etc.

Tabla 2.9 Historia eruptiva simplificada del volcán Popocatepetl

Años	Tiempo transcurrido entre erupciones (en años)	Descripción de la actividad
24,000		Gran erupción tipo Sta. Elena, destruye edificio volcánico previo
14,000	9,000	Gran erupción Pliniana, lluvia de cenizas y pómez en la Cd. de México
14,000-5,000	9,000	Varias erupciones grandes, al menos 4
3,000a.C.	2,000	Erupción grande
200 a.C.	2,800	Erupción grande
800	1,000	Erupción grande
1354-1363	554	Erupción menor y fumarolas
1512-1530	149	Erupción moderada y fumarolas
1539-1549	9	Erupción moderada con cenizas y pómez
1571	22	Emisión de cenizas
1592	21	Fumarolas y emisión de cenizas
1642	50	Fumarolas y emisión de cenizas
1663-1665	11	Erupción moderada y emisión de cenizas
1697	32	Fumarolas
1720	23	Erupción leve y actividad fumarólica
1804	84	Fumarolas leves
1919-1927	115	Moderada. Emisión de cenizas y pómez
1994-?	67	Moderada?
Promedio	47 años	Tomando desde 1512 y quitando el dato mayor y menor

Fuente: De la Cruz-Reyna, *et al.*, Historia de la actividad reciente del Popocatepetl (1354-1995). Volcán Popocatepetl: Estudios realizados durante la Crisis de 1994-1995 (Centro Nacional de Prevención de Desastres. 3-22, 1995).

8. Si no ha sido elaborada la historia eruptiva del volcán. Hacer una reconstrucción de la actividad histórica del volcán.
 - a) Actividad eruptiva registrada en documentos históricos (Archivo general de Indias, crónicas, etc.).
 - b) Definir el tipo de actividad volcánica registrada (fumarólica, magmática, caída o lluvia de cenizas, flujos, etc.).
 - c) Alcances (distancia hasta donde se propagó y grado de afectación).
 - d) Impacto sobre las poblaciones.

9. Solicitar a un especialista, para lo que será necesario consultar al departamento de geología, geografía o vulcanología de la universidad local, o directamente a los Institutos de Geofísica y Geología de la UNAM o al CENAPRED, la realización de estudios geológicos del área, que determinen la naturaleza, distribución, volumen y fechas de los productos eruptivos.
10. Tomando como base la reconstrucción de la actividad histórica y la obtenida a través de los estudios geológicos, se podrá obtener el tipo de erupciones que ha producido el volcán en el pasado, así como la periodicidad o frecuencia con que se han presentado. Es decir, cada cuanto tiempo ha tenido actividad el volcán y de qué tipo.
11. Con base en lo anterior se podrá determinar si el volcán representa un peligro a corto o largo plazo. Es decir, si la periodicidad de las erupciones es de 100 años o menos, se considera un peligro a corto plazo; pero si su periodicidad es mayor a 100 años se considera de largo plazo. De peligro inminente son aquellos volcanes para los cuales la evidencia geológica confiable señala que se puede esperar una erupción en menos de 10 años.
12. Si se considera que el volcán representa un peligro, establecer si el volcán presenta actualmente manifestaciones de actividad o no (2.4.1 Identificación de un volcán activo, de este documento).
13. Si el volcán representa un peligro (principalmente volcanes de las categorías 1, 2 y 3) será necesario utilizar el mapa de peligros del volcán para determinar zonas vulnerables. Si no existe un mapa de peligros, será necesaria su elaboración por especialistas (geólogos-vulcanólogos).
14. La elaboración del mapa de peligros debe llevarla a cabo un especialista, sin embargo, a continuación se mencionan algunos puntos con relación a su elaboración. Para elaborar el mapa se requiere, ubicación del volcán en cartas topográficas escala 1:50 000, 1:25 000 o 1:10 000 de preferencia (cartas elaboradas por el INEGI).
15. Cada tipo de peligro volcánico (lahares, flujos piroclásticos, coladas de lava, etc.) forma un tipo especial de depósito geológico. A partir de la información obtenida del análisis de los registros geológicos, dibujar sobre el mapa topográfico usando distintos colores, los diferentes tipos de productos eruptivos originados por el volcán, es decir, las diferentes amenazas volcánicas de la zona de estudio, su distribución y máxima distancia alcanzada (figura 2.12).

Para esto se podría utilizar:

- Flujos piroclásticos (rojo)
- Derrumbes y avalanchas (amarillo)
- Flujos o coladas de lava (naranja)
- Lahares y zonas de inundación (verde oscuro)
- Bombas y proyectiles balísticos (verde claro)
- Cenizas y tefra (gris)

De preferencia dibujar cada peligro por separado en papel transparente sobre el mapa, esto facilitará la identificación de cuántos y cuáles peligros afectarían determinadas zonas.

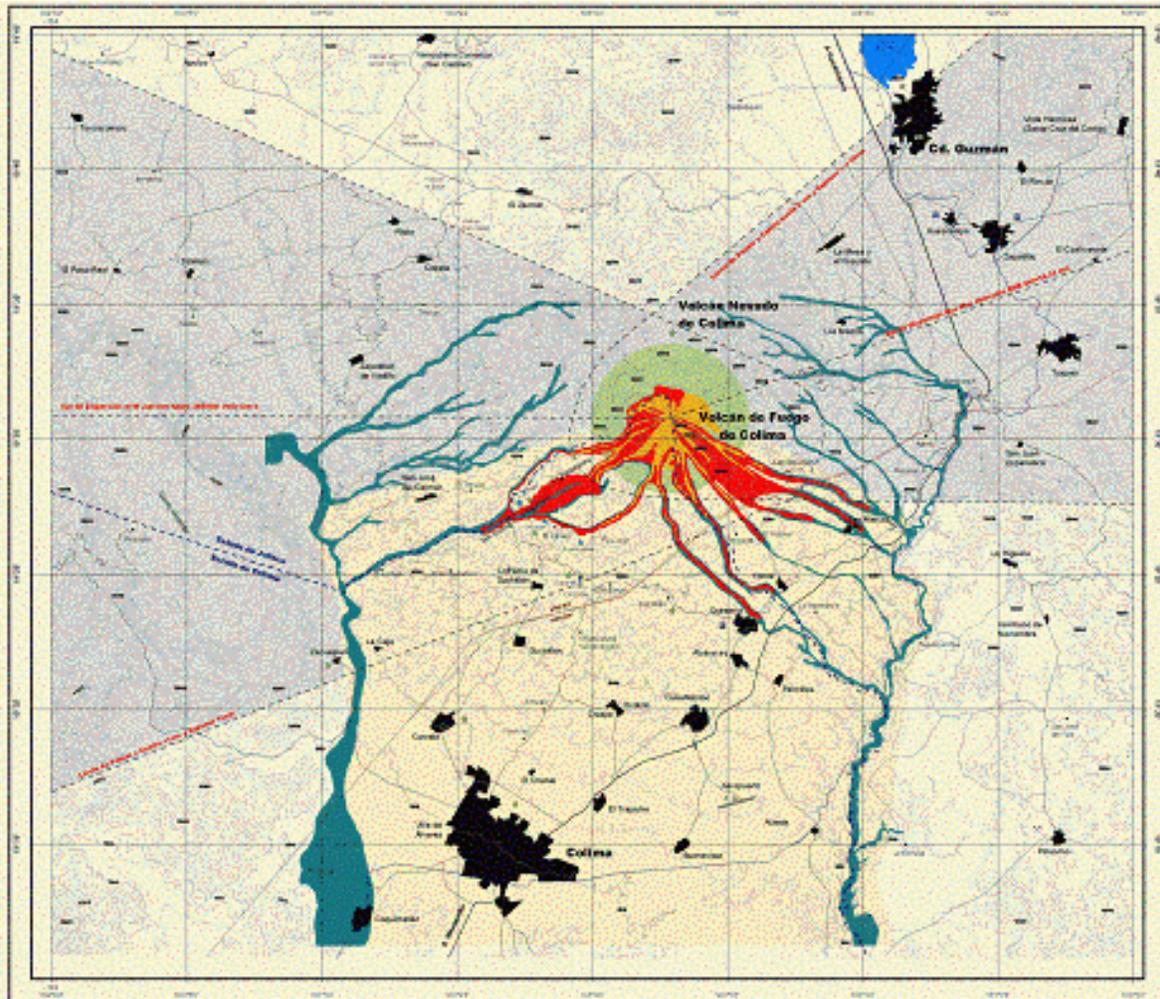


Figura 2.13 Peligros volcánicos del Volcán de Colima (elaborado por: C. Navarro y A. Cortés, Observatorio Vulcanológico, Universidad de Colima)

16. Reconocer y marcar en el mapa las colinas y los valles, dirección de la corriente de los flujos, inclinación de cuestras. Muchos de los peligros volcánicos fluyen cuesta abajo en los valles ya que siguen la "trayectoria de menor resistencia."
17. Cuantifique la evaluación de los efectos volcánicos por zonas de peligro y márkuelas sobre el mapa utilizando el color rojo para la Zona I, naranja para la Zona II y amarillo para la Zona III (figura 2.14):
 - a) **Zona de Peligro I** (peligro mayor, color rojo): Es la más cercana al volcán por lo que representa el mayor peligro. Es la más frecuentemente afectada por las erupciones, independientemente de la magnitud de la erupción. Es el área potencialmente afectada por la mayoría de los peligros volcánicos, como son, lluvia pesada de cenizas, grandes fragmentos de roca expulsados, flujos de material volcánico a altas temperaturas, etc.



Figura 2.14 Zonas de peligro I, II y III del volcán Popocatepetl (fragmento tomado de mapa elaborado por: J. Macías, et al., Instituto de Geofísica, UNAM)

- b) **Zona de Peligro II** (peligro moderado, color naranja): Representa un peligro menor que la anterior, ya que es menos frecuentemente afectada por erupciones, debido a que se encuentra a mayor distancia. Sin embargo, cuando las erupciones alcanzan esta área representan el mismo grado de peligrosidad que la Zona I. En erupciones pequeñas a moderadas, sólo es afectada por caída moderada de cenizas volcánicas.
 - c) **Zona de Peligro III** (peligro menor, color amarillo): Es la zona más alejada del volcán, y puede ser afectada por los mismos peligros que las anteriores, pero sólo por erupciones extraordinariamente grandes, que ocurren a intervalos de miles de años. Poco o nada afectada en erupciones moderadas a pequeñas.
18. Una vez obtenido el mapa de peligros, hacer una lista de los peligros volcánicos potenciales. Tomando en cuenta cualquier flujo de lodo, zonas de inundación y la existencia de glaciares, ya que esto afectará a las zonas más bajas. Siga los drenajes

afectados río abajo para identificar las zonas y poblaciones que pueden ser afectadas y consideradas como de peligro potencial.

19. Después de confirmar los peligros posibles para su área, marque sobre el mapa con diferentes colores esos peligros. Hacer una leyenda de su mapa de peligro que describa el tipo de peligro.
20. Hacer una lista por poblaciones, indicando los peligros que puedan afectar a cada una y el grado máximo de afectación (según reconstrucción histórica), así como industrias, tierras de cultivo y agrícolas.
21. Recopile información sobre censo de población en las áreas que pudieran ser afectadas (INEGI).
22. Recopile información sobre actividades, utilización del suelo, e infraestructura en las zonas potencialmente afectadas (INEGI e información local).
23. De acuerdo con la información anterior, realice una evaluación económica de las zonas potencialmente amenazadas por diversos peligros y de las condiciones humanas del área. La evaluación del impacto económico de la actividad eruptiva debe tener como fundamento el mapa de peligros.
24. Con la información de los mapas de peligro volcánico, la base de datos topográficos a una escala adecuada y los datos de la distribución de la población, es posible elaborar una zonificación del riesgo representada en mapas detallados al nivel de municipios o poblaciones individuales, en los que puedan identificarse los sitios vulnerables a peligros específicos.
25. La elaboración del mapa de peligros (figuras 2.13, 2.14 y 2.15) es absolutamente necesaria para el planeamiento de la utilización del suelo, la elaboración de los planes de emergencia adecuados, y los esfuerzos educativos para la comunidad.
26. Si bien el peligro es una característica del fenómeno que no puede ser modificada, la vulnerabilidad puede ser reducida en forma considerable a través de la “preparación”.

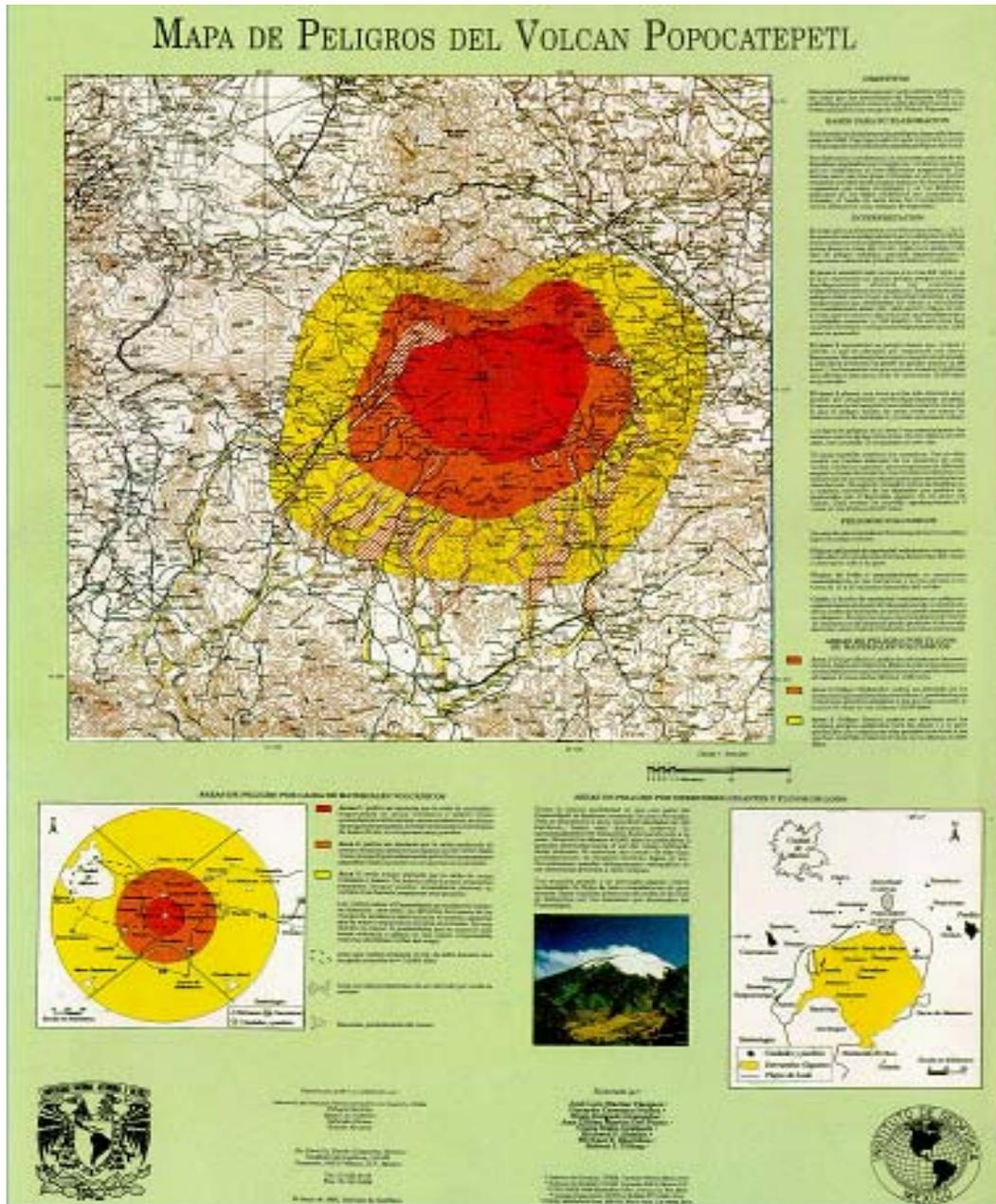


Figura 2.15 Mapa de Peligros del volcán Popocatépetl (elaborado por: J. Macías, et al., Instituto de Geofísica, UNAM)

Una vez identificados los peligros y se haya zonificado el riesgo, es necesario desarrollar un grado de preparación, entendida como una capacidad de respuesta ante la posibilidad de actividad volcánica, o de cualquier otra amenaza. La preparación involucra una clara comprensión, por parte de la población vulnerable y de las autoridades responsables de su protección, del fenómeno natural y de todas sus posibles manifestaciones destructivas, y la elaboración de medidas de reducción de la vulnerabilidad (reubicación de poblaciones ubicadas en zonas de alto riesgo, reforzamiento de techos en viviendas, restricciones para uso de las tierras, albergues, rutas de evacuación, etc.). La preparación considera también el desarrollo de planes operativos de respuesta ante la posibilidad de que esas manifestaciones se presenten.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En México existen más de 2,000 volcanes, algunos de ellos, aproximadamente una docena, tienen el potencial para producir erupciones, que en ocasiones pueden resultar muy destructivas, como lo fueron las del volcán Chichón, Chiapas, en marzo y abril de 1982.

Los tipos de erupciones pueden ser muy variados en naturaleza y alcance. Una evaluación de la probabilidad de que un volcán dado ha de erupcionar en un periodo específico de tiempo, el tipo de erupción y la estimación de seguridad de que tal erupción ocurra, está basada en la información de erupciones anteriores y en el comportamiento actual del volcán. Si los datos de la historia del volcán son adecuados, entonces la frecuencia de anteriores erupciones puede ser determinada así como la posible frecuencia de futuras erupciones.

Los mapas de amenazas constituyen la herramienta más importante para diseñar sistemas de monitoreo y planes de emergencia, así como las estrategias socioeconómicas de desarrollo para una región determinada. Desgraciadamente, tales mapas no existen para la mayoría de los volcanes activos de México. Por esta razón, es importante promover la realización de estos mapas que representan una valiosa herramienta para la toma de decisiones en relación con la evacuación y otras actividades de respuesta. El siguiente paso será determinar la vulnerabilidad y finalmente lograr una completa percepción del riesgo volcánico.

La utilización de los Mapas de Peligros Volcánicos, el monitoreo efectivo de los volcanes combinado con la preparación de planes de contingencia, reduce el riesgo de pérdida de vidas y de propiedades, para lograr esto se recomienda:

Solicitar ayuda exterior apropiada para entrenar a los profesionales locales que podrían hacer los mapas de peligro, y estudios económicos del impacto.

Conformar un grupo interdisciplinario informal, incluyendo vulcanólogos, economistas, geógrafos, ingenieros, planificadores, que trabajen en equipo, centrándose en el mapa de peligros.

Hacer una investigación sobre la probabilidad de acontecimientos vulcanológicos peligrosos. Que los vulcanólogos y los miembros del equipo interdisciplinario hagan esfuerzos por proporcionar datos de probabilidad, referentes a peligros volcánicos para ser más eficaces en la evaluación del impacto económico.

GLOSARIO

Aa: tipo de lava irregular, en bloques.

Alerta: etapa correspondiente a la fase del "antes" dentro del ciclo de los desastres, que significa la declaración formal de ocurrencia cercana o inminente de un evento (tomar precaución).

Alteración hidrotermal: es un proceso que afecta a rocas, debido a la acción de fluidos a altas temperaturas, muchas veces en las cercanías de cámaras magmáticas. Esta acción produce cambios mineralógicos y, a veces, estructurales en las rocas que se ven afectadas, dándoles muchas veces una coloración blanquecina, amarillenta y/o rojiza de acuerdo a los nuevos minerales presentes.

Amenaza: llamado también peligro, se refiere a la potencial ocurrencia de un suceso de origen natural o generado por el hombre, que puede manifestarse en un lugar específico con una intensidad y dirección determinada.

Andesita: roca volcánica cuyo contenido de SiO₂, se encuentra entre 52 y 63%.

Basalto: término genérico que se aplica a las rocas ígneas de color oscuro compuestas por minerales que son relativamente ricos en hierro y magnesio.

Bloque volcánico: fragmento sólido lanzado en una erupción explosiva, y con un tamaño que oscila entre 6 centímetros y varios metros de diámetro.

Bomba: fragmentos de lava con formas aerodinámicas, lanzado en estado semilíquido.

Brecha volcánica: roca formada por fragmentos de rocas volcánicas y fragmentos de las rocas encajonantes, a veces cementados por cenizas y lapillis.

Caldera: gran depresión volcánica en forma de cubeta más o menos circular que mide más de 1.5 km de diámetro.

Cámara magmática: corresponde a la zona de almacenamiento del magma en la corteza debajo de los volcanes. Pueden ubicarse a muy diversas profundidades.

Centro de emisión: lugar en la superficie por donde es emitido magma.

Cenizas: partículas de roca volcánica, cristales o vidrio volcánico, generado durante las erupciones (diámetro menor que 2 mm).

Chimenea: conducto sensiblemente tubular por el que los productos volcánicos alcanzan la superficie. Al término de la erupción del volcán se llena de lava o de brechas con bloques soldados.

Clasto: fragmento de roca que ha sido transportado, por procesos volcánicos o sedimentarios.

Cono adventicio: cono secundario de un edificio volcánico principal.

Cono de cenizas o piroclástico: colina de forma cónica formada por la acumulación de fragmentos piroclásticos (bombas, lapillis y cenizas) que caen al suelo en una condición esencialmente sólida.

COSPEC: equipo que permite determinar desde una distancia lejana al lugar de emanación, los niveles de gas (SO_2) que se emiten a través de fumarolas volcánicas.

Cráter: depresión, generalmente en forma de embudo, situada en la parte superior o en los laterales de los volcanes por donde éstos expulsan lava y gases al exterior durante las erupciones.

Cronoestratigrafía: parte de la estratigrafía que trata de la organización de los estratos en unidades basadas en sus relaciones de edad.

Dacita: roca volcánica de naturaleza intermedia a ácida.

Depósito de caída: fragmentos piroclásticos que han caído de una nube eruptiva.

Derrame fisural: salida de lava por una grieta o chimenea que no necesariamente es el cráter principal.

Domo: lava con forma de cúpula que crece en el fondo del cráter o en la cumbre de un volcán.

Edificio volcánico: es propiamente el cono que se forma por la acumulación de material expulsado a través del cráter y la forma es determinada por las proporciones de lava y elementos piroclásticos en el material de su composición.

Emisión: corresponde a la cantidad de magma emitido por unidad de tiempo durante una erupción o durante periodos dentro de una erupción. La viscosidad de una lava generalmente aumenta cuando la tasa de emisión disminuye, ya que al no mantenerse el flujo calórico, la lava comienza a enfriarse y, por ende, a solidificar, resistiendo más al desplazamiento del flujo.

Endógenas (rocas): productos ígneos que provienen del interior de la Tierra.

Enjambre (sísmico): serie de temblores que ocurren en una misma zona, durante un rango de tiempo que es generalmente pequeño y de magnitudes similares.

Erupción: emisión de materiales volcánicos (lavas, piroclastos y gases volcánicos) sobre la superficie, tanto desde la abertura central, como desde una fisura o grupo de ellas.

Erupción efusiva: erupción volcánica relativamente silenciosa que expulsa lava basáltica a la velocidad con la que una persona camina. La lava tiene una naturaleza fluida. Las erupciones del volcán Kilauea de la isla de Hawaii son de este tipo.

Erupción explosiva: dramática erupción volcánica que lanza por el aire material que llega a cientos de kilómetros de distancia. La lava es baja en silicatos y puede ser muy peligrosa para la gente que se acerque. Un ejemplo es el Monte St. Helens en 1980.

Erupción freática: erupción volcánica o explosión de vapor, barro u otro material que no está incandescente; esta forma de erupción está motivada por el calentamiento y consiguiente expansión del agua contenida en el suelo debido a la cercanía de un fuente ígnea de calor.

Erupción pliniana: emisión de grandes columnas eruptivas, con intensas explosiones que producen extensas lluvias de cenizas y flujos piroclásticos.

Escoria: fragmento de lava porosa y de forma irregular que fue arrojado en estado líquido.

Estratigrafía: estudio de la disposición de capas superpuestas de lechos rocosos diferenciados, su sucesión en el tiempo y su naturaleza.

Estratovolcán: es un volcán formado por capas de material fragmentario y corrientes de lava intercaladas.

Exhalación: emisiones de corta duración que pueden ser vapor de agua, gases y en ocasiones cenizas.

Falla: superficie de ruptura de la corteza terrestre a lo largo de la cual ha habido un movimiento diferencial paralelo entre dos bloques o masas adyacentes.

Flujo piroclástico: mezcla de gases volcánicos y materiales fragmentados incandescentes, que descienden por los flancos de los volcanes a gran velocidad y con alto poder destructivo.

Freática: erupción volcánica moderadamente explosiva, en donde hay contacto de gases calientes con agua subterránea, pero no magma.

Freatomagmática: actividad volcánica explosiva con interacción agua subterránea-magma.

Fumarola: expresión de calor subterráneo en áreas volcánicas con manifestaciones de vapores y gases con temperaturas entre 300 y 1,000 °C.

Gases volcánicos: corresponden a los gases disueltos en el magma, que al acercarse a la superficie generalmente tienden a escaparse, muchas veces formando fumarolas y solfataras.

Geyser: es la expresión superficial de un campo geotérmico en profundidad, el cual sobrecalienta agua infiltrada o en capas subterráneas, transformándolas súbitamente en vapor de agua que sube a la superficie a gran presión y muy alta temperatura.

Ígneo (a): roca o mineral que se solidificó a partir de material parcial o totalmente fundido.

Ignimbrita: roca volcánica rica en sílice originada en eventos volcánicos muy explosivos. Se caracteriza por poseer vidrio volcánico aplastado, cristales y líticos en su matriz.

Lahar: flujo de fragmentos de rocas, cenizas y barro que contienen suficiente agua para fluir pendiente abajo de las faldas de un volcán.

Lapilli: fragmentos de rocas volcánicas con tamaños entre 2 y 64 mm.

Lapilli acrecional: cuerpo esférico con un diámetro entre 2 a 64 mm que se forma cuando las cenizas se adhieren a una gota de agua condensada o una partícula sólida, particularmente en el interior de columnas eruptivas ricas en vapor de agua.

Lava: producto formado por la consolidación del magma.

Líticos: fragmentos de rocas.

Maar: estructura volcánica freática o freatomagmática cuyo cráter se encuentra bajo el nivel original del terreno.

Magma: roca fundida en el interior de la corteza de un planeta que es capaz de realizar una intrusión en las rocas adyacentes o de una extrusión hacia la superficie. Las rocas ígneas se derivan del magma a través de la solidificación y los procesos asociados o mediante la erupción del magma sobre la superficie.

Merapi (tipo): avalancha gravitacional de una colada o flujo piroclástico. Las erupciones del volcán Merapi en Java, es el volcán tipo.

Mitigación: Son las medidas tomadas con anticipación al desastre y durante la emergencia, para reducir su impacto en la población, bienes y entorno.

Pahoehoe: las lavas pahoehoe, de gran fluidez, tienen una superficie lisa, ondulada y brillante; y se originan cuando la temperatura de emisión es elevada y la tasa efusiva es reducida.

Piroclastos o piroclásticos: término descriptivo del material fragmentario formado por una explosión volcánica, o expulsado por una abertura volcánica.

Placa: segmento geométrico de la litosfera, que se mueve por el efecto de corrientes de convección en el interior de la Tierra.

Pómez: piroclasto de composición ácida (SiO_2) de diferentes tamaños, tonalidad clara y muy poroso.

Precursor: acontecimiento que anuncia una erupción que se desarrollará más tarde. Por ejemplo ruidos subterráneos, aumento de la sismicidad, etc.

Prevención: una de las etapas de la fase del "antes" en el ciclo de los desastres, que consiste en evitar que ocurra el evento, reconociendo que en ocasiones es imposible evitar dicha ocurrencia.

Riesgo: probabilidad de exceder un valor específico de daños sociales, ambientales y económicos, en un lugar específico y durante un tiempo de exposición determinado. $R = \text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad}$.

Riesgo (gestión del): una herramienta de decisión y de planificación que les facilita a los actores sociales analizar una situación determinada, tomar de manera conciente decisiones y desarrollar una propuesta de intervención concertada tendiente a prevenir, mitigar o reducir los eventos existentes.

Riolita: roca volcánica muy ácida (SiO_2), que se presenta en erupciones altamente explosivas.

Solfatara: salida de gases y agua a una menor temperatura (menor que 300°C), situada dentro del volcán o muy cerca de él.

Tefra: todo depósito o material eruptado por un volcán, el cual se desplaza por el aire a alguna distancia antes de caer en el suelo o en el agua.

Viscosidad: corresponde al inverso de la fluidez, es decir, es la resistencia interna a los esfuerzos de cizalle dentro de un flujo. Una alta viscosidad implica que un flujo no puede moverse fácil ni rápidamente, es decir tiene una muy baja fluidez. Por el contrario una baja viscosidad significa que el flujo puede desplazarse fácilmente (muy baja resistencia al cizalle interno).

Volcán: grieta o cualquier abertura en la superficie de la Tierra a través de la cual son extruídos productos tales como vapor de agua, piroclastos, lavas, gases, entre otros.

Volcán activo: se considera como volcán potencialmente activo aquel que ha tenido algún tipo de actividad eruptiva durante el Holoceno. Esto es especialmente importante en un país como Chile, donde los registros históricos escritos no datan más allá de principios de 1,500 cuando los primeros españoles llegaron a colonizar.

Volcánico: perteneciente o relativo al volcán.

Vulnerabilidad: es un factor interno del riesgo de un sujeto, objeto o sistema, expuesto a la amenaza, que corresponde a su disposición intrínseca a ser dañado.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Banks, N.G., Tilling, R.I., Harlow, D.H. y Ewert, J.W., "Vigilancia volcánica y pronósticos a corto plazo". Ed. R.I. Tilling, Apuntes para un curso breve sobre Los Peligros Volcánicos, U.S.A., WOVVO, IAVCEI, Santa Fe, Nuevo México, 51-82, 1993.

Blong, R.J., "Volcanic Hazards". Macquarie University Academic Press, Sydney, Australia, 1979.

Booth, B., "Assessing Volcanic Risk". Geological Society of London Journal, vol. 136 pp. 331-340, 1979.

Bullard V., Fred M., "Volcanoes of the Earth". University of Texas Press, Austin. Texas, 1962.

CENAPRED, "Los tsunamis en México". Secretaría de Gobernación, Coordinación de Programas y Normas de México, D.F., 1994.

CENAPRED, "Volcanes" México, D. F, mayo 1992.

Crandall, D.R., *et al*, "Sourcebook for Volcanic-Hazards Zonation". Natural Hazards 4 Paris: UNESCO, 1984.

De la Cruz R. S. y Ramos J. E., "Volcanes". Fascículo No.4 . Sistema Nacional de Protección Civil. México, pp. 23-25, México, 1994.

De la Cruz-Reyna, S., Quezada, J.L., Peña, C, Zepeda, O. y Sánchez, T., "Historia de la actividad reciente del Popocatepetl (1354-1995)". Volcán Popocatepetl: Estudios realizados durante la Crisis de 1994-1995 . Centro Nacional de Prevención de Desastres. 3-22, 1995.

Espíndola, J.M., "Las catástrofes geológicas". Cuadernos del Instituto de Geofísica No. 3, UNAM, 1992.

Espíndola, J.M., "La actividad volcánica". Cuadernos del Instituto de Geofísica No. 12, UNAM, 1999.

Krumpe, P.F., "Briefing Document on Volcanic Hazard Mitigation". Washington, D.C.: U.S. Agency for International Development, Office of Foreign Disaster Assistance, 1986.

Maciel, F.R. "Amenazas Naturales del Estado de Jalisco". Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. División de Ciencias Ambientales, 1995.

OACI (Organización de Aviación Civil Internacional), "Manual sobre nubes de Cenizas Volcánicas, Materiales Radiactivos y sustancias Químicas Tóxicas". P.I-1-1,I-6-10, 2001.

Ortiz M., *et al*, "Efectos costeros del tsunami del 9 de octubre de 1995 en la costa de Colima y Jalisco". Informe técnico CICESE, 1996.

Ortiz R. (editor), "Riesgo Volcánico". Serie Casa de los Volcanes No. 5, pp. 304. Cabildo de Lanzarote, Consejería de Cultura, Islas Canarias, España, 1995.

V Scott, W.E., "Hazardous Volcanic Events and Assessments of Long-Term Volcanic Hazards". Proceedings of the Geologic and Hydrologic Hazards Training Program, Denver, Colorado, March 5-30, 1984, Open File Report 84-760 Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 1984.

Simkin, T., and Siebert, L., "Volcanoes of the World". Geoscience Press, Tucson, Arizona, 349 p., 1994.

Tomblin, J., "A Lesson from the 1985 Ruiz Volcanic Disaster". In Episodes International Geoscience News magazine, 1986.

Yarza de al Torre E., "Volcanes de México". México, Ed. Aguilar, 1971.

III. EVALUACIÓN DE PELIGROS POR CENIZAS VOLCÁNICAS

Alicia Martínez Bringas y Ángel Gómez Vázquez

RESUMEN

Las cenizas volcánicas pueden afectar áreas muy extensas y por lo tanto a un gran número de personas. Pueden alcanzar distancias de hasta varios cientos de kilómetros del volcán que las originó, por lo tanto constituye el peligro volcánico de mayor alcance derivado de una erupción. Las cenizas pueden provocar algunos efectos nocivos para la salud de personas y animales. Además obstruyen las corrientes de agua, presas, alcantarillas, plantas de aguas y todo tipo de maquinaria. Las cenizas se amontonan en carreteras, vías férreas obstruyendo el paso, y puede ser resbalosa, también se acumulan en techos, llegando en ocasiones a provocar su colapso, asimismo, una nube volcánica que se desplaza representa un gran peligro para las aeronaves cercanas y distantes. En contraste con otros peligros volcánicos, los efectos de la ceniza pueden ser mitigados mediante una adecuada planificación y preparación. En este capítulo se pone énfasis en la necesidad de utilizar programas de cómputo de modelado de escenarios de depósito de caída de ceniza, a través de los cuales las autoridades de protección civil podrán identificar las necesidades específicas de cada comunidad, y que deberán cubrir para la evaluación del peligro por caída de ceniza. Evaluación que deberá ser realizada por gente especializada en peligros y riesgos volcánicos.

3.1 INTRODUCCIÓN

México, localizado en la región circunpácífica es un país rico en volcanes. La mayor parte del vulcanismo está relacionado con las interacciones entre las placas tectónicas de Rivera y Cocos y la Placa Norteamericana y se manifiesta principalmente en la Faja Volcánica Mexicana (FVM). Esta Faja es una región volcánica elevada, con orientación aproximada Este-Oeste, que se extiende más de 1,200 km. Sin embargo, la FVM no es la única región volcánica. Otra actividad importante ha ocurrido en el Noroeste (Baja California y Sonora, en las islas del Pacífico, principalmente las Islas Revillagigedo, y en el Sureste, principalmente en Chiapas.

El vulcanismo que se desarrolla a lo largo de la FVM es muy variado, esto genera una diversidad de volcanes, siendo aproximadamente 2,000, que incluyen grandes estratovolcanes, extensos campos de conos de ceniza monogénicos, volcanes de escudo y calderas volcánicas.

Las erupciones volcánicas agregan cantidades extremadamente grandes de aerosoles a la atmósfera en un periodo de tiempo muy corto. Formando nubes densas con partículas volcánicas que son transportadas por el viento y se conocen como nubes de ceniza. Las nubes de ceniza pueden causar una gran variedad de problemas en la calidad del aire. Cerca del volcán, las nubes de ceniza pueden hacer que la calidad del aire decline tan seriamente que la gente puede presentar problemas respiratorios y poner en peligro otras condiciones de salud. Las áreas cercanas a una erupción volcánica se pueden cubrir por varios centímetros y en ocasiones hasta por varios metros de ceniza volcánica. Cuando se encuentra en suspensión la ceniza representa un peligro para la aviación (tabla 3.6).

En una escala global, los aerosoles de los volcanes que se mantienen en la atmósfera superior son transportados alrededor del mundo bloqueando parcialmente la radiación solar a la atmósfera más baja. El resultado es el enfriamiento a corto plazo de la tierra. Por lo que la ceniza volcánica no sólo afecta a las áreas que rodean a los volcanes cercanamente sino que también, en ocasiones, desempeñan un papel en la regulación del clima global. El material de la nube de ceniza puede viajar a menudo por centenares de kilómetros mientras se mueve bajo la influencia de los vientos predominantes.

Adicionalmente a la evaluación de la ceniza como peligro volcánico, el involucrar factores que se derivan de la vulnerabilidad de las poblaciones y la infraestructura distribuidas en el entorno del volcán, podrán estimarse los riesgos volcánicos como la probabilidad de afectación o porcentaje de pérdida de determinados bienes ubicados en una región específica, por efecto de esta manifestación volcánica en un intervalo de tiempo dado. De la estimación de los peligros y los riesgos es posible diseñar las medidas de preparación y prevención que permitan reducirlos o evitarlos.

Esta guía pretende proporcionar los elementos que lleven a concebir a la ceniza volcánica como factor de peligro o amenaza. Una adecuada percepción permitirá diseñar las medidas óptimas de preparación y prevención para enfrentar, reducir o evitar los daños por ceniza volcánica en México.

3.2 CENIZA VOLCÁNICA O TEFRA

La ceniza volcánica es magma que ha sido molido y convertido en polvo o arena por las erupciones volcánicas. Las erupciones explosivas lanzan grandes cantidades de gases calientes y fragmentos de magma de todos tamaños al aire (figura 3.1). Los materiales rocosos fragmentados emitidos por una erupción, lanzados en forma sólida o líquida, se denominan *piroclastos*. El tamaño de los piroclastos depende de la intensidad de la erupción explosiva (figura 2.10). Una forma genérica de referirse a los productos piroclásticos, cualesquiera que sea su forma, es *tefra*. A los fragmentos de tefra con tamaño entre 0.004 mm y 2 mm se les llama *ceniza volcánica*, a los que tienen entre 2 mm y 64 mm *lapilli*, y los mayores de 64 mm se les denomina *bloques o bombas* (balísticos) dependiendo de su morfología.

Los gases calientes pueden arrastrar las partículas hasta grandes alturas, como por ejemplo en la erupción de El Chichón de 1982, la columna eruptiva alcanzó alturas máximas de 24 km sobre el nivel del mar, y en la erupción del volcán Pinatubo en Filipinas el 15 de junio de 1991, la columna alcanzó cerca de 35 km. de altura.

Las nubes eruptivas grandes pueden extenderse cientos o miles de kilómetros en la dirección del viento, y producir lluvias de ceniza sobre áreas de gran extensión; el viento transporta las partículas de ceniza más pequeñas a mayores distancias. La ceniza de la erupción de 1982 del volcán El Chichón cayó sobre un área de más de 30,000 kilómetros cuadrados en el sur de México.

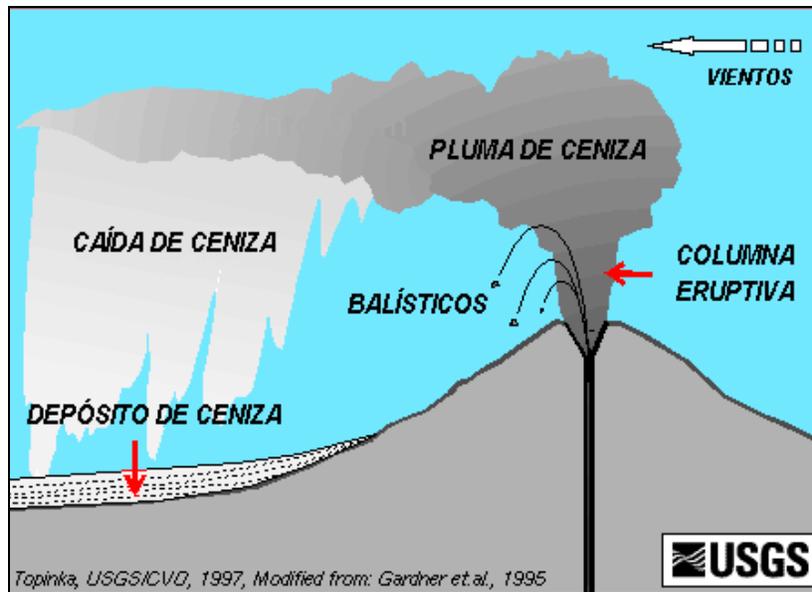


Figura 3.1 Diagrama de una erupción volcánica mostrando la columna eruptiva y dirección del viento. (Topinka, 1997)

3.2.1 Efectos de la ceniza volcánica

Durante una erupción, los fragmentos más grandes caen rápidamente cerca del volcán y los fragmentos más finos pueden ser arrastrados por el viento sobre distancias de cientos y hasta miles de kilómetros (figuras 3.1 y 3.3) , especialmente cuando la columna eruptiva alcanza alturas mayores a los 11 km y penetra en la estratosfera produciendo lluvias de ceniza sobre grandes extensiones. Las columnas eruptivas y las nubes de ceniza generan gran actividad eléctrica que se manifiesta como rayos y relámpagos frecuentes, que pueden afectar las comunicaciones radioeléctricas y producir incendios.

La ceniza más fina puede permanecer en el aire por varios días y hasta por algunas semanas, dependiendo de sus características, de su altitud y de los vientos dominantes. Los aerosoles formados por la condensación de varios de los gases volcánicos y sus interacciones con el agua, sea el vapor que acompaña a la columna eruptiva, o la humedad atmosférica, pueden permanecer suspendidos por tiempos mayores. Por ejemplo, aerosoles formados por gotitas de ácido sulfúrico pueden permanecer por semanas, meses y hasta años en las partes altas de la atmósfera, generando lluvias ácidas sobre grandes extensiones.

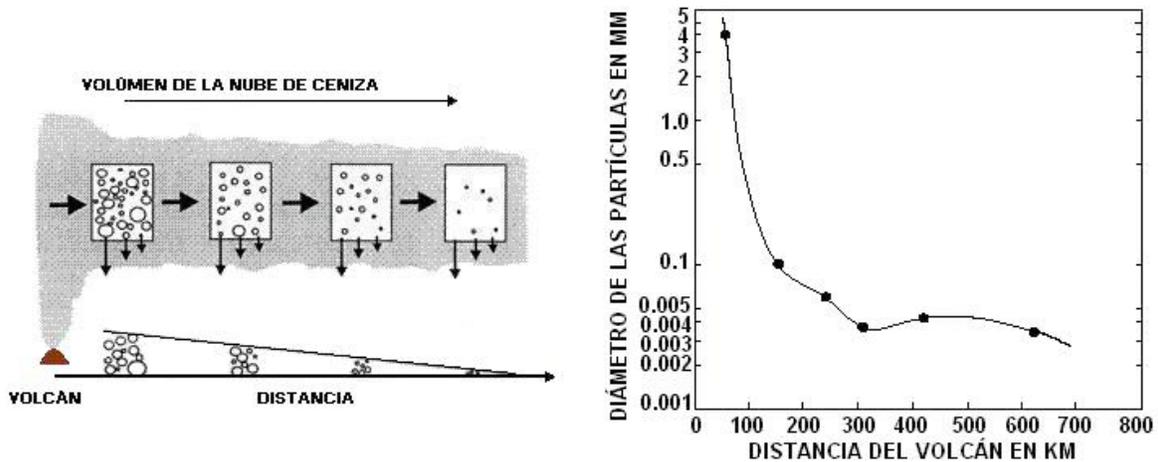


Figura 3.3 Distribución de la ceniza en función del tamaño de las partículas

Asimismo, las cenizas pueden afectar el clima; en los primeros meses siguientes a la erupción del Chichón, los aerosoles permanecieron en una banda comprendida entre los 5° y los 35° de latitud norte, mientras que en el caso del Pinatubo cubrieron rápidamente un área más amplia y alcanzaron su mayor concentración inmediatamente al sur del ecuador. En 1993, unos meses después de la erupción del Pinatubo, en algunas áreas hubo un aumento de 2% al 3% de la fracción de luz solar reflejada por la Tierra, lo que implicó una merma de la radiación solar absorbida por el planeta. En el caso del Chichón, en junio de 1982, después de la erupción, se registró en Mauna Loa una reducción de alrededor de 7.7% de la radiación.

La caída de ceniza puede provocar en las personas y animales, alguno de los siguientes efectos: el agravamiento de enfermedades pulmonares, trastornos gastrointestinales por la ingestión de agua y alimentos contaminados con flúor y posiblemente con metales pesados (arsénico, mercurio, etc.); daños oculares como conjuntivitis y abrasiones en la córnea.

La inhalación o exposición excesiva a la ceniza volcánica también llega a ser dañina, por su carácter erosivo y, en ciertos casos, por los materiales volátiles que puede condensar. En algunos casos, por suerte poco frecuentes, la ceniza puede acarrear depósitos de flúor a niveles tóxicos. La inhalación excesiva puede ser reducida permaneciendo en casas o sitios en los que se evite la entrada del polvo. También debe evitarse que la ceniza caiga en el agua potable, y de ser posible proteger o trasladar animales y ganado doméstico a un lugar seguro.

El daño principal que causa la ceniza en las poblaciones se deriva de su acumulación en los techos, provocando su colapso, lo que puede evitarse removiendo la ceniza acumulada, teniendo gran cuidado de no arrojarla al drenaje.

Capas de cenizas de 2 a 3 cm de espesor pueden causar el colapso de techos con pendientes menores a 20° así como en estructuras de mala calidad (figura 3.4). Las cenizas secas tienen un peso de 400-700 kg/m³, la lluvia puede incrementarlo de un 50 a un 100%. Una capa de cenizas de 10 cm de espesor representará una carga extra de 40-70 kg/m² si está seca, y de 100-125 kg/m² si está húmeda.

**Tabla 3.1 Densidad de partículas individuales de ceniza, kg/m³
(Shipley y Sarna-Warjicki, 1982)**

Tipo de partícula de ceniza	Densidad de la partícula
Fragmentos de pomez	700-1,200 kg/m ³
Vidrio volcánico	2,350-2,450 kg/m ³
Cristales y minerales	2,700-3,300 kg/m ³
Otros fragmentos de roca	2,600-3,200 kg/m ³

La densidad de la ceniza (tabla 3.1) no compactada es comparable a la del agua o granizo (cerca de 1,000 kg/m³). La ceniza húmeda y compactada puede alcanzar densidades cercanas a 3,000 kg/m³, es decir, un volumen de 1 cm de altura depositado sobre una superficie de 1 m² pesaría 30 kg. Por ello la acumulación sobre techos inadecuadamente diseñados como ya se mencionó puede causar su colapso.

Cuando la ceniza depositada se humedece o se compacta, su peso puede producir hundimientos de los techos y caída de hojas y ramas de plantas y cables de todo tipo. Asimismo, la ceniza húmeda puede conducir la electricidad, produciendo corto-circuitos en líneas de transmisión de energía y en líneas de comunicación.

Los fragmentos mayores, especialmente aquellos formados por las rocas densas de las estructuras más viejas del volcán, como son los domos que tapan los cráteres, son lanzados por las explosiones como proyectiles balísticos (denominados “líticos”) y pueden causar severos daños, incluso en techos más reforzados.

La ceniza húmeda puede tener ciertas propiedades de cohesión y cementarse, especialmente cuando ha invadido sistemas de drenaje. La lluvia abundante sobre depósitos de ceniza genera lodo que dificulta el tránsito y puede generar peligrosos flujos de lodo. Por ello deben evitarse los depósitos de ceniza en las calles y en las entradas del drenaje. La ceniza también puede ocasionar accidentes de automóviles (debido a que las carreteras se tornan resbaladizas y disminuye la visibilidad).



Figura 3.4 En regiones más cercanas al centro eruptivo, aparte de la ceniza volcánica, los fragmentos de mayor tamaño pueden producir perforaciones y severos daños a los techos, y a las vías de comunicación. Estas fotos muestran los daños producidos por las erupciones del volcán El Chichón en 1982, dentro de un radio de 10 km. A la izquierda, un techo perforado por líticos. A la derecha, un puente semidestruído por impactos. Fotos de S. De la Cruz



Figura 3.5 La foto muestra calles y drenajes de Pichucalco, Chiapas completamente bloqueados por la ceniza de la erupción del volcán El Chichón. A la lluvia de ceniza se añadía la removida de los techos. Foto de S. De la Cruz

La ceniza depositada sobre las vías de comunicación puede inhabilitarlas (figura 3.5). Cuando haya ceniza en el aire, los equipos mecánicos deben estar protegidos con filtros adecuados.

Las cenizas obstruyen las corrientes de agua, presas, alcantarillas, plantas de aguas residuales y todo tipo de maquinaria. Las cenizas se acumulan en carreteras, vías férreas y senderos.

Una densa caída de cenizas altera el suministro de energía. La repentina demanda multitudinaria de luz puede hacer que el servicio eléctrico se agote o falle. Los equipos electrónicos pueden sufrir importantes daños, cortocircuitos e interferencias de radio y televisión.

Los efectos sobre la agricultura dependen del tipo de cultivo, de su grado de desarrollo y evidentemente del espesor de la capa de cenizas caída. En climas cálidos la vegetación se recupera en menor tiempo. La tabla 3.2 muestra un resumen de la vulnerabilidad de diferentes cultivos ante depósitos producidos por lluvia de ceniza.

La cantidad de ceniza retenida en la vegetación dependerá de varios factores como son, la superficie de las hojas, densidad del follaje por unidad de área, tamaño, forma y orientación individual de las hojas, características de las hojas, como rugosidad, la presencia de fibras, aceites, etc., tamaño de la ceniza y de la cantidad que caiga, velocidad y dirección del viento sobre las copas de los árboles y humedad relativa, especialmente si se encuentra sobre el 90%. Cuando la humedad relativa está arriba del 90%, la cantidad de ceniza retenida en el follaje es el doble de la que se puede encontrar con menores valores de humedad

La caída de ceniza puede agujerear las hojas de las plantas, tornarlas de color café y en lugares muy cercanos causar leves quemaduras del follaje. Las restricciones sobre uso de tierras deben de ser instituidas para aquellas áreas que tienen amenaza potencial de fenómenos volcánicos. En las áreas donde las cenizas volcánicas pueden resultar un peligro, los códigos de construcción deben estipular las medidas adecuadas para los techos de las edificaciones.

Para simplificar el gravamen del peligro y permitir la definición del riesgo dentro de ciertas áreas, pueden ser utilizadas cinco zonas de impacto, obtenidas de las mediciones de la acumulación de cenizas producidas por erupciones plinianas. Hasta varias decenas de metros en la zona cercana al cráter (menos de 15 km), de 20 a 400 cm a distancias de entre 15 y 35 km y de 5 a 150 cm hasta distancias de 1,000 km (tabla 3.4) .

En la figura 3.6 se muestran algunas gráficas de los espesores alcanzados por la ceniza a diferentes distancias de los volcanes del Cascade Range, EUA. En la determinación del impacto de las cenizas en una región determinada, se requiere contar con información de los patrones de vientos dominantes locales.

Tabla 3.2 Vulnerabilidad por caída de ceniza volcánica. Efectos sobre la Agricultura. Adaptado de Ortiz (1995)

Espesor de ceniza (mm)	Cultivos
>2000	Toda la vegetación queda destruida
1500	La mayor parte de la vegetación muere
1000	Ciertos cultivos pueden ser parcialmente recuperables
200	Arrozales destruidos
150	Cafetales destruidos
100	Palmas y ramas rotas por el peso de la ceniza
50	Plataneras destruidas
40	50% de pérdidas en legumbres, 15-30% en trigo, verduras, cebada, heno, etc.
30	Los frutos pueden quedar inservibles por la capa de ceniza
25	Daños en cañas de azúcar, patatas, etc.
20	Daños considerables en naranjas, mandarinas, moras y otros frutos y verduras
15	Pérdidas de alfalfa, de pastos
10	Daños en manzanas, algodón, plátanos, tabaco y verduras. De 20-40% de la cosecha se daña
<10	Menores daños en pasto, trigo y maíz

Finalmente, la ceniza volcánica puede afectar áreas muy grandes y a un gran número de personas, incluso aquellas en aviones que vuelan sin conocimiento del riesgo que una nube volcánica que se desplaza representa para las aeronaves cercanas y distantes. A nivel mundial, existen más de 80 casos reportados de aeronaves que han sido afectadas por cenizas volcánicas en vuelo o en aeropuertos durante los últimos 20 años, ya que al atravesar las nubes de vapor y cenizas, los motores de los aviones pueden presentar fallas e incluso pararse, (CENAPRED, 2003). En siete de esos casos, los encuentros de aeronaves en vuelo con nubes de ceniza volcánica resultaron en severos daños a las turbinas y a los sistemas de registro de velocidad y altitud que estuvieron a punto de resultar en la pérdida total de las aeronaves (tabla 3.3).

Tabla 3.3 Efectos provocados por las cenizas en lo aviones (Basado en Foreman, 1994)

	Daños
Impacto	Daños directos incluso a miles de kilómetros del volcán
Abrasión	Daños en bordes, mecánicas y sistemas hidráulicos
Acreción	Las cenizas se funden en las cámaras de combustión de turbinas, acrecionando y provocando importantes daños al motor. Flameo de la turbina
Adhesión	La ceniza se adhiere a las superficies, taponando el sistema de refrigeración y sensores
Psicológicos	Los ocupantes del avión notan la presencia de gases y partículas en el aire

En la tabla 3.5 se presenta un resumen general de los efectos de la ceniza en persona, animales, estructuras, maquinarias, caminos, etc.

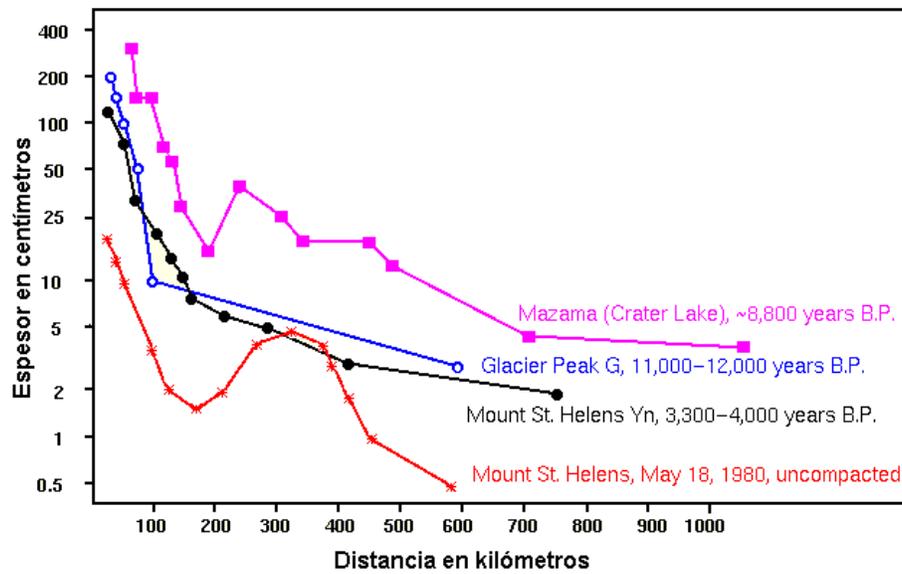


Figura 3.6 *Espesores de ceniza vs. distancia desde el centro emisor, para volcanes del Cascade Range, EUA*

Tabla 3.4 Resumen de las propiedades peligrosas de la ceniza volcánica (Institute of Geological and Nuclear Sciences, New Zealand, 2003)

Efectos de la caída de cenizas como función del espesor	
Espesor	Efecto
Menos de 1 mm	<p>Actuará como irritante a los pulmones y a los ojos.</p> <p>Los aeropuertos cerrarán debido al daño potencial al avión.</p> <p>Posibles daños de menor importancia a vehículos, casas y equipo, causado por la ceniza abrasiva fina.</p> <p>Posible contaminación de abastecimientos de agua.</p> <p>El polvo afecta la visibilidad y la tracción del camino por un período largo.</p>
1-5 milímetros	<p><i>Los efectos que ocurren con < 1 milímetro de ceniza se amplificarán:</i></p> <p>Daños posibles en cosechas.</p> <p>Parte del ganado puede ser afectado. Alimento y agua contaminados pueden desgastar sus dientes. No serán afectados si tienen alimento y agua limpios .</p> <p>Daños de menor importancia a las casas si la ceniza fina entra, manchando los interiores, bloqueando los filtros del aire acondicionado, etc.</p> <p>Posible corte de la energía eléctrica; la ceniza puede provocar cortocircuitos en las subestaciones sobretodo si se moja.</p> <p>El abastecimiento de agua se puede cortar o limitar debido a la falta de electricidad.</p> <p>Puede ocurrir contaminación de los abastecimientos de agua.</p> <p>Los caminos pueden necesitar ser despejados para reducir el polvo y para evitar el bloqueo de los sistemas de precipitación.</p> <p>Los sistemas de aguas residuales se pueden bloquear por la ceniza, o interrumpir por la pérdida de fuentes eléctricas.</p> <p>Algunos daños al equipo eléctrico y a maquinaria.</p>
5-100 milímetros	<p><i>Los efectos que ocurren con < 5 milímetros de la ceniza se amplificarán:</i></p> <p>Entierro de pasto y plantas bajas. El follaje se puede caer de algunos árboles pero la mayoría de los árboles sobrevivirán.</p> <p>La mayoría de los pastos morirán con cerca de 50 milímetros de ceniza.</p> <p>Necesidad de operaciones importantes de retiro de ceniza en áreas urbanas.</p> <p>La mayoría de los edificios de mampostería aguantaran la carga de ceniza pero estructuras con azoteas débiles pueden derrumbarse con 100 milímetros de espesor, particularmente si la ceniza se moja.</p> <p>Los caminos pueden ser bloqueados debido a la acumulación de ceniza. Los coches pueden tener problemas debido a la ceniza en lo filtros de aire.</p>
100-300 milímetros	<p><i>Los efectos que ocurren con < 100 milímetros de la ceniza se amplificarán:</i></p> <p>Los edificios que no son limpiados de la ceniza acumulada en sus techos correrán el riesgo de derrumbarse, especialmente estructuras con techos planos, sobretodo si la ceniza llegara a mojarse.</p> <p>Daños severos a árboles, se caerán y romperán ramas.</p>
Más de 300 milímetros	<p><i>Los efectos que ocurren con < 300 milímetros se amplificarán:</i></p> <p>Muerte masiva de la vegetación.</p> <p>Entierro total del horizonte del suelo.</p> <p>Ganado y otros animales mueren o son heridos gravemente.</p> <p>Muerte de la vida acuática en lagos y ríos.</p> <p>Derrumbamiento importante de las azoteas debido a la carga de la ceniza.</p> <p>Corte de la energía eléctrica y de las líneas telefónicas.</p> <p>Caminos completamente cerrados.</p>

Tabla 3.5 Resumen general de los efectos de las cenizas volcánicas

Efectos de la caída de cenizas (Varía dependiendo del volumen del material expulsado y la duración o intensidad de la erupción)
<ul style="list-style-type: none"> • La inhalación de la ceniza puede provocar el empeoramiento de enfermedades pulmonares, asma, silicosis por exposición prolongada al aire libre.
<ul style="list-style-type: none"> • Puede provocar también trastornos gastrointestinales por la ingestión de agua contaminada con flúor y posiblemente con metales pesados (arsénico, mercurio, etc.) o por la ingestión de alimentos contaminados.
<ul style="list-style-type: none"> • Puede causar daños oculares como conjuntivitis y abrasiones en la córnea.
<ul style="list-style-type: none"> • Colapso de tejados: Capas de ceniza de 2 a 3 cm de espesor pueden causar el colapso de tejados con pendientes menores a 20°; y/o con estructuras de mala calidad.
<ul style="list-style-type: none"> • La ceniza fina puede causar contaminación en ambientes interiores limpios como quirófanos, laboratorios farmacéuticos, mecánica de precisión, óptica, en la industria de la alimentación, etc.
<ul style="list-style-type: none"> • Los equipos electrónicos pueden sufrir importantes daños tanto por la capacidad abrasiva de la ceniza como por su comportamiento eléctrico, ya que la ceniza humedecida es altamente conductiva pudiendo provocar cortocircuitos. Se debe tener especial cuidado con sistemas de agua, bombas, filtros y válvulas muy susceptibles a sufrir daños por la caída de cenizas.
<ul style="list-style-type: none"> • Interferencias de radio y televisión, así como fallas en el suministro eléctrico.
<ul style="list-style-type: none"> • Capas de 1 a 2 cm. de ceniza puede provocar daños de suma importancia en la industria con equipamiento mecánico, eléctrico o químico. La maquinaria expuesta deberá ser sometida a cuidadoso procedimiento de limpieza, para evitar posteriores problemas por efecto de la abrasión. Igualmente la limpieza debe realizarse con maquinaria especialmente preparada para trabajar en medios muy abrasivos.
<ul style="list-style-type: none"> • La ceniza disminuye rápidamente la capacidad de filtración del suelo, taponando cañerías y cauces de agua, aumentando considerablemente el riesgo de inundaciones.
<ul style="list-style-type: none"> • Los efectos sobre la agricultura dependen del tipo de cultivo, de su grado de desarrollo y evidentemente del espesor de la capa de cenizas caída. Sin embargo, en climas cálidos la vegetación se recupera en muy poco tiempo.
<ul style="list-style-type: none"> • Este fenómeno afecta también a la ganadería, arruinando pastos y dañando considerablemente la lana de los animales.
<ul style="list-style-type: none"> • Los gases retenidos en las cenizas se liberan lentamente, pudiendo provocar problemas respiratorios y asfixia, especialmente en las zonas donde la acumulación de ceniza es importante. Las personas que padecen de problemas respiratorios o alergias serían las más afectadas.
<ul style="list-style-type: none"> • Las cenizas pueden transportar ciertos elementos que pueden ser contaminantes al ser disueltos en las aguas de los ríos y manantiales. El cloro y los sulfatos, por su alta capacidad de disolución, son los más propensos a generar esta contaminación.
<ul style="list-style-type: none"> • Los depósitos de ceniza pueden permanecer mucho tiempo sin solidificarse, especialmente en zonas áridas, siendo removidos fácilmente por el viento y propagándose a distancias mayores durante un largo periodo después de la erupción.
<ul style="list-style-type: none"> • Pueden ocasionar accidentes de automóviles (carreteras resbaladizas y escasa visibilidad). Accidentes aéreos, por ingreso de ceniza en los motores.

3.2.2 Características de la dispersión de cenizas volcánicas

Algunas características de las emisiones de ceniza volcánica, de su dispersión, distribución, velocidad, alcances, etc. asociadas a los distintos tipos de erupciones volcánicas y a sus manifestaciones se resumen en las tablas 3.6 a 3.9. Las velocidades y los alcances están descritos en términos cualitativos, dado que dependen de muy diversos factores, como es la altura del volcán, intensidad de la erupción, topografía del terreno, vientos dominantes, etc.

Tabla 3.6 Erupciones efusivas

Manifestación	Peligro asociado	Velocidad	Alcance	Efecto más frecuente
Ceniza	Lluvia de ceniza	Pocos kilómetros por hora	Intermedio	Acumulación de ceniza

Tabla 3.7 Erupciones explosivas

Manifestación	Peligro asociado	Velocidad	Alcance	Efecto más frecuente
Ceniza	Lluvia de ceniza	Pocos kilómetros por hora	Largo a muy largo	Acumulación de ceniza, bloqueo de drenajes

Tabla 3.8 Características y efectos de las principales manifestaciones volcánicas (Modificada de Blong, 1984)

Peligros	Distancia a la que se extiende el efecto		Área afectada		Velocidad de la manifestación		Temperatura característica (°C)
	Promedio (km)	Máxima (km)	Promedio (km ²)	Máxima (km ²)	Promedio (m/s)	Máxima (m/s)	
Caída de ceniza (fragmentos pequeños)	20-50	1000 +	100	100,000	15	30	ambiente
Proyectiles balísticos (fragmentos grandes)	2	15	10	80	50-100	100	Hasta 1000
Lluvia ácida y gases	20-30	2,000 +	100	20,000	15	30	ambiente
Rayos	10	100+	300	3,000	-	-	incandescencia

Tabla 3.9 Periodos de alerta y probables efectos de los peligros volcánicos (Modificado de Blong, 1984)

Peligros	Periodo de alerta	Capacidad para causar daño severo	Probabilidad de lesiones severas o muerte
Caída de tefra	Minutos a horas	Menor-moderado	Bajo-moderado
Proyectiles balísticos	Segundos	Extremo	Muy alto
Lluvia ácida y gases	Minutos a horas	Muy bajo	Usualmente muy bajo
Rayos	Instantáneo	Moderado	Muy alto

3.3 SIMULADORES DE DISPERSIÓN DE CENIZAS

En los capítulos anteriores se puso de manifiesto la peligrosidad y los problemas que representa la presencia de ceniza como consecuencia de una erupción volcánica aún a decenas de kilómetros del centro de emisión. Debido a esto es importante incorporar esta información en la planificación del desarrollo para reducir el impacto de los peligros por cenizas volcánicas.

El analizar y evaluar los peligros en el proceso de planificación, puede complicarse, también se complica el analizar el peligro de caída de cenizas volcánicas en relación con el desarrollo existente o planeado para seleccionar las formas de mitigación del daño que puede causar la ceniza.

Para simplificar este problema existen diferentes Modelos o Simuladores de Dispersión de Cenizas Volcánicas, como son *Puff*, *HYSPLIT*, *SECCVO*, *ASHFALL*, *FALL3D* entre otros, algunos de ellos de software libre. Estos programas de computadora permiten elaborar modelos de distribución y acumulación de las cenizas de futuras erupciones esperadas, asimismo, algunos de ellos permiten pronosticar y visualizar en dos o tres dimensiones el movimiento de las nubes de ceniza producto de una erupción volcánica.

Estos simuladores se combinan con cartografía digital y producen un panorama aproximado de la trayectoria de la nube de ceniza y del área de depósito, lo cual va a depender de la dirección del viento, de la altura de la columna eruptiva y de la duración del evento. Aunado a esto, se cuenta con técnicas de manejo de información, entre las que se encuentran los Sistemas de Información Geográfica (SIG), una herramienta sistemática para referir geográficamente una serie de capas de información, a fin de facilitar la sobreposición, cuantificación y síntesis de los datos, así como orientar las decisiones.

Las aplicaciones del SIG en el manejo de peligros volcánicos y planificación del desarrollo sólo están limitadas por la cantidad de información disponible. Generalmente, con la información disponible sobre dispersión de cenizas se tiene material suficiente para llevar a cabo una evaluación preliminar con un SIG del estado del peligro y orientar así las actividades de planificación del desarrollo.

3.3.1 Modelaciones o simulaciones por computadora

Modelar de forma cuantitativa la distribución de la ceniza, así como los posibles espesores que se depositarían durante una posible erupción en una región aledaña a un volcán, permitirán diseñar mapas fidedignos para las regiones de interés y con base en esto tomar decisiones durante una posible emergencia volcánica. Los simuladores son útiles para alertar a las posibles poblaciones afectadas, así como la afectación de zonas de tráfico aéreo ante un impacto eruptivo.

La descripción cuantitativa de los depósitos volcánicos y la reconstrucción de erupciones pasadas es esencial para la identificación de los escenarios esperados, sus relaciones temporales y las áreas mínimas, las cuales fueron afectadas en el pasado por la dispersión de cenizas, así como para la validación de los resultados de la simulación obtenida. Sin embargo, cuando no se cuenta con la información del volcán en estudio, por cualquiera que sea la razón, se podrá utilizar la información de un volcán similar (en sentido geológico) al volcán en cuestión.

Utilizando técnicas informáticas modernas, además de los mapas convencionales de peligro volcánico, la intención del Atlas de Riesgos es construir sistemas de información geográfica que contengan las diferentes bases de datos (topografía, geología, distribución de los peligros volcánicos, distribución de población, vulnerabilidad, etc.) que pueden superponerse de forma

interactiva a través de simuladores para visualizar en forma clara, precisa y dinámica los componentes del riesgo que se desean analizar sobre cada comunidad en el entorno cercano y distante del volcán.

En la utilización de los simuladores por computadora se requiere además de la información geológica del volcán, contar con los parámetros físicos básicos necesarios e introducir el concepto de probabilidad. Esto con el fin de obtener escenarios que describan la distribución probable en espacio y tiempo de acuerdo con eventos reales para un volcán en particular, o con eventos ocurridos en un volcán de características similares, para el cual sí existen datos.

- a) Para la obtención de los escenarios posibles de dispersión de cenizas a través del uso de simuladores por computadora se requiere:
- b) Determinar los escenarios que serán creados (con base en erupciones ocurridas en el pasado en el volcán o en volcanes similares)
- c) Identificar escenarios máximos, intermedios y mínimos.
- d) Obtener la paquetería de cómputo (Modelos o Simuladores de Dispersión de Cenizas Volcánicas: *Puff*, *HYSPLIT*, *SECCVO*, *ASHFALL*, *FALL3D*)
- e) Determinar los parámetros a utilizar como son, altura de columna eruptiva, dirección y velocidad de los vientos, etc. (de acuerdo con el programa utilizado)
- f) Determinar el formato de entrada de datos y de resultados
- g) Crear eventos basados en los antecedentes de eventos pasados
- h) Comprobar que tan realista son los resultados obtenidos con respecto a los eventos pasados en el volcán en estudio o del que se hayan tomado los datos.
- i) Sobreponer los resultados a la cartografía
- j) Sobreponer información cartográfica disponible como son poblaciones, vías de comunicación, hidrología, etc.

La caída de ceniza a la superficie está controlada básicamente por:

- a) La altura máxima de la columna
- b) Duración del evento.
- c) Velocidad con que se depositan las partículas
- d) Dirección y velocidad de los vientos predominantes en la región.

3.3.2 Aspectos cartográficos

El objetivo de los mapas de escenarios o de peligros es mostrar cartográficamente los posibles alcances de la ceniza volcánica generada por erupciones volcánicas específicas, lo cual permitirá a las autoridades de Protección Civil la planeación de medidas de prevención y mitigación de los efectos de la ceniza volcánica, así como a las poblaciones cercanas proporcionar información de los peligros potenciales de dicho lugar. Esto derivará posteriormente en la elaboración de mapas de riesgo, como etapa final del proceso de análisis de los fenómenos volcánicos y su impacto.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son una herramienta de almacenamiento de información susceptible de ser actualizada y que permite elaborar mapas que pueden ser modificados una y otra vez en su contenido y presentación, y desplegar datos espaciales del mundo real, lo cual ofrece una enorme ventaja.

Una vez obtenidos los mapas de escenarios o de zonificación de peligros por medio de cualquiera de los modeladores o simuladores de cenizas mencionados anteriormente, se deben montar las capas obtenidas sobre la cartografía del área del volcán, utilizando un programa de manejo de Información Geográfica (Arcview, ArcGis, etc.). Esto permitirá detectar cuáles serían las áreas afectadas por caída de ceniza producida específicamente por el tipo o tipos de erupciones analizadas.

Los mapas de zonificación de peligros volcánicos tienen dos propósitos: la planificación a largo plazo de usos de tierra alrededor de volcanes, y determinar qué áreas deben ser evacuadas y evitadas durante las erupciones. Los mapas preparados para estos dos propósitos tienen similitudes y diferencias. Ambos tipos de mapas deben ser considerados durante su preparación; ambos pueden ser preparados a partir de los mismos datos básicos y, en algunos casos, un solo mapa podría servir a ambos propósitos.

3.3.3 Capas de información

La información sobre peligros de volcanes debe ser una base de información para cualquier SIG. Los datos de lugares de peligros volcánicos pueden ser compatibilizados en un SIG con información previamente obtenida respecto a recursos naturales, poblaciones e infraestructura, a fin de proporcionar a los planificadores lo necesario para una evaluación preliminar de los posibles impactos de eventos volcánicos.

El principal valor de un SIG está en poder procesar y analizar cantidades de datos que resultan excesivos para el manejo en forma manual. Por ejemplo, se debe incluir toda la información referente a las vías de comunicación como son: carreteras de terracería nacionales operando, carretera libre federal, carreteras libre estatal, carretera libre, carretera estatal pavimentada, carretera pavimentada de cuatro carriles de cuota federal y operando, carretera pavimentada de cuatro carriles concesionada operando, carretera pavimentada de dos carriles federal operando, carretera pavimentada de dos carriles estatal operando, caminos y veredas. Esta información permitirá determinar en caso necesario vías de comunicación problemáticas y vías de evacuación. Del mismo modo es importante contar gráficamente con la distribución poblacional, así como con toda información disponible en cuanto a población, municipios, localidades por área, infraestructura, etc.

Como ejemplo de la visualización de las capas de información de áreas urbanas y vías de comunicación vulnerables se muestran en la figura 3.7.

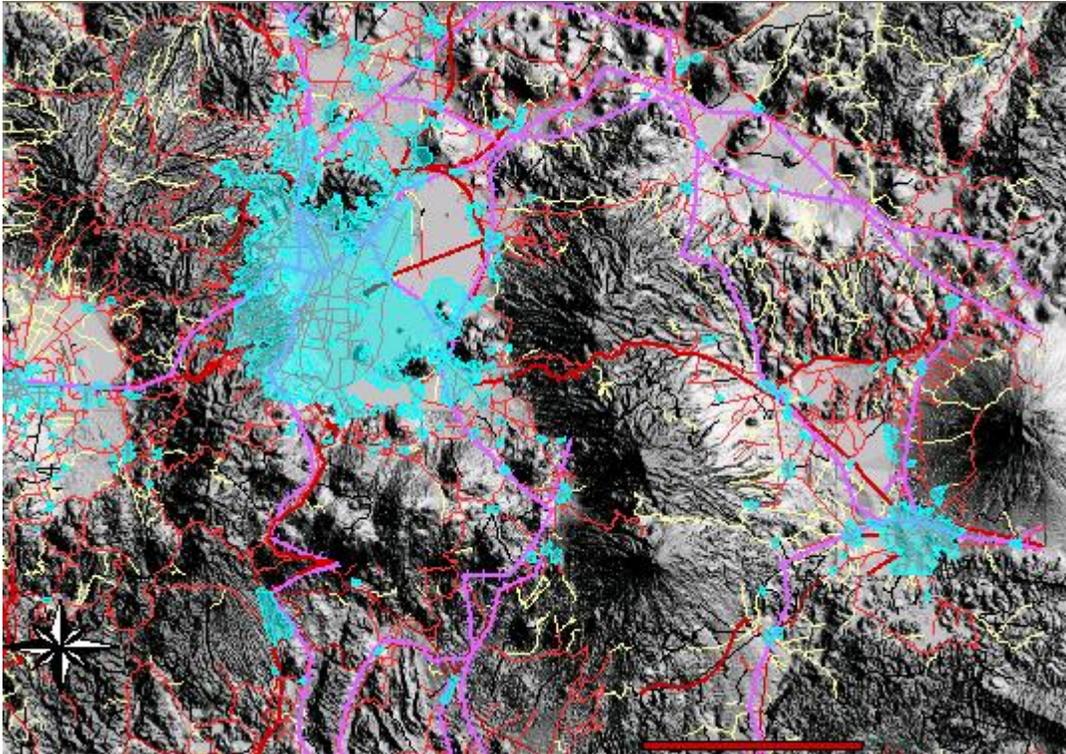


Figura 3.7 Modelo de elevación de la zona del volcán Popocatepetl mostrando las capas de información de hidrología, vías de comunicación y poblaciones

Toda la información vertida en el mapa debe formar una base de datos geo-referenciada, lo cual permitirá a través de una microcomputadora (PC) combinar el manejo de datos con la presentación de mapas, permitiendo a su vez a planificadores y funcionarios encargados de las emergencias, tener en forma gráfica las áreas de impacto de peligros y relacionarlas con personas y propiedades en riesgo. Este medio será adecuado para planificar emergencias, rehabilitación post-desastre y trabajos de reconstrucción, dadas su capacidad para manejar y combinar grandes bases de datos con exhibición de mapas; y, también, su capacidad para utilizar textos que relacionen los elementos en cuestión (áreas de impacto del peligro, ubicación de albergues, centros de salud, estaciones contra incendios, estaciones de policía, etc.) con la información descriptiva respectiva. Es importante la adquisición de la cantidad suficiente de datos, que proporcione la información necesaria para una rápida y efectiva toma de decisión en materia de manejo de los peligros naturales.

3.3.4 Escenarios de depósitos de caída de ceniza

A continuación se presentan algunos ejemplos de escenarios de caída de ceniza, obtenidos mediante el programa “Simulador de Escenarios de Caída de Ceniza Volcánica” (SECCVO), desarrollado especialmente para el volcán Popocatepetl por A. O. González y S. de la Cruz Reyna (2000). El modelo recrea posibles escenarios de depositación de caída de ceniza volcánica en los alrededores del volcán. Estos escenarios pueden ser de pequeña, mediana y gran intensidad y con diversas condiciones eruptivas y meteorológicas. Los escenarios de depositación de ceniza volcánica son directamente proporcionales a la tasa de emisión de material piroclástico (intensidad) y al tiempo de duración del evento eruptivo. Este programa de cómputo puede ser obtenido a través del CENAPRED.

Se obtuvieron los escenarios para un evento eruptivo con las siguientes características:

- 1.-Altura de la columna eruptiva (20 km)
- 2.-Duración de la erupción. (3 horas)
- 3.-Velocidad del viento (60 km/h)
- 4.-Dirección del viento con cuatro escenarios: Este, Norte Oeste y Sur

Se obtuvieron los siguientes espesores de depositación de cenizas a diferentes distancias:

- Dirección Este (figura 3.8), los espesores varían de 49 m en el cráter, a 2.5 cm a 45 km del cráter, en la Cd. de Puebla. En la Cd. de México (a 60 km) el espesor sería de 0.0 cm.
- Dirección Norte (figura 3.9), los espesores varían de 49 m en el cráter a 2.7 cm a 50 km. en la dirección Norte. En la Cd. de Puebla el espesor sería de 0.04 cm y en la Cd. de México de 0.08 cm.
- Dirección Oeste (figura 3.10), los espesores varían de 49 m en el cráter a 2.7 cm a 50 km en dirección Oeste. En la Cd. de Puebla el espesor sería de 0.0 cm y en la Cd. de México de 0.8 cm.
- Dirección Sur (figura 3.11), los espesores varían de 49 m en el cráter a 8.4 cm a 24 km en dirección Sur. En la Cd. de Puebla el espesor sería de 0.02 cm y en la Cd. de México de 0.0 cm.

En las figuras 3.8 a 3.11 se muestran los escenarios obtenidos de depositación de ceniza volcánica con las características mencionadas. Adicionalmente se montaron en todos ellos las capas de información hidrológica, vías de comunicación y poblaciones. Estos escenarios pueden ser consultados en la página del CENAPRED (www.cenapred.unam.mx), en la liga al portal del Atlas Nacional de Riesgos de la misma institución.

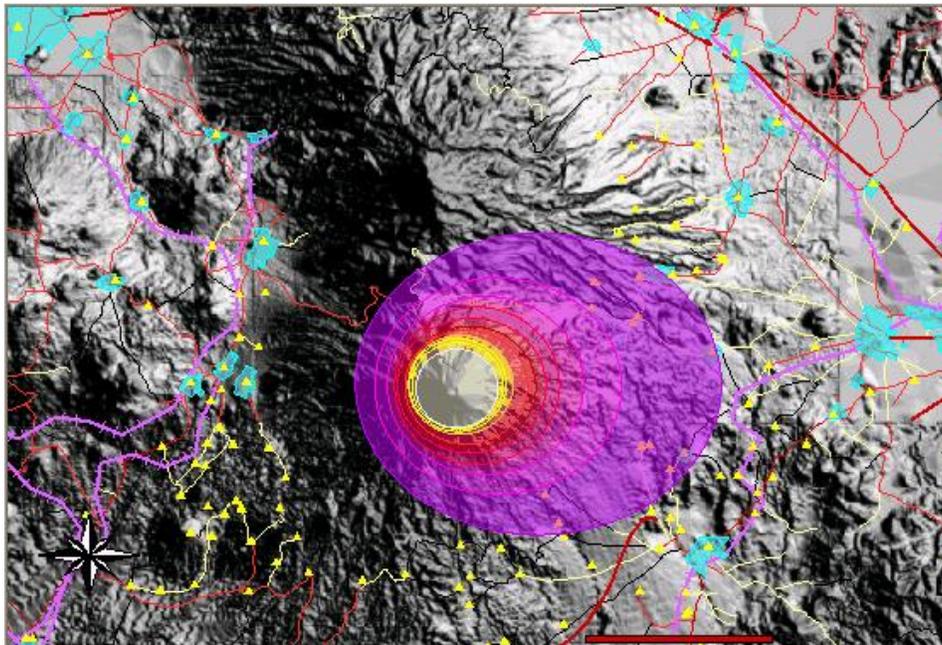


Figura 3.8 Escenarios de depositación de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento, altura de columna de 20 km y duración de 3 h con velocidad del viento 60 km/h en dirección al este

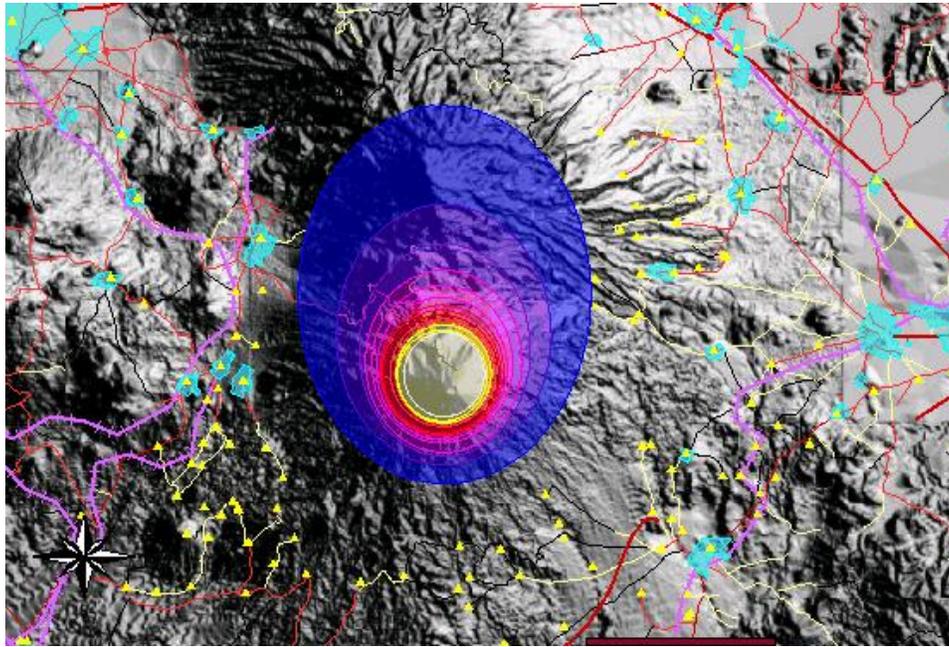


Figura 3.9 Escenarios de deposición de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatépetl. Características del evento, altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al norte

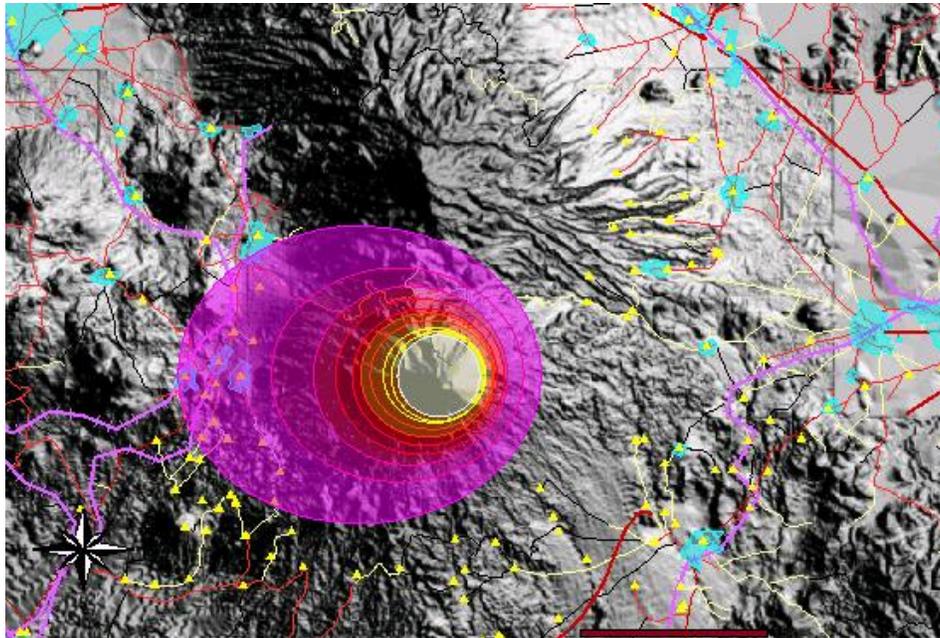


Figura 3.10 Escenarios de deposición de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatépetl. Características del evento, altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al oeste

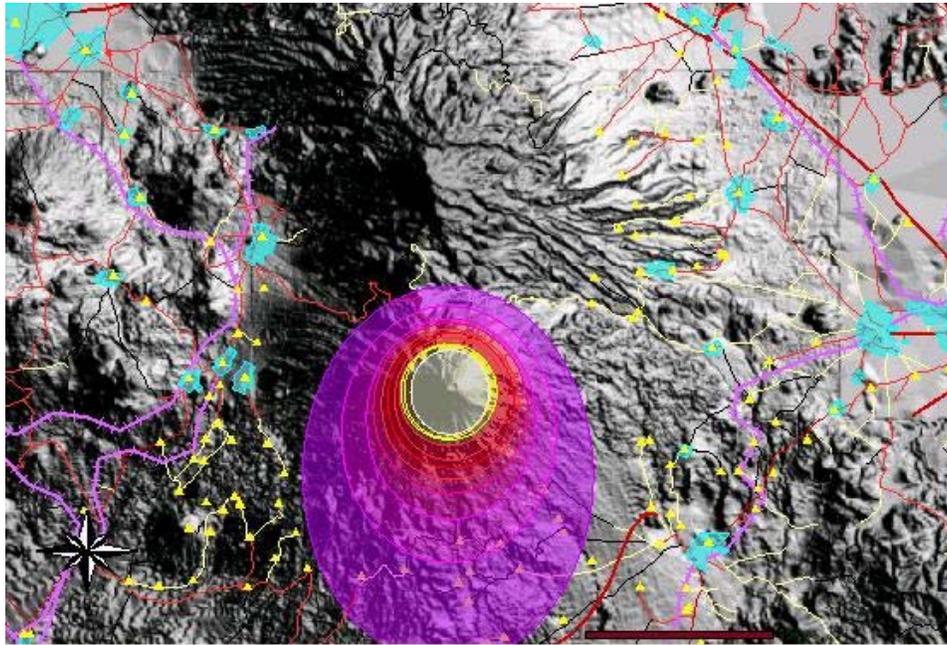


Figura 3.11 Escenarios de depositación de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento, altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al sur

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conocer la historia pasada de caída de ceniza en la entidad de interés, proveniente tanto de volcanes cercanos como de volcanes activos lejanos que pudieron afectarla en el pasado, de acuerdo a los patrones de vientos dominantes en las zonas de los volcanes. Los datos sobre vientos (dirección predominante y velocidad) son relevantes en la evaluación de peligros de ceniza. Analizar los patrones de vientos de las poblaciones de interés. Se deben considerar siempre los peores escenarios. Si no existe información local, se deberá tomar la decisión sobre si se justifica la preparación de un mapa de zonificación de peligros por caída de ceniza. Un experto de peligros volcánicos puede aconsejar sobre el grado de peligro y sobre el esfuerzo que deberá dedicarse a estudios adicionales y medidas de mitigación.

Si se determina que los peligros volcánicos a largo plazo pueden ocurrir en el área de estudio y no existe un mapa de zonificación de peligros por caída de ceniza volcánica, debe prepararse uno, en este caso será necesario obtener los servicios de un experto en peligros volcánicos. Los peligros a largo plazo no deben ser ignorados, ya que las erupciones de los volcanes considerados dormidos o inactivos han sido las responsables de grandes daños.

Iniciar con la preparación de mapas de zonificación de peligros por caída de ceniza y continuar con un mapa de riesgos. Esto permitirá la toma de medidas óptimas de protección y mitigación en cada zona. Asimismo, identificará áreas, población e infraestructura que estén más en riesgo. Establecer un programa educacional sobre los riesgos de caída de ceniza para la salud y el entorno para los residentes locales bajo riesgo, las autoridades locales, y las organizaciones de protección civil. Finalmente, establecer un sistema apropiado de alerta para las poblaciones que puedan estar bajo riesgo.

BIBLIOGRAFÍA

Blong R.H. (1984) Volcanic Hazards Academic Press.

Carey S., Sigurdsson H. (1982) Influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens volcano. *J. Geophys. Res.* 87: 7061-7072.

Carey S.N. (1996) Modeling of tephra fallout from explosive eruptions. In *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, R. Scarpa and R. I. Tilling (Eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 429-461.

CENAPRED e Instituto de Geofísica de la UNAM. (2003). Las Cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria. *SEGOB*. 164 p.

De la Cruz-Reyna S. (1991) Poisson-distributed patterns of explosive activity. *Bull. Volcanol.* 54: 57-67.

De la Cruz-Reyna S. (1993) Random patterns of occurrence of volcanic eruptions at Colima Volcano, Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 55: 51-68.

De la Cruz-Reyna S. (1995) Un Código de Alerta para el Manejo de Emergencias Antes y Durante Potenciales Erupciones del Volcán Popocatepetl. En: *Volcán Popocatepetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*. CENAPRED-UNAM: 327-333.

De la Cruz-Reyna S. (1996) Probabilistic analysis of future explosive eruptions. En : R. Scarpa y R.I. Tilling (Editores) *Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards*. Springer. Berlin. pp 599-629.

De la Cruz-Reyna, Carrasco Núñez G. (2002) Probabilistic hazard analysis of Citlaltépetl (Pico de Orizaba) Volcano, eastern Mexican Volcanic Belt. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 113: 307-318.

González-Mellado A. O. (2000) Modelo Semiempírico de Depósitos de Caída en Volcanes. Tesis MC. UNAM: 230 pp.

Institute of Geological and Nuclear Sciences, New Zealand. (2003) <http://www.gns.cri.nz/what/earthact/volcanoes/hazards/>.

Macías J.L., Carrasco-Núñez G., Delgado-Granados H., Martín Del Pozzo A.L., Siebe C., Hobbitt R.P., Sheridan M.F., Tilling R.I. (1995) Mapa de peligros del volcán Popocatepetl. UNAM-CENAPRED.

Martín Del Pozzo A.L., Sheridan M.F., Barrera D., Lugo-Hubp J., Vázquez L. (1995) Mapa de peligros del volcán de Colima. UNAM.

Ortíz R. (editor) (1995), "Riesgo Volcánico", Serie Casa de los Volcanes No. 5, Cabildo de Lanzarote, Consejería de Cultura, Islas Canarias, España, pp. 304.

Sheridan M.F., Carrasco-Núñez G., Hubbard B.E., Siebe C., Rodríguez-Elizarrarás S. (2001) Mapa de peligros del volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba). México.

Siebert L., Calvin C.L., Kimberly P., Luhr J.F., Kysar G (2003) Volcanoes of Mexico (CD-ROM) Smithsonian Institution, Global Volcanism Program, Digital Information Series GVP-6.

UNDRO/UNESCO (1985) Volcanic Emergency Management. United Nations, New York: 86 pp.

IV. EVALUACIÓN DE PELIGROS POR LAHARES

Alicia Martínez Bringas, Ángel Gómez Vázquez y Teófilo Hernández Alcántara

RESUMEN

Los lahares representan un peligro de importancia significativa debido a su rápido emplazamiento, a las largas distancias alcanzadas y a su tremendo potencial destructivo. En este documento se describen conceptos generales sobre este peligro volcánico. El conocimiento de las características, trayectorias y probabilidad de ocurrencia de los lahares es crítico en los programas de mitigación de peligros volcánicos. Debido a la disponibilidad de topografía digital, es posible obtener trayectorias de los lahares a través del uso de modelos o simuladores en una topografía más natural, y lograr una percepción más clara de las zonas expuestas a este peligro. Mediante el empleo del programa de simulación "LAHARZ" se elaboraron mapas de escenarios de lahares en algunos de los volcanes de las categorías 1, 2 y 3. Asimismo, se muestran los aspectos principales que se deben de cubrir para la correcta evaluación del peligro por lahares, y se pone de manifiesto la necesidad de recurrir a instituciones de investigación o empresas que cuenten con los recursos materiales y humanos capacitados en materia de riesgos y peligros volcánicos para su elaboración.

4.1 INTRODUCCIÓN

El vulcanismo en México es un hecho presente, lo que se pone de manifiesto por los más de 2000 volcanes que alberga el territorio nacional. El territorio está afectado por un vulcanismo muy variado, importante, reciente y antiguo de carácter activo e inactivo. Como se mencionó en el capítulo anterior, la mayor parte del vulcanismo está relacionado con las interacciones entre las placas tectónicas de Rivera y Cocos y la Placa Norteamericana y se manifiesta principalmente en la Faja Volcánica Mexicana (FVM). Esta faja abarca completamente el territorio de dos entidades federativas y parte de otras doce, cuya población asentada en la zona de influencia es de más de 36 millones de habitantes. Sin embargo, existen además otros volcanes activos que no pertenecen a la FVM, pero que también representan un alto nivel de peligrosidad como son el Chichón y Tacaná en el Estado de Chiapas, así como el volcán Tres Virgenes localizado en la península de Baja California y los volcanes Bárcena y Everman en las islas Socorro y Guadalupe, entre otros.

Después de las erupciones del Mt. St. Helens, (Washington, USA), en 1980, y del Nevado del Ruiz (Colombia), en 1985, la comunidad científica internacional empezó a brindar atención al fenómeno de los "lahares" o flujos de lodo, que constituyen, uno de los fenómenos volcánicos asociados más impactantes y devastadores.

Adicionalmente a la evaluación de los lahares como peligro volcánico, deben tomarse en consideración factores que se derivan de la vulnerabilidad de las poblaciones y la infraestructura distribuidas en el entorno del volcán, de esta forma podrán estimarse los riesgos volcánicos como la probabilidad de afectación o porcentaje de pérdida de determinados bienes ubicados en una región específica, por efecto de esta manifestación volcánica en un intervalo de tiempo dado. De la

estimación de los peligros y los riesgos es posible diseñar las medidas de preparación y prevención que permitan reducirlos o evitarlos.

El objetivo de esta guía es proporcionar los elementos que lleven a concebir a los lahares como factor de peligro o amenaza, así como poner de manifiesto la necesidad de la creación de mapas de trayectorias de lahares a través del uso de Modelos o simuladores en una base topográfica de aquellos volcanes considerados peligrosos o activos para definir áreas de inundación potencial, utilizando algún programa de computadora de modelación, como lo es el LAHARZ desarrollado por el USGS. Una adecuada percepción del peligro permitirá diseñar las medidas óptimas de preparación y prevención para enfrentar, reducir o evitar los daños por lahares en México.

4.2 LOS LAHARES COMO DESASTRE NATURAL

La distribución geográfica de los desastres volcánicos está fuertemente influenciada por la proximidad de la actividad volcánica a las áreas de mayor densidad de población. Los análisis de la distribución global de las poblaciones con respecto al vulcanismo reciente revelan que las más altas densidades de población cercanas a volcanes se encuentran en el Sureste de Asia y México-América Central. Estas dos regiones junto con América del Sur durante el siglo pasado experimentaron los mayores efectos por incidentes relacionados con el vulcanismo en el mundo. Esto aunado al continuo desarrollo de población, resultará en el futuro en forma significativa, mayor el número de personas que estará expuesta a los peligros volcánicos que en el pasado.

Para cuantificar el número de gente expuesta a los peligros volcánicos Ewert y Harpel (2004) han desarrollado un Índice de Población Volcánica (VPI, por sus siglas en inglés) el cual da una idea del número de personas viviendo cerca de un volcán. Ellos calcularon dos medidas de VPI basados en radios de 5 y 10 km desde el cráter del volcán. Los resultados mostraron que en promedio las personas que resultarían impactadas por eventos volcánicos es substancialmente más alto en poblaciones de ingresos medios a bajos que en poblaciones de ingresos altos.

La exposición a los peligros volcánicos es significativo en el desarrollo de ciudades y continúa incrementándose. A principios de los años 90's, más de 500 millones de personas, aproximadamente el 9% de la población del mundo, vivían en zonas de influencia de los peligros volcánicos.

Al determinar cuál es la población vulnerable a los eventos volcánicos en cada caso, se debe considerar el hecho de que no se requieren grandes erupciones para que ocurra un desastre, sino que cada erupción y circunstancia será diferente. Un ejemplo bien conocido es el trágico caso del volcán Nevado del Ruiz, en Colombia, ocurrido el 13 de noviembre de 1985, cuando una erupción relativamente pequeña originó uno de los peores desastres volcánicos de la historia. Los flujos piroclásticos erosionaron catastróficamente el glaciar y la nieve de la cumbre del volcán, formó un lahar que arrasó varias poblaciones, incluyendo la ciudad de Armero, a 55 km de distancia causando cerca de 23,000 víctimas, más de 5,000 heridos y destruyendo más de 5,000 casas. El lahar llegó a Armero dos horas y media después de la erupción, por lo que de haber existido un sistema adecuado de alertamiento, se hubiera contado con tiempo suficiente para evacuar la población a sitios altos cercanos.

A diferencia de muchos peligros naturales, en el caso de las erupciones volcánicas, es posible anticipar la ubicación de las erupciones, así como la población en riesgo. Debido a que las erupciones tienen precursores y generalmente se pueden pronosticar, es posible que las poblaciones próximas al volcán puedan ser alertadas y así tomar las medidas necesarias en cada caso.

En este capítulo se analizan los lahares, los cuales constituyen uno de los mecanismos eruptivos más peligrosos para las personas que viven en las proximidades de los ríos que descienden de un volcán. En las tablas 4.1 a 4.3 se presentan algunos efectos y alcances de los lahares obtenidos de experiencias en diferentes volcanes del mundo.

Tabla 4.1 Efectos y alcances de los lahares

Manifestación	Peligro asociado	Velocidad	Alcance	Efecto más frecuente
Lodo (agua y fragmentos)	Flujo de lodo (lahar)	Media a alta	Intermedio a largo	Devastación

Tabla 4.2 Probables efectos de los lahares

Peligro	Efecto
Lahares	Daños a estructuras. Arrastres de materiales. Recubrimiento por barros.

Tabla 4.3 Víctimas de lahares de 1783 a 1997

Evento	No. de víctimas	Porcentaje
Lahar (lodo volcánico)	37,993	17.1% del total de víctimas por erupciones volcánicas

4.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS LAHARES O FLUJOS DE LODO

El término "lahar" es una palabra del idioma de Java (Indonesia) que se utilizó para describir a una "brecha volcánica transportada por el agua".

Más recientemente, Pierson (1985) definió a los lahares como "flujos de lodo o de escombros, de origen volcánico, compuestos por una suspensión densa y viscosa de gravas mal clasificadas, arenas, lodo y agua"; o, una mezcla de sedimentos, agua y lodo. En la definición, el adjetivo "volcánico" se refiere a los mecanismos que dan inicio a la formación de un lahar, directa o indirectamente relacionados con una erupción volcánica.

En general, la descripción actualmente más generalizada se refiere a los lahares como "mezclas de detritos de todos los tamaños, con agua lodosa, que se desplazan velozmente desde las laderas de un volcán, desencadenadas directa o indirectamente por una erupción volcánica". Durante su desplazamiento se comportan como una colada de cemento armado que fluye por los cauces naturales de la red hidrográfica.

Por lo tanto, los lahares son flujos rápidos, a veces catastróficos y se forman cuando masas sueltas de escombros no consolidados, tales como ceniza depositada en los flancos de un volcán, depósitos glaciares, escombros de flujos piroclásticos y de avalanchas de roca, se han saturado de agua volviéndose inestables. La mayoría de los lahares son fríos, pero algunos son calientes, o de temperatura que se aproxima incluso a la de ebullición.

El agua puede proceder, entre otros factores, de la lluvia, de la fusión de nieve o hielo, o del desbordamiento del lago de un cráter. Los flujos pueden descender grandes distancias a través de los valles; se mueven a altas velocidades (de 40 hasta 100 km/h), dependiendo de la pendiente y de su fluidez. El principal peligro para la vida humana debido a estos flujos, es el enterramiento y/o el impacto de bloques y otros escombros.

Los lahares amenazan la vida y propiedades tanto en los volcanes como en los valles hacia los que drenan. Debido a su alta densidad y a su velocidad, los lahares pueden destruir la vegetación, campos de cultivo y obras de infraestructura, o bien, sepultarlos profundamente y rellenar cauces de río. El aumento en la sedimentación puede afectar la capacidad de navegación de algunos canales.

Los edificios y otros bienes que estén en el camino del flujo pueden ser destrozados, enterrados completamente o arrastrados. Debido a su alta velocidad, los flujos pueden mover y aun arrastrar objetos de gran tamaño y peso, tales como puentes, vehículos, grandes árboles, etc. Estas avalanchas son muy destructivas, pueden cruzar sobre colinas o cerros poco elevados y causar el deslizamiento de las riberas y colinas cercanas al río. Además, pueden avanzar decenas de kilómetros y dejar su carga (lodo, árboles, estructuras, rocas, etc.) en sitios alejados del volcán, formando espesores de más de 5 metros de escombros. En ciertos casos han enterrado a poblaciones que estaban en su camino, o cambiado el curso de grandes ríos. En la última década tales flujos han causado la muerte de decenas de miles de personas.

Los lahares se clasifican de acuerdo al contenido de detritos, en la tabla 4.4 se describen los tipos de lahares según la clasificación propuesta por Pierson (1986), a partir de las observaciones de los lahares del Mt. St. Helens (1980).

Hidráulicamente los flujos de lodo o lahares, compuestos por líquido y sólidos se pueden tratar aproximadamente como un fluido newtoniano que está definido por dos características físicas: densidad y viscosidad.

La densidad de los lodos está comprendida entre 1.0 gr/cm³ y 2.0 gr/cm³. El valor más bajo se aplica cuando el volumen de sólidos en la mezcla fluida es inferior al 20% del total; el más alto cuando esa relación es superior al 80%. La viscosidad absoluta del agua clara a 20°C de temperatura es de 1 centímetro poise. En lodos muy espesos la viscosidad absoluta puede alcanzar valores próximos a 6,000 poises.

Tabla 4.4 Clasificación de lahares (Pierson, 1986)

Denominación	Contenido de Detritos
Lahar	Son mezclas fluidas de agua y sólidos granulares, sumamente viscosas, capaces de transportar partículas del tamaño de la grava y la concentración de partículas sólidas es de 75 a 90% en peso.
Flujos Hiperconcentrados	Son mezclas fluidas de agua y sólidos granulares donde la concentración de partículas sólidas es de 40 a 70% en peso.
Flujos de agua turbulenta	Pequeños porcentajes , menores a 40%.

4.3.1 Mecanismos de activación de los lahares

Los mecanismos de activación de lahares constituyen el elemento primordial que se emplea para clasificar los lahares. Con base en esto se establecen las siguientes categorías generales:

- a) Directamente relacionados con las erupciones (lahares primarios)
 1. Mezcla de escombros de roca y agua en las laderas de un volcán.
 2. Explosiones volcánicas que desaguan lagunas cratéricas.
 3. Aguaceros torrenciales que mezclan agua con tefra recién depositada u otro material no consolidado.
 4. Ocurrencia simultánea de tormentas y columnas eruptivas.
 5. Flujos piroclásticos al ingresar a ríos e incorporar agua.

- b) Indirectamente ligados a una erupción, o que ocurren poco después de la misma (lahares secundarios).
 1. Lluvia de tefra asociada con un incremento en el coeficiente de escorrentía.
 2. Transformación de avalanchas de escombros saturadas en agua.
 3. Destrucción repentina de represas formadas por flujos de lava, avalanchas de escombros, flujos piroclásticos y desbordamiento o derrumbe de bordes cratéricos.
 4. Iniciados por sismos.

En cuanto al origen del agua, existen básicamente las siguientes posibilidades:

- a) Evacuación violenta de la masa de agua acumulada en lagunas cratéricas, por efecto de una erupción volcánica.
- b) Fusión de la nieve y glaciares por la acción de flujos piroclásticos.
- c) Lluvias torrenciales, que en algunos casos pueden ser generadas por tormentas relacionadas con las plumas convectivas de las erupciones volcánicas explosivas.

En resumen, la condición indispensable para que se forme un lahar es la presencia contemporánea de grandes volúmenes de agua y detritos que al juntarse, fluyen a altas velocidades y pueden recorrer grandes distancias.



Figura 4.1 La erupción del 13 de noviembre de 1985 del Nevado del Ruiz causó 23,000 víctimas mortales y la desaparición total de la población de Armero al ser arrastrada por un lahar, el cual a su vez desbordó la cuenca del río Lagunillas. En esta ocasión, el Nevado del Ruiz (izquierda), tenía en su cumbre una gruesa capa de hielo y nieves, que se derritieron con las explosiones y altas temperaturas que se alcanzaron en el cráter. Todo el material derretido rodó por las laderas del monte llegando hasta el valle de Armero (derecha) donde provocó la catástrofe

Algunos de los lahares primarios más grandes y catatróficos que han ocurrido en épocas históricas se originaron en volcanes recubiertos por una gruesa capa de hielo glacial, como fue el caso del Nevado del Ruiz en Colombia, cuya erupción, en 1985, causó más de 23,000 víctimas (figura 4.1), o el Mount St. Helens (Washington, USA, 1980) (figura 4.2).

Cuando el deshielo es el origen del agua, las dimensiones del casquete glacial como son el espesor y el área de cubrimiento del casquete de hielo, será un dato importante en la determinación de la magnitud del lahar.

La súbita liberación del agua almacenada en lagunas cratéricas, por efecto de erupciones volcánicas, desencadenaron voluminosos lahares en el Mt. Ruapehu (Nueva Zelandia) en 1968 y 1975.



Figura 4.2 *A los pocos minutos de la erupción del 18 de mayo de 1980 del Monte St. Helens, numerosos lahares se generaron en los flancos del volcán, la fotografía muestra algunos de los efectos de los lahares (izquierda). El agua de la lluvia se mezcló con la ceniza volcánica de la erupción del Chichón de 1982, produciendo grandes cantidades de lodo que fluyeron destructivamente seis semanas después de terminada la erupción, al inicio de la estación de lluvias (derecha). Foto de S. De la Cruz*

Un ejemplo de lahares secundarios originados por lluvias torrenciales que se precipitaron sobre las cenizas y otros materiales no compactados acumulados en las laderas del volcán después de una erupción, es el caso de los devastadores lahares que se produjeron, en 1991, en el volcán Pinatubo (Filipinas) como resultado de una rápida erosión de los depósitos de flujo piroclástico debido a las lluvias de los tifones (figura 4.3).



Figura 4.3 Lahar formado el 31 de octubre de 1991, después de la erupción de junio del mismo año en el volcán Pinatubo, viajó a una velocidad de 3-5 m/s. Este lahar no fue producido directamente por la erupción sino posteriormente disparado por una lluvia menor, removiendo los gruesos espesores de ceniza depositados por la erupción (izquierda). La secuencia muestra como los lahares fueron cubriendo la estación de gasolina a lo largo de los tres años posteriores a la erupción de junio de 1991 (derecha). Foto U.S.G.S

Una vez formados, los lahares pueden recorrer grandes distancias que dependen, básicamente, de la pendiente del terreno. El lahar del Nevado del Ruiz, en 1985, recorrió 55 km con una diferencia de nivel de 5,000 m. En 1877, los lahares del Cotopaxi se desplazaron 300 km, hasta llegar al Océano Pacífico, con un desnivel de casi 6,000 m.

Durante el recorrido, los cambios de la pendiente del cauce influyen sensiblemente sobre la velocidad y turbulencia y, por lo tanto, controlan la capacidad de arrastrar o depositar los sólidos en suspensión. De manera general, cada vez que se reduce la pendiente se depositan materiales; en cambio, cuando se incrementa, se presenta erosión de los depósitos aluviales existentes no compactados, rocas sueltas y otros objetos que se encuentren en su camino.



Figura 4.4 La foto muestra los depósitos de los lahares originados en el volcán Popocatepetl por la erupción del 23 de enero de 2001 (izquierda) y en el volcán de Colima en junio de 2000, (derecha)

En la figura 4.4 se muestran los depósitos de los lahares registrados en el Popocatepetl en enero de 2001 originados después de la erupción del 23 de enero de 2001, y en el volcán de Colima en junio de 2000.

4.3.2 Volumen, velocidad y caudal de los lahares

La peligrosidad asociada con los lahares se atribuye a su magnitud (volumen y extensión), la cual a su vez depende del volumen de agua disponible, del gradiente y de la profundidad de las barrancas o drenajes, de la fluidez del flujo y de la cantidad de material suelto en los alrededores del volcán.

La magnitud del lahar también se relaciona con los componentes de la erupción volcánica, como son, el tipo de erupción, la frecuencia, magnitud y duración del evento y con el volumen del aporte de agua.

La duración del evento eruptivo es un factor que influye significativamente en la determinación del volumen y en la magnitud del caudal líquido que se genera.

Dependiendo de las características de la explosión y del volumen del aporte de líquido, se genera un caudal líquido de cierta magnitud que corre hacia las corrientes superficiales de drenaje que se encuentran en la región. En su recorrido el caudal líquido atrapa material sólido y se mezcla con él, formando el fluido viscoso.

Los volúmenes de agua y detritos movilizados por los lahares pueden alcanzar valores importantes, como es el caso del volcán St. Helens en la erupción de mayo de 1980, sus volúmenes variaron entre 13.5 y 40 millones de metros cúbicos.

La reconstrucción de los lahares del Citlaltépetl de hace 18 mil años ha evidenciado un volumen del orden de 1,800 millones de metros cúbicos.

Tabla 4.5 Resumen de las propiedades físicas estimadas de algunos lahares (Modificada de Blong, 1984)

Peligro o amenaza	Distancia a la que se extiende el efecto		Área afectada		Velocidad de la manifestación		Temperatura característica (°C)
	Promedio (km)	Máxima (km)	Promedio (km ²)	Máxima (km ²)	Promedio (m/s)	Máxima (m/s)	
Lahares	10	300	5-20	200-300	3-10	30 +	Hasta 100

En el Mt. Rainier (Washington, USA) los lahares originados por una erupción de hace aproximadamente 5,000 años alcanzaron un volumen gigantesco, de alrededor de 2,000 millones de metros cúbicos, que cubrieron extensas áreas, de hasta unos 100 km de distancia del volcán.

En cuanto a las velocidades, se han obtenido algunas estimaciones para los flujos de algunos volcanes dependiendo de la distancia desde su origen, como por ejemplo en el Nevado del Ruiz (1985) la velocidad fue de 5 a 15 m/s; en el St. Helens (1980) de 5 a 40 m/s y en el volcán Ruapehu de Nueva Zelanda (1975), variaron entre 3 y 10 m/s. La tabla 4.5 muestra algunas características de los lahares.

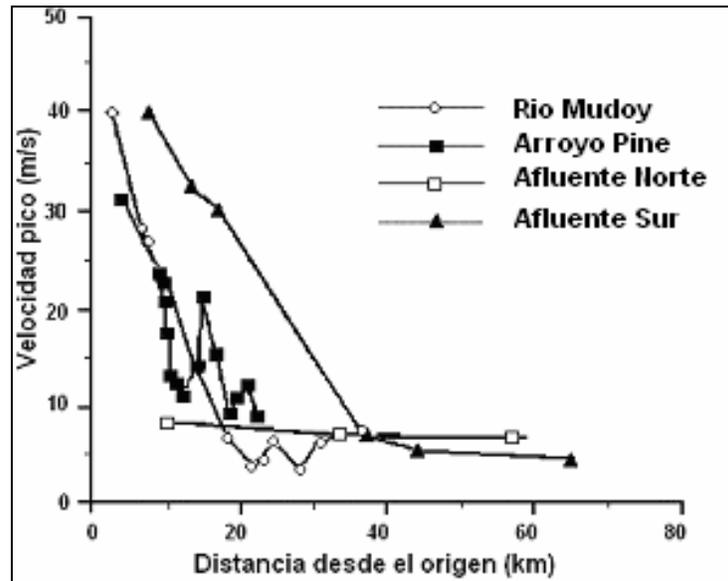


Figura 4.5 Velocidades de los lahares del Mt. St. Helen generados en la erupción de 1980 (Fairchild 1985)

Algunos factores que pueden afectar la velocidad de los lahares son, el mecanismo de iniciación, el volumen, la geometría y pendiente de los cauces por los que viajan, y, principalmente, el contenido de detritos. Para recorridos largos se han estimado, valores de entre 20 y 40 km/h como promedio. En la figura 4.5 se muestran las velocidades y distancias alcanzadas por los lahares del volcán St. Helens originados durante la erupción de 1980 (reconstruidos por Fairchild 1985).

Los caudales iniciales son también muy variables. Por ejemplo, en el Mt. St. Helens, durante la erupción de 1980, en el río Pine Creek, se midió un caudal de 19,000 m³/s. Al ingresar en el East Fork Pine Creek, alcanzaba 29,000 m³/s. En el South Fork el caudal pico llegó a 68,000 m³/s, a 4 km de distancia del volcán.

Los lahares pueden movilizar, en cortos periodos de tiempo, enormes volúmenes de agua y detritos que generan caudales extraordinarios, del orden de decenas de miles de metros cúbicos, que viajan por cañadas y ríos. Una vez formados, los lahares pueden cubrir distancias variables que van a depender de la pendiente o diferencia de nivel entre el punto en que se originan y en el que agotan su energía cinética.

Debido a las características de caudales y velocidades de desplazamiento, los lahares adquieren un carácter de alta peligrosidad, sólo en el siglo XX, causaron cerca de 30,000 víctimas, que representan el 38% de todas las muertes causadas por las erupciones volcánicas en ese siglo (tabla 4.6).

Tabla 4.6 Víctimas Causadas por los lahares generados en algunas erupciones notables (Yokoyama et al., 1984)

Volcán	País	Año	No. Víctimas
Kelut	Indonesia	1586	10,000
Awu	Indonesia	1711	3,200
Coyopaxi	Ecuador	1741	1,000
Galunggung	Indonesia	1822	4,000
Nevado del Ruiz	Colombia	1845	1,000
Awu	Indonesia	1856	3,000
Cotopaxi	Ecuador	1877	1,000
Awu	Indonesia	1892	1,530
Kelut	Indonesia	1919	5,110
Nevado del Ruiz	Colombia	1985	>22,000
Total			53,900

Al carácter particularmente destructivo de los lahares, se le pueden adicionar, además de la elevada energía y capacidad de remoción y arrastre de sólidos, los siguientes factores agravantes complementarios:

1. La inusitada presencia de asentamientos humanos ubicados muy cerca de las riberas de los ríos.
2. El bajo grado de percepción del peligro entre las personas que habitan las zonas relativamente alejadas de los conos volcánicos que, por lo tanto, creen estar exentos de la acción destructiva de los lahares.

La tabla 4.7 muestra los periodos de alerta y la capacidad de causar daño, de acuerdo a experiencias de lahares históricos en todo el mundo.

Tabla 4.7 Periodos de alerta de los lahares y capacidad para causar daño (modificado de Blong, 1984)

Peligro o amenaza	Periodo de alerta	Capacidad para causar daño severo	Probabilidad de lesiones severas o muerte
Lahares	Minutos a horas	Muy alto	Muy alto

4.3.3 Componentes de un lahar

En el análisis y simulación hidráulica de los flujos de lodo o lahares se reconocen los siguientes componentes (figura 4.6):

- a) Tramo inicial de formación de los lodos
- b) Tramo de transporte de lodos y de incremento del volumen de sólidos
- c) Tramo de transporte y depósito de material sólido
- d) Tramo final, de depósito de los sólidos

a) Tramo inicial de formación de los lodos

El caudal que es producido por el evento que genera el flujo viaja sobre el terreno, en su recorrido captura material suelto y comienza a formar los lodos. En estas condiciones el caudal total y la viscosidad se incrementan a medida que el flujo se acumula y se dirige hacia las corrientes principales de drenaje.

Las corrientes principales de drenaje se definen a partir de una sección de entrada cuya localización depende de las condiciones topográficas de la zona.

b) Tramo de transporte de lodos y de incremento del volumen de sólidos

Una vez que el caudal entra al cauce su comportamiento hidráulico queda definido por las ecuaciones de continuidad, energía y cantidad de movimiento en canales. Generalmente el primer tramo del canal es encañonado, de fuerte pendiente, y tiene gran capacidad de transporte.

Se debe contemplar tanto el aspecto variable del flujo como las ganancias de caudales sólido y líquido en aquellos tramos donde la socavación del lecho, los deslizamientos de los taludes y los aportes de tributarios sean importantes.

El cambio en la cantidad de movimiento está relacionado con las fuerzas que ejerce el fluido sobre el contorno del cauce en razón de la fricción y de los cambios de dirección.

c) Tramo de transporte y depósito de material sólido

A continuación del tramo de alta pendiente se presenta un tramo de transición en el cual la pendiente va cambiando de alta a media y luego a baja. En este tramo se combinan los procesos de transporte del flujo de lodos y de depósito inicial de material sólido.

d) Tramo final, de depósito de sólidos

El tramo de entrega corresponde al tramo final de la corriente, donde la pendiente del cauce es pequeña, y desemboca en una planicie inundable que puede prolongarse hasta un río o al mar. En la planicie inundable se deposita gran parte de los lodos formando capas.

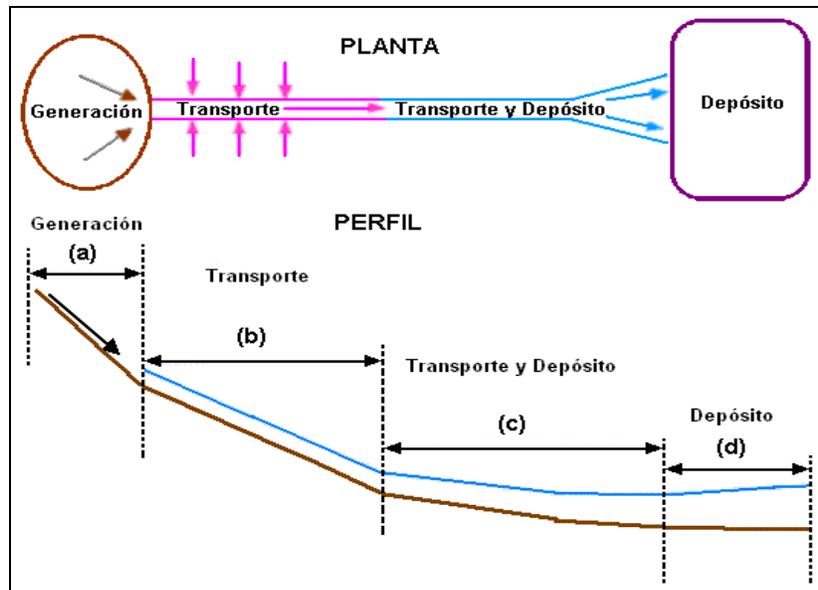


Figura 4.6 Componentes de un lahar (Tomado de G.A. Silva, 2003)

4.4 MODELACIÓN NUMÉRICA: PROGRAMA LAHARZ

La aplicación de modelos de simulación numérica acoplados a un Sistema de Información Geográfica (SIG), permite establecer las zonas que pudieran ser afectadas por la actividad volcánica. En general, cada peligro volcánico requiere de un programa específico para su simulación. Un programa de computadora para la simulación o modelación de lahares es el LAHARZ.

El programa LAHARZ es un modelo semi-empírico que permite delinear de forma objetiva y reproducible, las áreas potenciales de inundación por lahares en los valles localizados en los flancos de un volcán. Es el programa de modelación de lahares más utilizado actualmente y no tiene costo. En el CENAPRED se dispone de una copia.

El principio del método se deriva de los análisis de las trayectorias de los lahares genéricos y análisis estadísticos de 27 trayectorias de lahares documentados para nueve volcanes. El programa LAHARZ corre dentro de un SIG para lo cual utiliza un modelo digital de elevación, un volumen específico del lahar y automáticamente mapea las áreas potenciales de inundación por lahares.

La metodología consiste en delimitar las zonas de inundación con base en un procedimiento numérico. El modelo se probó por primera vez en el Mount Rainier, Washington, y las zonas de riesgo por inundación por lahares se asemejan a las construidas sobre la base de intensas investigaciones de campo (Iverson, Schilling y Vallance, 1998).

Los análisis dieron como resultados ecuaciones semi-empíricas que predicen (A) el área transversal de inundación del valle y (B) el área de planimetría como funciones del volumen del lahar (V) (figura 4.7). Las ecuaciones de predicción proporcionan toda la información necesaria

para calcular los límites de inundación que pueden graficarse en los mapas topográficos. Por medio del uso de volúmenes propuestos para el lahar a fin de evaluar A y B, se puede graficar un intervalo de límites de inundación para los lahares de volumen creciente y probabilidad decreciente (figura 4.7). La relación de la caída vertical “H” y la distancia horizontal “L” representa la línea de energía y describe la distancia que viajó el lahar y la extensión del depósito.

Los mapas resultantes muestran gráficamente que la probabilidad potencial de una inundación por lahar es más alta cerca de los volcanes y a lo largo de un cauce y disminuye gradualmente a medida que aumenta la distancia desde los volcanes y las elevaciones por encima del valle.

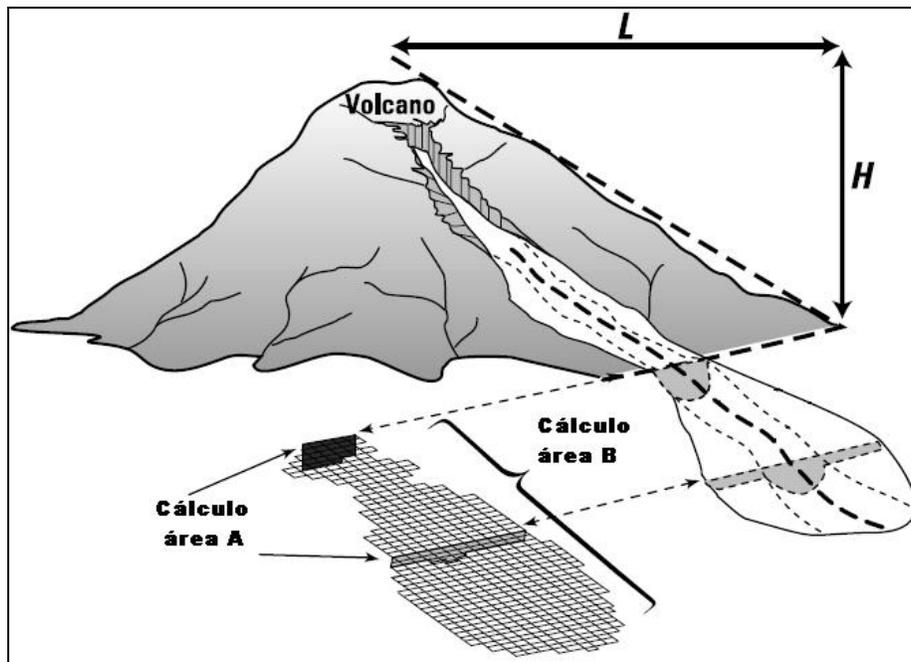


Figura 4.7 Relación entre H y L la cual describe la extensión de la zona de peligro más próxima al volcán. Áreas A y B describen la extensión de la zona de inundación más distante (Iverson et al., 1998)

4.4.1 Cartografía base

Un modelo digital de elevación es una representación raster de la superficie, y pueden variar en exactitud, resolución, proyección y extensión. El modelo digital de elevación debe presentar la máxima resolución posible en función de la información topográfica existente en la zona y debe comprender al volcán y extenderse río abajo hasta donde termina el drenaje que se origina en el volcán.

Los modelos digitales del terreno frecuentemente contienen errores de elevación. En la modelación de lahares son especialmente peligrosos los huecos, en ocasiones es recomendable suavizar el modelo, eliminando los huecos.

Debido a la cantidad de datos que es necesario manejar, todos deben ser incluidos en un SIG, donde el tratamiento e integración de éstos presentará considerables ventajas como son, datos georeferenciados, gran capacidad de manejo de datos, análisis espacial y estadístico de los datos, implementación de modelos o simuladores que han sido desarrollados para la simulación de los peligros volcánicos y presentación de resultados de fácil interpretación.

Como se mencionó en el capítulo anterior mediante la base de datos de que se disponga se deberán hacer representaciones gráficas de las áreas afectadas, de esta forma se podrán visualizar carreteras de terracería operando, carreteras libres federales, carreteras de cuota federal, caminos y veredas, núcleos urbanos, tipos de uso de suelo, canales de distribución de agua, etc., de las zonas afectadas y adyacentes. Mediante el uso de SIG además se puede tener adicionalmente la información socioeconómica, estadísticas de población, hospitales, etc.

4.4.2 Mapas de escenarios de peligro por lahares

Utilizando el programa LAHARZ se desarrollaron mapas de escenarios de algunos volcanes considerados dentro de las categorías 1, 2 y 3. Para la elaboración de los escenarios y definición de las áreas de inundación potencial, se consideraron los volúmenes registrados de 4 erupciones ocurridas en tiempos históricos en diferentes volcanes del mundo (tabla 4.8):

Tabla 4.8 Volúmenes registrados en erupciones históricas de los volcanes Nevado del Ruiz, Colombia; Santa Elena, EUA; Popocatépetl y Colima, México

Volcán	Erupción	Volumen m ³ (Iverson et al., 1998)
Nevado del Ruiz, Colombia	1985	40,000,000
Santa Elena, EUA	1980	14,000,000
Popocatépetl, México	1997	10,000,000
Colima, México	1913	5,000,000

Se utilizaron los archivos digitales de los modelos de elevación proporcionados por el INEGI, con los datos de cobertura a un segundo. A partir de estos modelos se obtuvieron las curvas de nivel a cada 100 m en promedio.

Mediante el software de sistemas de Información Geográfica (ArcGis 9.0 y ArcInfo Workstation), se desarrollaron mapas de escenarios de lahares utilizando los 4 volúmenes diferentes en cada una de las barrancas de los volcanes. Se obtuvieron las áreas de inundación derivadas de cada barranca para los cuatro volúmenes.

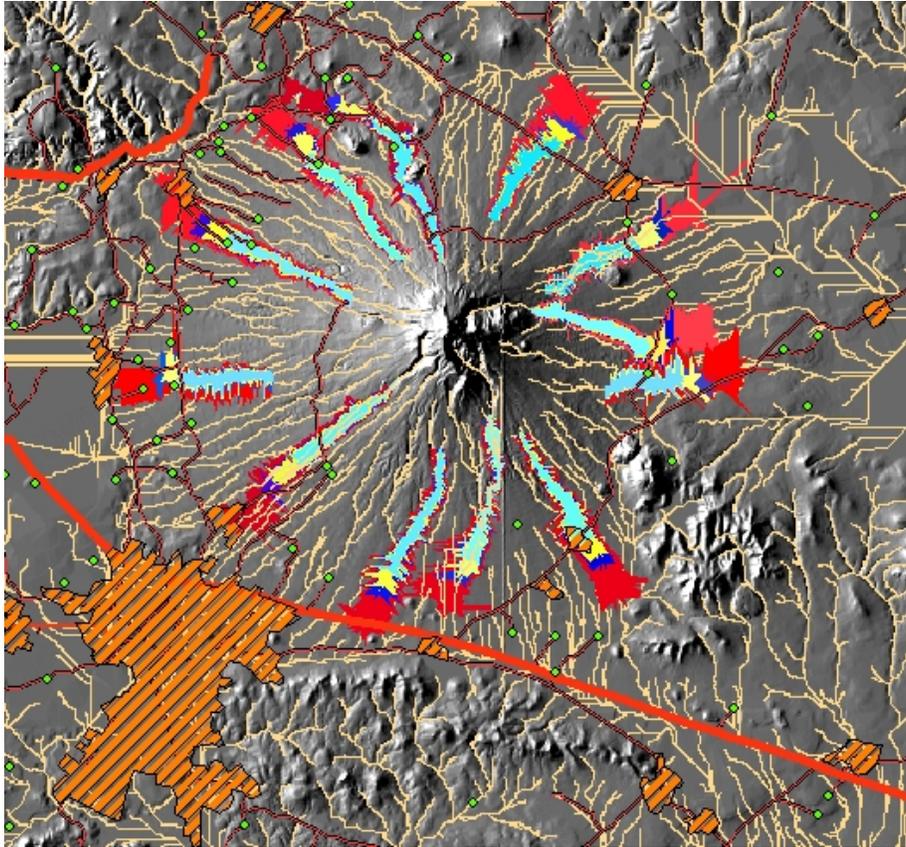


Figura 4.8 Escenarios de áreas de inundación por lahares para el Volcán La Malinche

Las hipotéticas áreas de inundación se trazaron a lo largo de los principales escurrimientos de la red de drenaje de los volcanes y fueron determinadas basándose en el concepto de línea de energía, y considerando un coeficiente de fricción en el intervalo $H/L = 0.20-0.28$ (figura 4.7). Los volúmenes utilizados fueron como ya se mencionó de 5, 10, 14 y 40 millones de metros cúbicos.

A las zonas de inundación se les asignó, de acuerdo al volumen, los colores en el siguiente orden:

- Rojo: volumen de 40 millones de metros cúbicos, que ocupa la zona de mayor peligro o afectación, en la que los lahares pueden alcanzar hasta varias decenas de kilómetros de longitud.
- Azul oscuro: volumen de 14 millones de metros cúbicos, para una afectación intermedia o moderada, con longitudes 1 hasta 3 decenas de kilómetros.
- Amarillo: volumen de 10 millones de metros cúbicos, a la zona de afectación menor, de 1 a 2 decenas de kilómetros de longitud.
- Azul claro: volumen de 5 millones de metros cúbicos, se extiende a menos de una decena de kilómetros.

En las figuras 4.8 a 4.10 se muestran ejemplos de áreas de inundación en algunos volcanes, cada capa de los escenarios e información son archivos *.shp. Los demás mapas obtenidos pueden ser consultados en la página del CENAPRED (www.cenapred.unam.mx), sección Atlas Nacional de Riesgos).

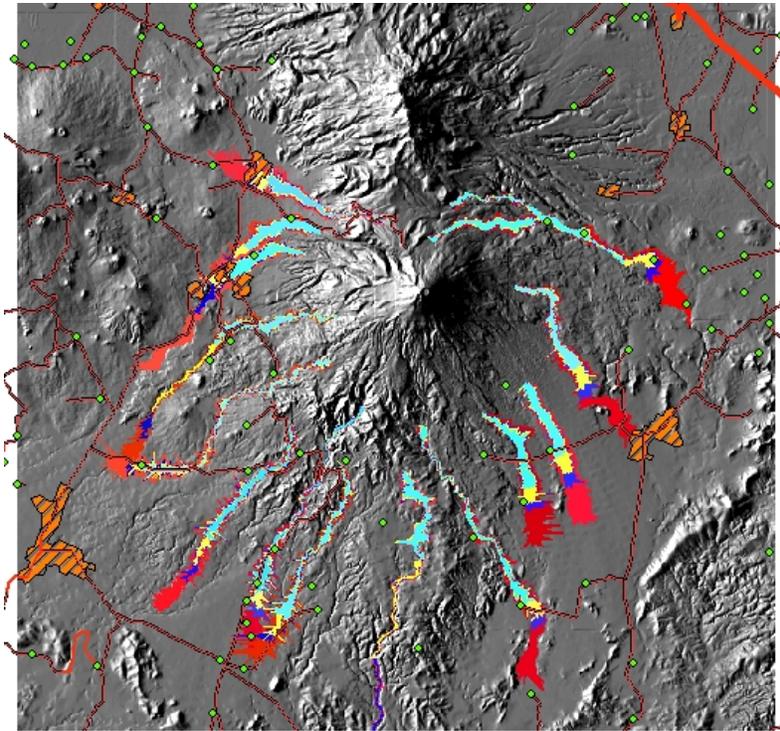


Figura 4.9 Escenario de áreas de inundación por lahares para el volcán Popocatepetl

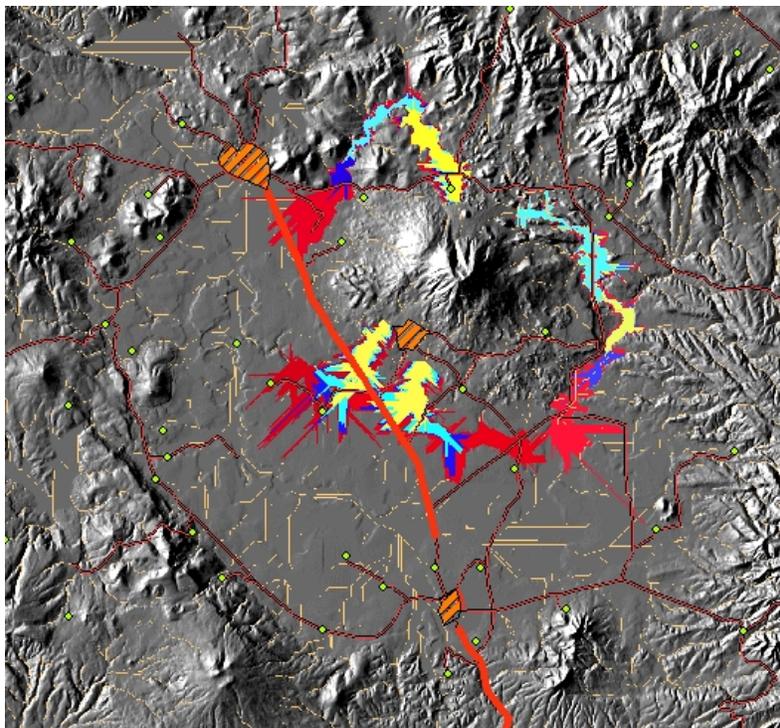


Figura 4.10 Escenario de áreas de inundación por lahares para el volcán Jocotitlán

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se debe evaluar y designar áreas que estén bajo riesgo de futuros lahares. Entender la historia pasada de los lahares con el objeto de predecir el tamaño del lahar y con que frecuencia ocurren. Los estudios deben determinar el escenario del peor caso.

Para una mitigación efectiva a los peligros del lahar se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

1. Iniciar con la preparación de mapas de peligros por lahares y continuar con un mapa de riesgos de lahares. Este mapa identificaría áreas, población e infraestructura que estén más en riesgo.
2. Desarrollar maneras de monitorear las condiciones que producen los lahares.
 - a) Medida de la intensidad de la lluvia y su duración.
 - b) Medidas periódicas de las condiciones del lecho de los ríos.
 - c) Evaluación de la fuente potencial de material que se origina en el volcán.
3. Desarrollar maneras de monitorear la ocurrencia de lahares.
4. Monitorear regularmente el efecto de los lahares en los lechos de los ríos.
5. Llevar a cabo estudios científicos que señalen necesidades críticas de investigación.
 - a) Determinar el tipo hidráulico y el comportamiento de lahares previos.
 - b) Elucidar el tamaño, la frecuencia, y los mecanismos de disparo de lahares previos.
 - c) Identificar recursos humanos e institucionales para llevar a cabo los estudios.
6. Establecer un sistema apropiado de alerta para las poblaciones que puedan estar bajo riesgo.
7. Involucrar a las comunidades locales en proyectos de investigación con el objeto de construir una red de comunicación de peligros.
8. Iniciar un programa educacional sobre los riesgos de lahares para los residentes locales bajo riesgo, las autoridades locales, y las organizaciones de protección civil, estatales y nacionales.
- 9.-La evaluación del peligro por lahares es una tarea compleja que como se vio requiere de conocimientos específicos de Geología Volcánica, Sistemas Computacionales, Cartográficos, etc. debido a lo cual ésta es una labor que debe ser realizada por personal altamente especializado.

Una manera de reducir el impacto de algunos lahares, es por medio de diques y otras estructuras especialmente diseñadas para controlar el curso de sus flujos y reducir su energía. En Japón esta tecnología se ha desarrollado mucho y se denomina ingeniería “Sabo”.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, E. et al. Numerical simulation of the lahars triggered by the 1877 eruption of Cotopaxi Volcano (Ecuador). Transactions of HIDROSOFT 96. 6th International Conference. Penang, Malaysia.

Blong R.H. (1984) Volcanic Hazards Academic Press.

Carey S.N. (1996) Modeling of tephra fallout from explosive eruptions. In Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards, R. Scarpa and R. I. Tilling (Eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 429-461.

Cleaves, Arthur B. (1961) Landslide Investigations. U.S. Department of Commerce. Bureau of Public Roads.

Cummins, J. (1981) Chronology of mudflows on the South Fork and North Fork Toutle River following the May 18 eruption. In Lipmann PW, Mullineaux DR (eds) The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington. US Geological Survey Prof. Pap. 1250, Washington DC, 479-486.

De la Cruz-Reyna S. (1991) Poisson-distributed patterns of explosive activity. Bull. Volcanol. 54: 57-67.

De la Cruz-Reyna S. (1993) Random patterns of occurrence of volcanic eruptions at Colima Volcano, Mexico. J. Volcanol. Geotherm. Res. 55: 51-68.

De la Cruz-Reyna S. (1995) Un Código de Alerta para el Manejo de Emergencias Antes y Durante Potenciales Erupciones del Volcán Popocatepetl. En: Volcán Popocatepetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995. CENAPRED-UNAM: 327-333.

De la Cruz-Reyna S. (1996) Probabilistic analysis of future explosive eruptions. En : R. Scarpa y R.I. Tilling (Editores) Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards. Springer. Berlin. pp 599-629.

De la Cruz-Reyna, Carrasco Núñez G. (2002) Probabilistic hazard analysis of Citlaltépetl (Pico de Orizaba) Volcano, eastern Mexican Volcanic Belt. J. Volcanol. Geotherm. Res. 113: 307-318.

FAO. (1987) United Nations Food and Agricultural Organization. Restauración forestal y corrección de torrentes en zonas afectadas por la erupción del Nevado del Ruiz. Bogotá.

Fiske, R. S., Volcanologists, Journalists, and the Concerned Local Public: A Tale of Two Crises in the Eastern Caribbean, Studies in Geophysics: Explosive Volcanism, National Academy Press, Washington D.C., 1984.

Friedman, F; Sanders, J. (1978) Principles of Sedimentology. John Wiley and Sons.

Henderson, F.M., (1970) Open Channel Flow. MacMillan.

Iverson R. M, Schilling S., J. Vallance (1998) Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. GSA Bulletin; August 1998; v. 110, no. 8; p. 972-984.

Macedonio, G., Pareschi, (1992) M.T. Numerical simulation of some lahars from Mt. S. Helens, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 54, 65-80.

Macías J.L., Carrasco-Núñez G., Delgado-Granados H., Martin Del Pozzo A.L., Siebe C., Hobblit R.P., Sheridan M.F., Tilling R.I. (1995) Mapa de peligros del volcán Popocatepetl. UNAM-CENAPRED.

Martin Del Pozzo A.L., Sheridan M.F., Barrera D., Lugo-Hubp J., Vázquez L. (1995) Mapa de peligros del volcán de Colima. UNAM.

Navarro C., Cortés A. (2003) Mapa de peligros del volcán de Fuego de Colima. U. de Colima.

Ortiz R. (editor) (1995), "Riesgo Volcánico", Serie Casa de los Volcanes No. 5, Cabildo de Lanzarote, Consejería de Cultura, Islas Canarias, España, pp. 304.

Pierson, T.C. (1985) Initiation and flow behavior of the 1980 Pine Creek and Muddy River lahars, Mount St. Helens, Washington, *Geolo.Soc. Am. Bull.*, 96, 1056-1069.

Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.C., Borrero, C.A. (1990) Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41; 17-66.

Sassa, K. (1986) The Mechanism of Debris Flows and the Forest Effect on their prevention. Kyoto University. Japan.

Sassa, K. (1987) The Mechanism of High Mobility in the Ontake Debris Avalanche. Proc of 8th Assian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Kyoto.

Sheridan M.F., Carrasco-Núñez G., Hubbard B.E., Siebe C., Rodríguez-Elizarrarás S. (2001) Mapa de peligros del volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba). México.

Siebert L., Calvin C.L., Kimberly P., Luhr J.F., Kysar G (2003) *Volcanoes of Mexico* (CD-ROM) Smithsonian Institution, Global Volcanism Program, Digital Information Series GVP-6.

UNDRO/UNESCO (1985) *Volcanic Emergency Management*. United Nations, New York: 86 pp.

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 Caídas 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:

Flujos de lodo:	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.
Flujos de tierra o suelo:	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.
Flujos o avalancha de detritos:	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.
Creep o flujo muy lento:	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
Lahar:	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.

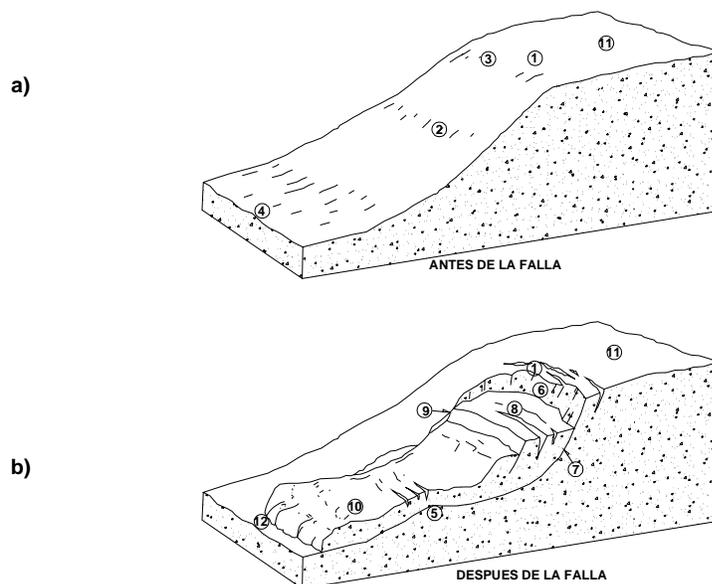


Figura 5.2 Definición de las características y partes que componen a) una ladera y b) eventualmente un deslizamiento

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 (τ_f), y el esfuerzo cortante medio que actúa en la potencial superficie de falla (τ); 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 (τ_f y τ) debido a fenómenos naturales o artificiales. Entre los primeros, que inciden directamente en el valor de τ , 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, τ_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 (σ' , que es igual al esfuerzo total menos la presión de poro) dada su naturaleza friccionante; los parámetros de resistencia son la cohesión efectiva (c') y el ángulo de fricción interna (ϕ'); así pues, cuando la presión de poro

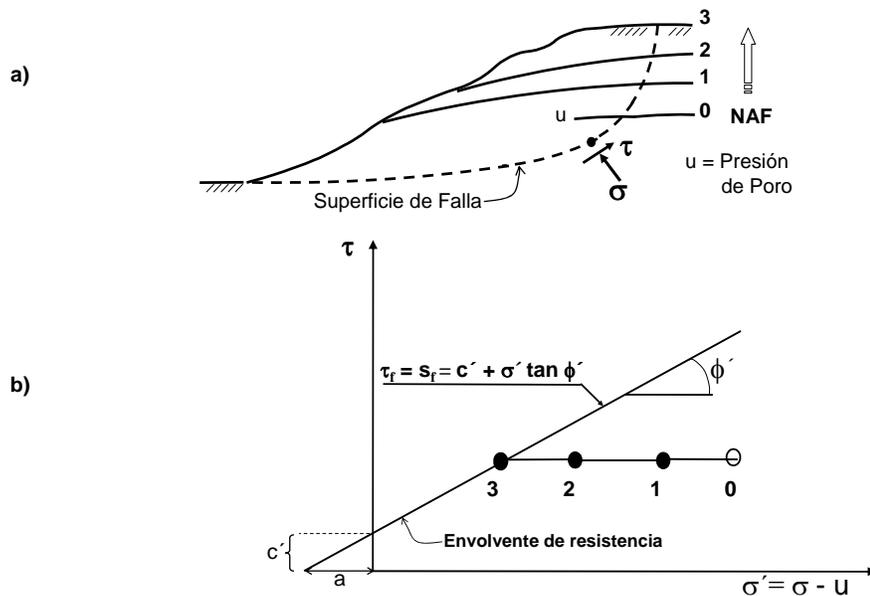


Figura 5.3 Efectos de la presión del agua sobre la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, atendiendo al nivel que alcanza dentro de la ladera

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	---

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.

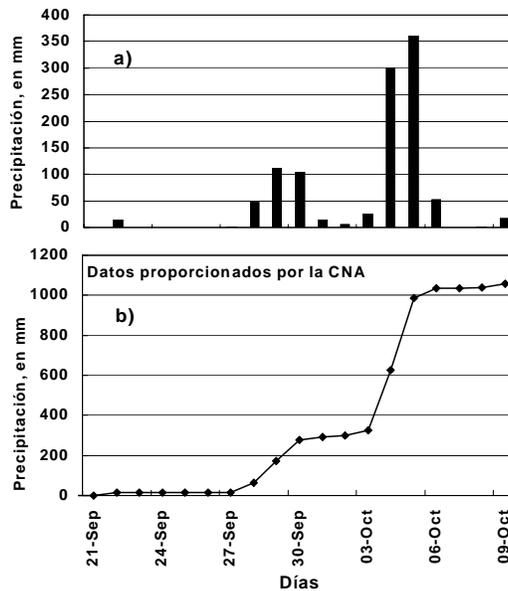


Figura 5.4 Precipitación a) diaria y b) acumulada en Teziutlán, Pue., septiembre-octubre 1999

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.

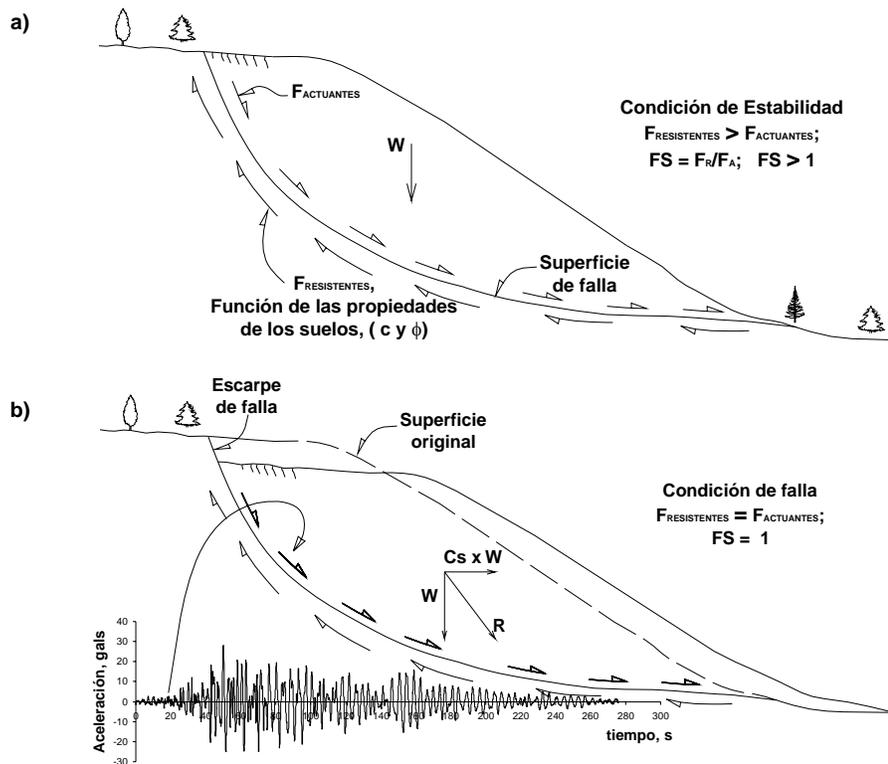


Figura 5.5 Representación esquemática de las fuerzas actuantes y resistentes que se desarrollan en una ladera: a) antes y b) durante un evento sísmico

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.

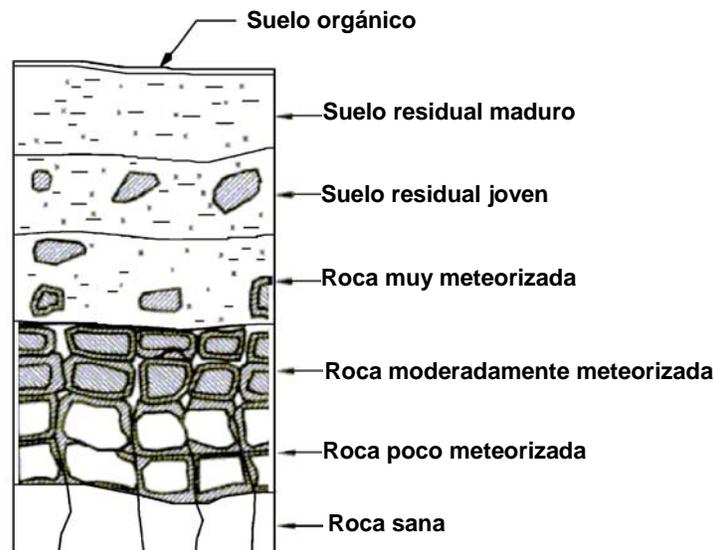


Figura 5.6 Perfil de alteración de un suelo residual y de la roca basal

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	
Paso	Etapas 1. Estimación del peligro
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
Etapas 2. Estimación del riesgo	
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. Úsese 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 Continúa. 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 reblanecen 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 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	
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	

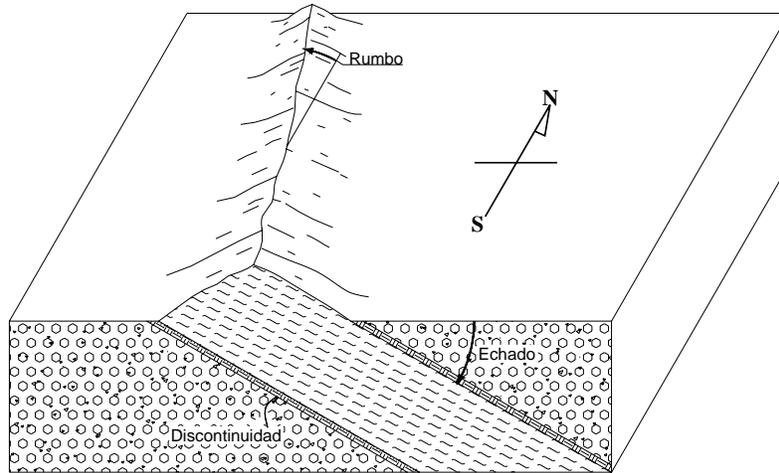


Figura 5.7 Rumbo y echado de una formación geológica

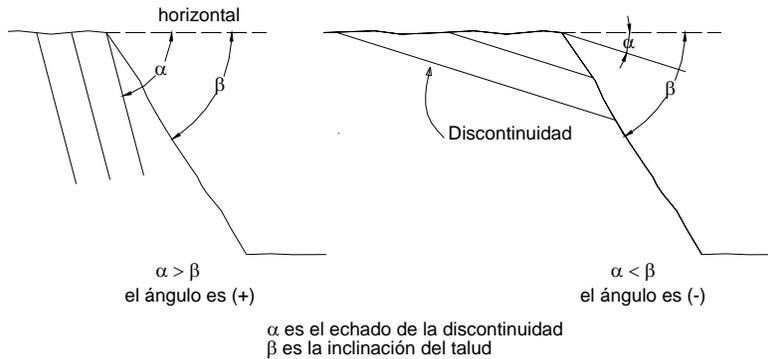


Figura 5.8 Relación entre el echado de discontinuidades y la inclinación de la ladera

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 (Hungry, 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.

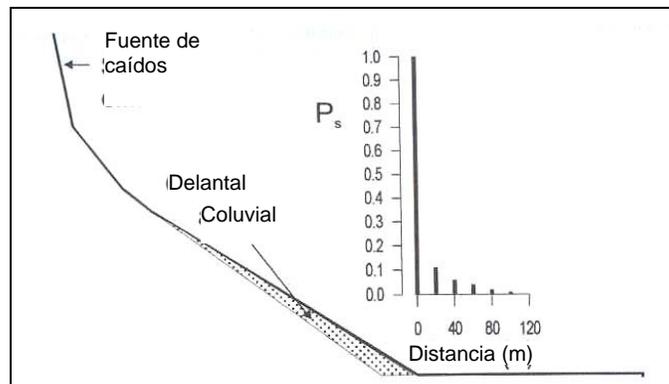


Figura 5.9 Función de probabilidad espacial a lo largo de un perfil de un pie de monte

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.

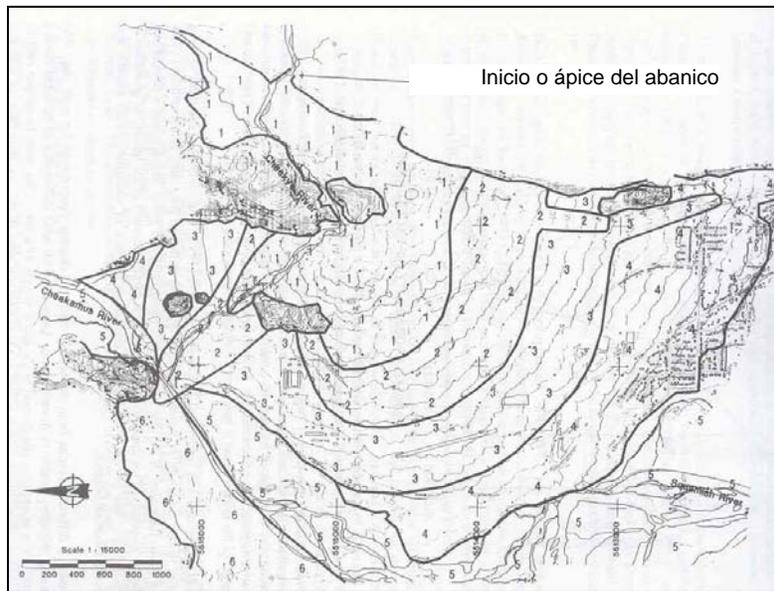


Figura 5.10 Ejemplo de una zonificación de la intensidad del peligro Caso: Abanico Cheekye, Columbia Británica (Hungr, 1997)

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) ⁶ m ³ P _h = 0.0001 – 0.0004	M = 1 a 3 (10) ⁶ m ³ P _h = 0.004 – 0.001	M = 100,000 a 1 (10) ⁶ m ³ P _h = 0.001 – 0.02	M < 100,000 m ³ P _h = 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 _s = 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 _s = 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 _s = 0.5	Deposición de gravas y erosión debido al flujo de inundación en cauces nuevos. P _s = 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 _s = 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 _s = 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 _s = 0.17	Flujo difuso (excepto cerca del cauce del río Cheekye); deposición de grava en áreas bajas, erosión. P _s = 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 _s = 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 _s = 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 _s = 0.05	Similar a la zona 2 P _s = 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 _s = 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 _s = 0.04	Daño menor por inundación (deposición de grava, erosión); agua y sedimentos se acumulan en depresiones. V < 1m/s, D = 0.5m, P _s = 0.04	Daño de inundación menor (deposición de grava, erosión); agua y sedimentos se acumulan en depresiones. P _s = 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_h = Probabilidad anual, V = Velocidad máxima del deslizamiento, D = Espesor máximo de materiales, P_s = 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) .

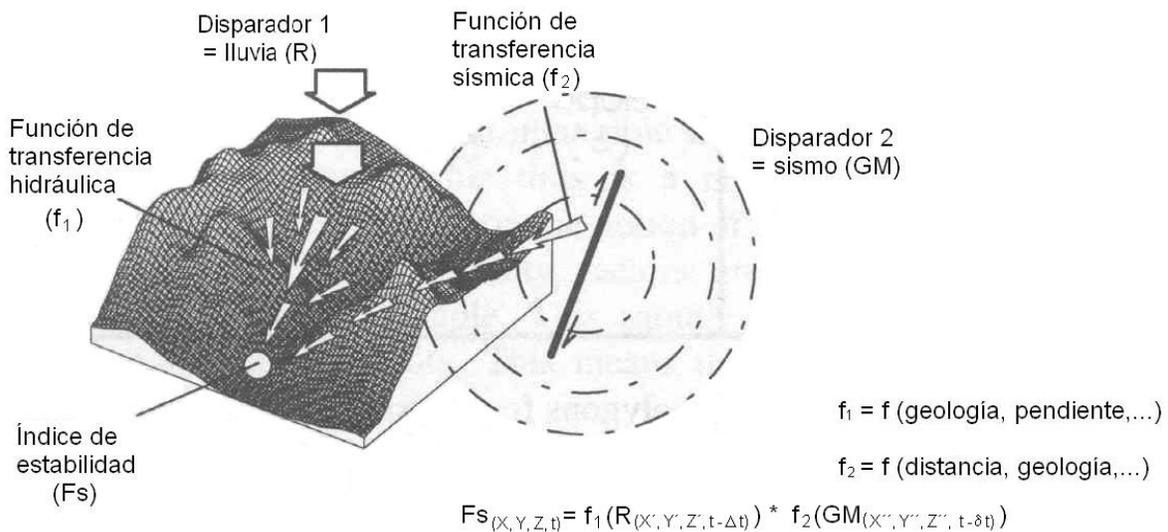


Figura 5.11 Representación de las funciones de transferencia

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 km² y cuenta con 81,156 habitantes, según datos del INEGI del Censo General de Población y Vivienda del año 2000.

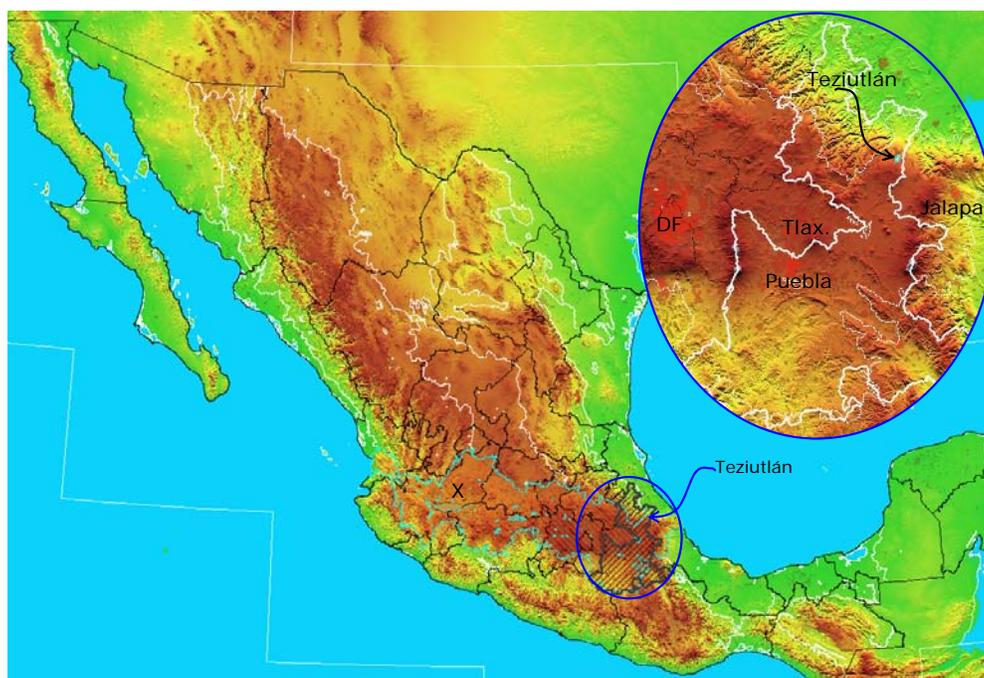


Figura 5.12 Ubicación de la ciudad de Teziutlán, Puebla

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

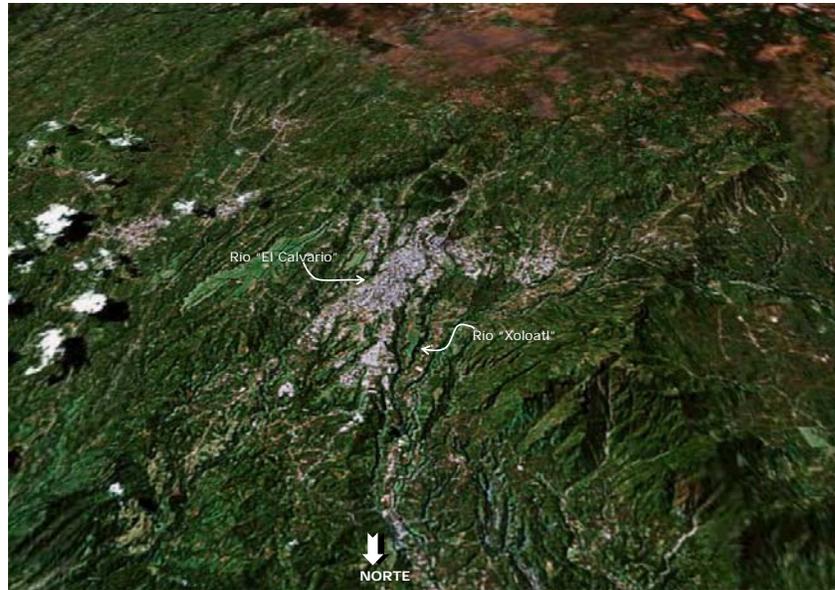


Figura 5.13 Vista satelital de la ciudad de Teziutlán

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.

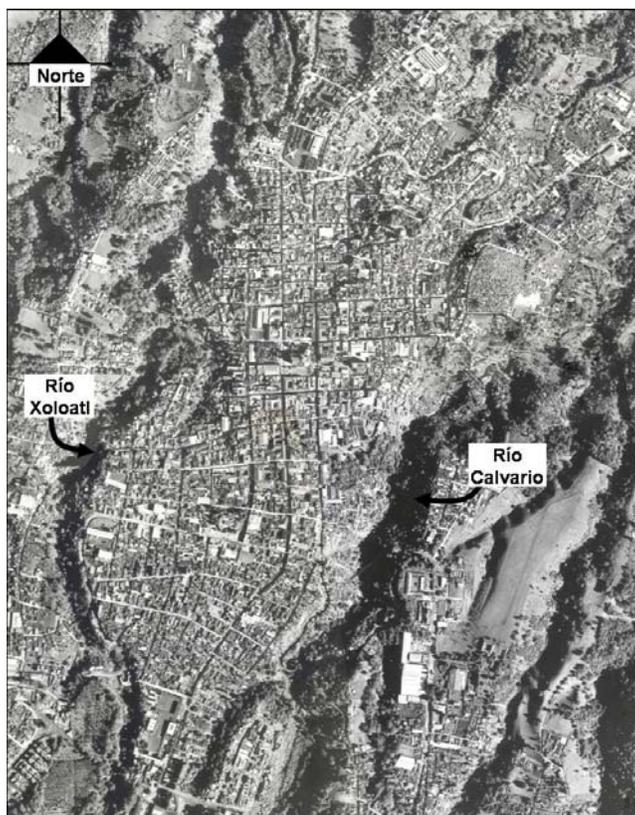


Figura 5.14 Traza urbana de la ciudad de Teziutlán

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° , 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° , 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° . 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° 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.

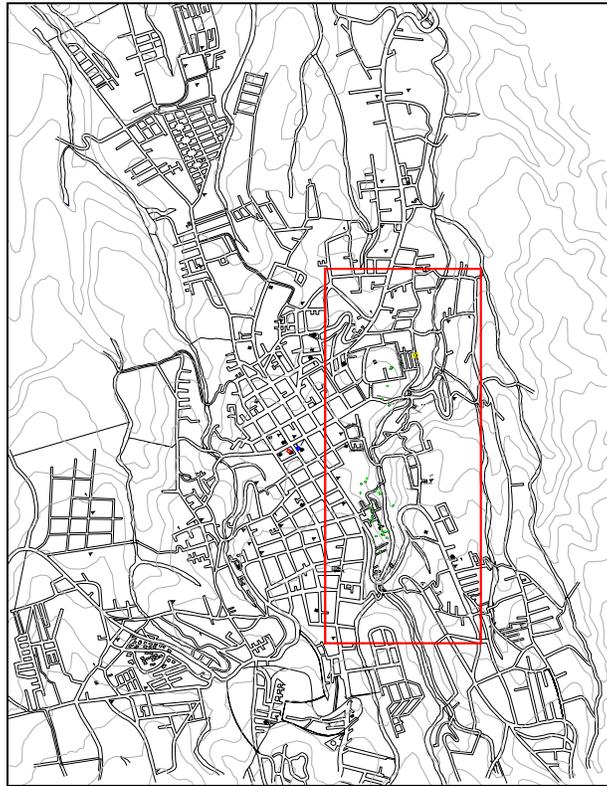


Figura 5.27 Ubicación de las colonias estudiadas en Teziutlán

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

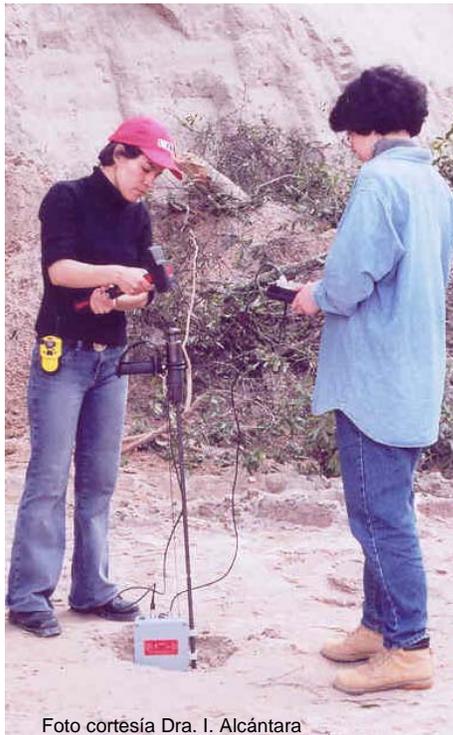


Foto cortesía Dra. I. Alcántara



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 2cm²
- Ⓝ 10 puntas perdidas de 4cm²
- Ⓚ 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).

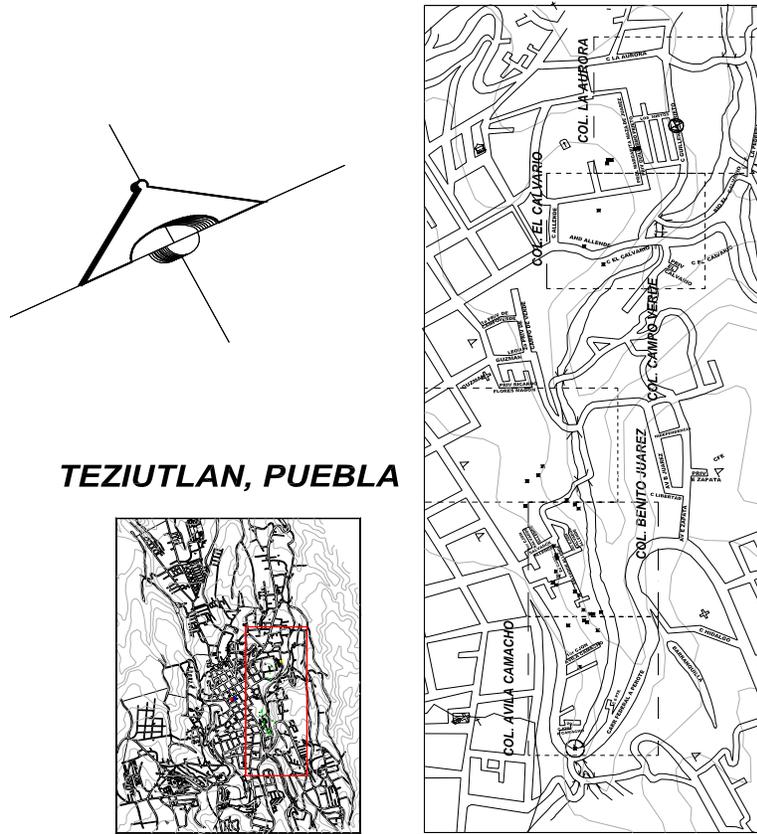


Figura 5.30 Ubicación de los sitios estudiados en las cuatro colonias analizadas de Teziutlán

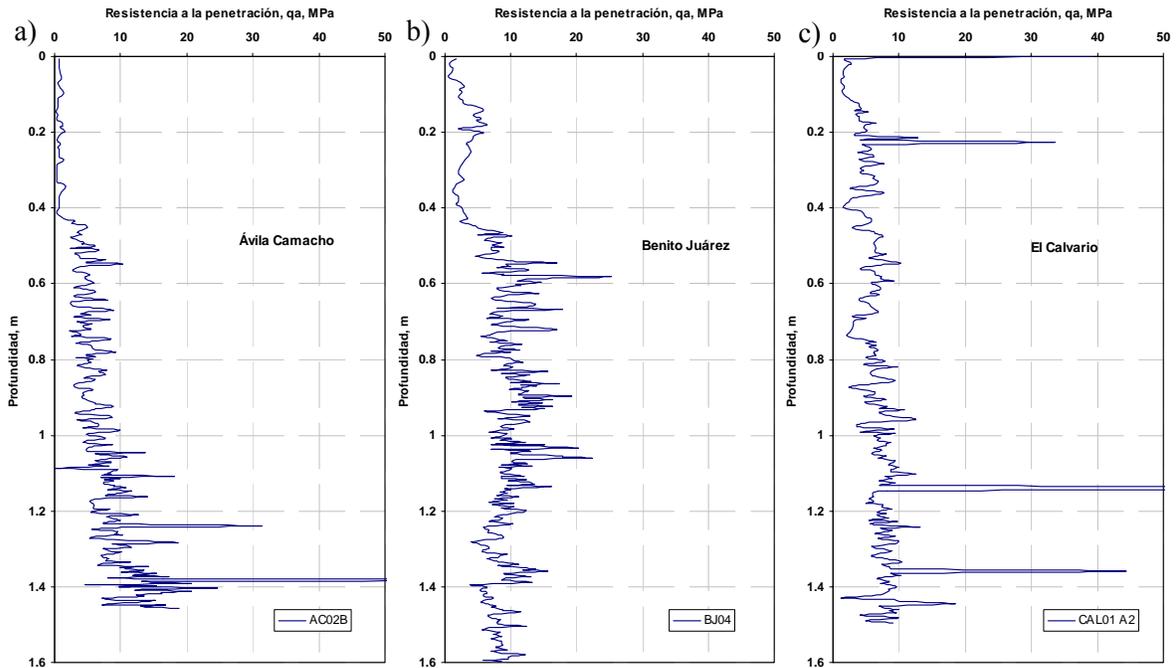


Figura 5.31 Registros de la resistencia a la penetración, que muestran estratos de suelos resistentes, prácticamente superficiales, en las colonias Ávila Camacho, Benito Juárez y El Calvario

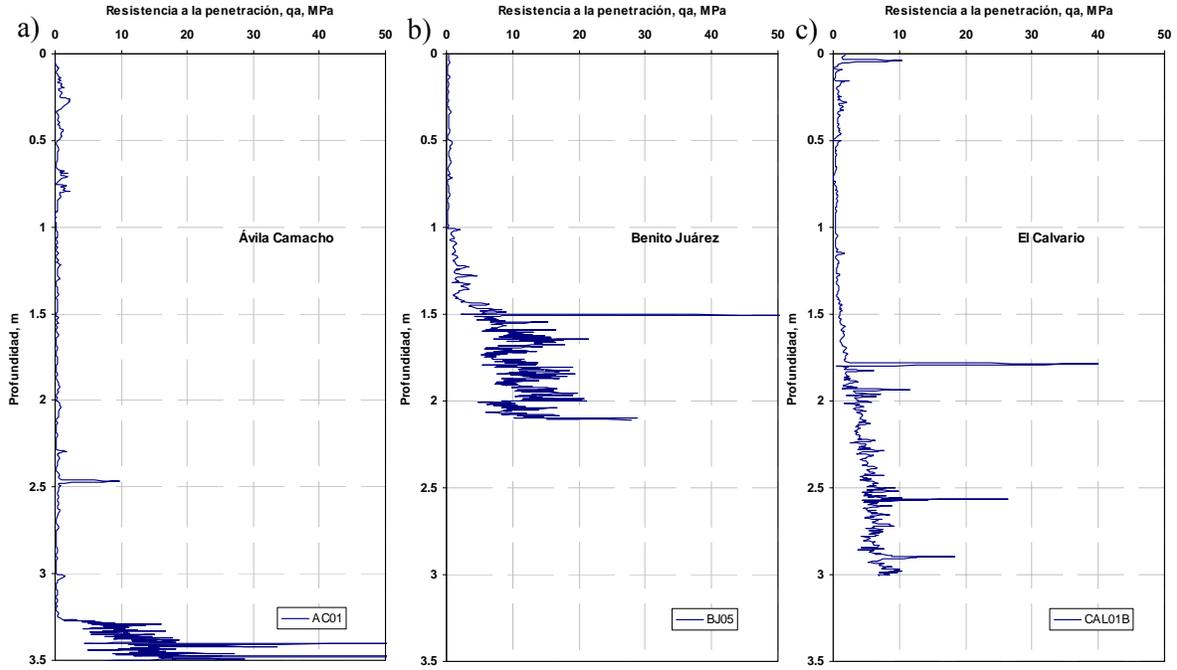


Figura 5.32 Registros de la resistencia a la penetración que muestran capas delgadas superficiales de suelos blandos en las colonias Ávila Camacho, Benito Juárez y El Calvario

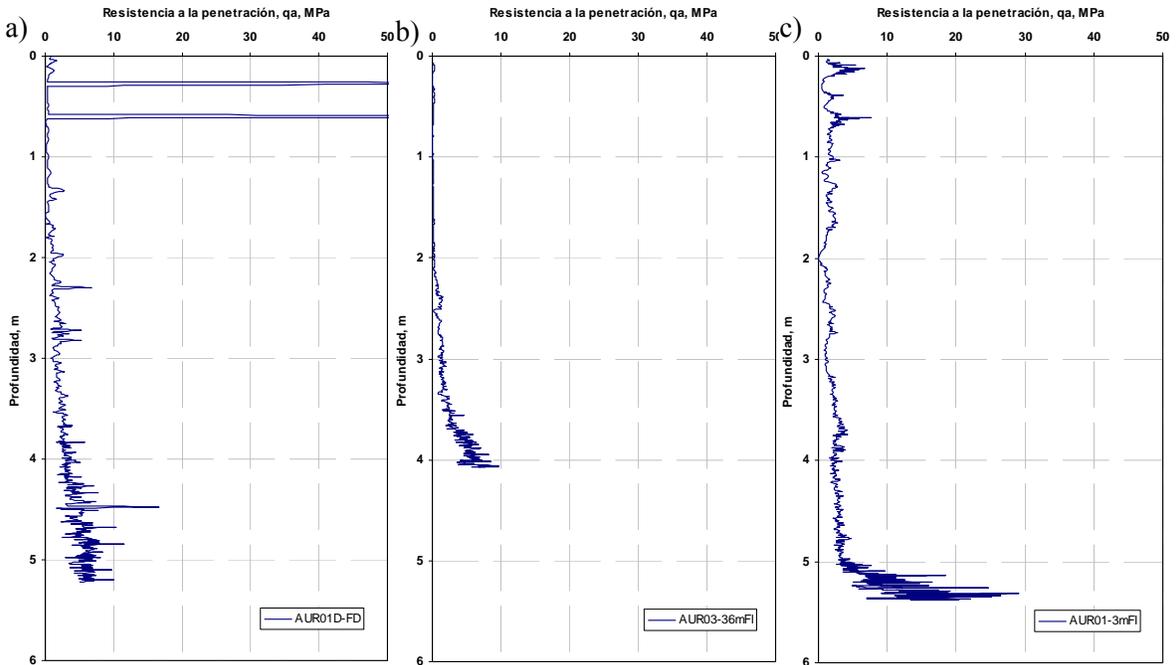


Figura 5.33 Registros de la resistencia a la penetración obtenidos en la colonia La Aurora

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

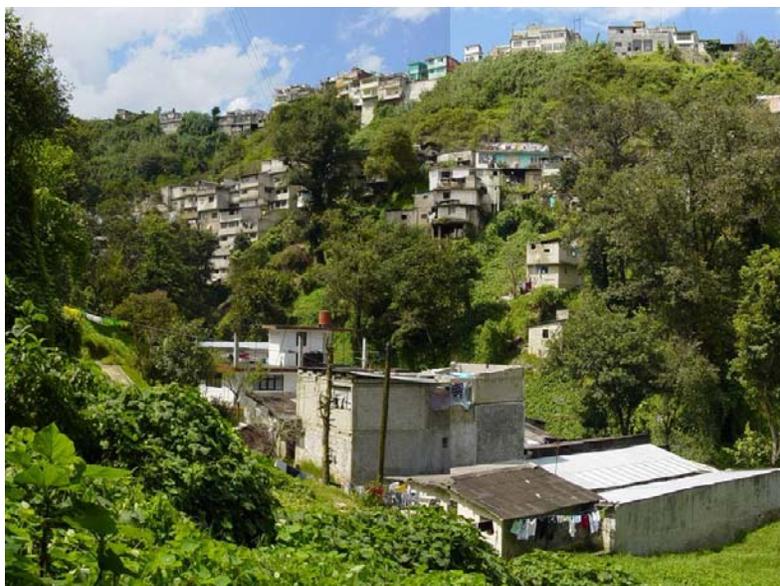


Figura 5.35 Vista panorámica de la ladera en la colonia A. Camacho y una fracción de la B. Juárez

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						
FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES									
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.

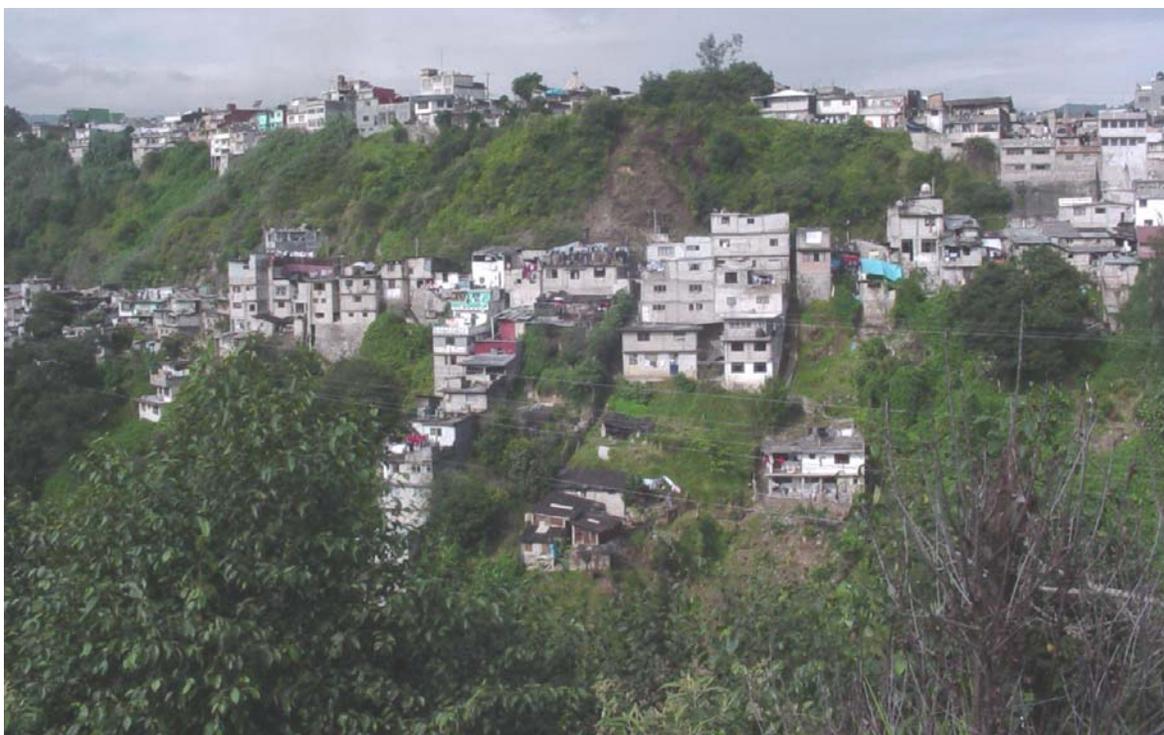


Figura 5.36 Viviendas en la ladera de la Col. Benito Juárez

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.

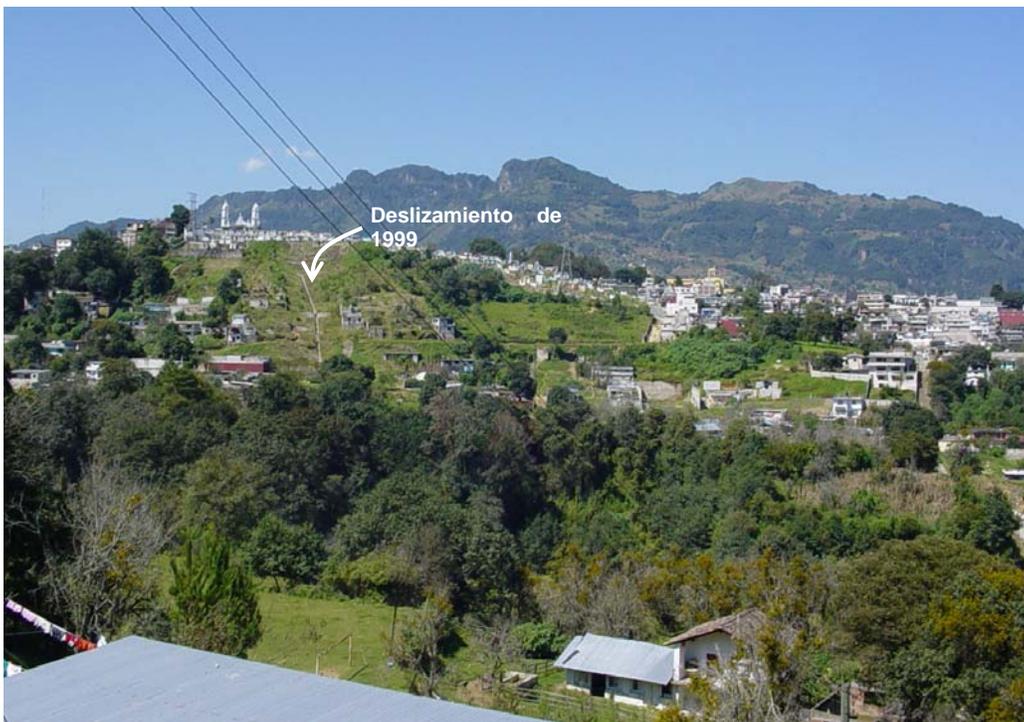


Figura 5.38 Vista panorámica de la ladera en la Col. La Aurora

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.	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.	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								
FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES											
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. 8th 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. 11th 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 20th Century", *Landslides, Proc. 8th 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.



SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA

**Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana
Coordinación Nacional de Protección Civil
Centro Nacional de Prevención de Desastres**

Av. Delfín Madrigal núm. 665,
Col. Pedregal de Santo Domingo,
Alc. Coyoacán, Ciudad de México C.P. 04360

www.gob.mx/cenapred