



Investigaciones Geográficas (Mx)

ISSN: 0188-4611

edito@igg.unam.mx

Instituto de Geografía

México

Borja Baeza, Roberto Carlos; Alcántara Ayala, Irasema
Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla
Investigaciones Geográficas (Mx), núm. 53, abril, 2004, pp. 7-26
Instituto de Geografía
Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56905302>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla

Roberto Carlos Borja Baeza*
Irasema Alcántara Ayala*

Recibido: 2 de junio de 2003
Aceptado en versión final: 3 de marzo de 2004

Resumen. El relieve de la República Mexicana, montañoso en su mayor parte, favorece la ocurrencia de procesos de remoción en masa, condición que se manifestó en octubre de 1999 con cientos de movimientos del terreno en la Sierra Norte de Puebla, detonados por las intensas lluvias ocasionadas por la tormenta tropical número 11. Zacapoaxtla, junto con otros municipios de la zona, tales como Teziutlán, Totomoxtla, Zapotitlán de Méndez, etc., se vio afectado en un alto grado por estos fenómenos. La incidencia de tales procesos fue resultado en gran medida de la interacción entre las características geológicas y geomorfológicas existentes, y de las actividades humanas que han alterado el medio.

En este trabajo se presenta un análisis de inestabilidad de laderas a partir de la modelación de la interacción del relieve, la concentración de humedad y las propiedades de los materiales, utilizando el índice de estabilidad SINMAP (*Stability Index Mapping*) a través de un Modelo Digital del Terreno (MDT) del municipio de Zacapoaxtla en la plataforma del SIG ArcView. Los resultados de dicho análisis fueron combinados con un índice de vulnerabilidad desarrollado con base en datos de población y vivienda con la finalidad de elaborar el mapa de riesgos por procesos de remoción en masa para el municipio de Zacapoaxtla,

Palabras clave: Procesos de remoción en masa, susceptibilidad, vulnerabilidad, riesgo, Zacapoaxtla.

Mass movement processes and associated risks in Zacapoaxtla, Puebla

Abstract. The mountainous relief of Mexico enhances naturally the occurrence of mass movement processes. However, hundreds of failures occurred in October 1999, as a result of an extreme precipitation event originated by a tropical storm. Zacapoaxtla, in addition to other municipalities, such as Teziutlan, Totomoxtla, Zapotitlán de Méndez, Tlatlauquitepec, etc. was severely affected by these pheno-

*Instituto de Geografía, UNAM, Cd. Universitaria, Circuito Exterior, 04510, Coyoacán, México, D. F.
E-mail: rcborja23@hotmail.com e irasema@igiris.igeograf.unam.mx

mena. The incidence of these movements resulted from the combination of geological and geomorphic features as well as by human activities which have modified the environment.

In this paper, an instability analysis of Zacapoaxtla is presented. The analysis was carried out taking into account the interaction among the relief, moisture concentration and material properties by using the Stability Index Mapping SINMAP. Results were later on combined with a vulnerability analysis also presented in here, to finally produce a risk map of the Municipality.

Key words: Mass movement processes, susceptibility, vulnerability, risk, Zacapoaxtla.

INTRODUCCIÓN

La presencia de desastres originados por fenómenos naturales, por ejemplo huracanes, sismos y procesos de remoción en masa, representa un retraso en el desarrollo de las poblaciones afectadas y una carga económica importante para los gobiernos que respaldan a estas comunidades. Esta condición es agravada por la vulnerabilidad de países o regiones con un nivel económico limitado, el cual dificulta la rápida recuperación e incluso la preparación adecuada para afrontar el desastre mismo.

En octubre de 1999, como resultado de la conjunción de un sistema de baja presión que originó la depresión tropical 11 en las costas de Veracruz, y del frente frío 5, ocurrieron precipitaciones extraordinarias en el oriente del país, afectando principalmente a los estados de Hidalgo, Oaxaca y Puebla. Las consecuencias fueron diversas, derivadas principalmente de inundaciones y de la ocurrencia de cientos de procesos de remoción en masa, la magnitud del evento fue tal que se le calificó como el desastre de la década en México (Bitrán, 2000).

Particularmente, la Sierra Norte de Puebla fue una de las zonas en las que ocurrieron cuantiosos daños económicos y numerosas pérdidas humanas, principalmente en los municipios de Cuetzalan, Huauchinango, Chiconcuatla, Teziutlán, Zapotitlán de Mén-

dez, Totomoxtla y Zacapoaxtla (Lugo *et al.*, 2001). En este último, los sectores más dañados fueron la infraestructura (en especial las carreteras, redes de agua potable y energía eléctrica) y los sectores productivos (agricultura, en particular plantaciones de café).

Este trabajo muestra un análisis de los procesos de remoción en masa y su inseparable relación con la vulnerabilidad de la población. El objetivo principal fue determinar las zonas de riesgo al que está expuesto el municipio de Zacapoaxtla como consecuencia de la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.

Cuando la extensión potencial del impacto de un peligro derivado de algún fenómeno natural ocupa una superficie compartida con la actividad humana en sus diferentes expresiones, se establece el concepto de riesgo. Este último representa la afectación que dicho peligro puede causar en la estabilidad y en el equilibrio de las actividades humanas. La relación entre el peligro de un fenómeno natural y las condiciones vulnerables creadas por el ser humano en su espacio físico, económico, social, político y ambiental es lo que determina el grado de riesgo.

Para el caso particular del municipio de Zacapoaxtla se elaboró un mapa de riesgo por deslizamientos, a partir de la combinación de los índices de vulnerabilidad y de estabilidad obtenidos para esta entidad.

ZACAPOAXTLA

El municipio de Zacapoaxtla se localiza a 156 km de la ciudad de Puebla, dentro de la región morfológica de la Sierra Norte (Figura 1). Tiene una extensión de 188.81 km² y colinda con Cuetzalan del Progreso y Nautzontla al norte, Tlatlauquitepec y Zaragoza al este, al sur con Zautla, y con Xochiapulco al oeste (INEGI, 2000a).

El relieve del municipio es de diferencias notables en sus elevaciones, con una topografía muy irregular, lo cual resulta en una hidrografía extensa que favorece la erosión, formando numerosos barrancos. La porción sur es la única zona que se caracteriza por una topografía plana. De acuerdo con el INEGI (2000a), el municipio presenta un declive general sur-norte, que va de 2 400 m a 1 200 metros sobre el nivel del mar y se ubica entre la transición de los climas templados de la Sierra Norte con lluvias todo el año, y los cálidos que se presentan en el declive del Golfo.

La Sierra Norte de Puebla está constituida principalmente por rocas sedimentarias mesozoicas plegadas, que en algunas zonas se encuentran cubiertas por rocas volcánicas pliocénicas y cuaternarias; entre las más jóvenes cabe destacar las de la Caldera de los Humeros. Las rocas que afloran de manera particular en Zacapoaxtla, son ignimbritas, andesita y basalto. Algunas de estas rocas se encuentran cubiertas por rocas sedimentarias continentales, mientras que otras subyacen rocas sedimentarias marinas (Yañez y García, 1982).

En el Jurásico Tardío y el Cretácico el área permaneció sumergida, posteriormente, se inició un levantamiento (Yañez y García, 1982) y los bloques elevados formaron una

unidad arqueada y plegada (Menes, 1979, en Yañez y García, 1982). Las rocas cenozoicas volcánicas y continentales se acumularon sobre sedimentos marinos mesozoicos que sobreyacen, a su vez, a rocas preeozoicas (López, 1982).

La actividad volcánica del área de estudio presenta una influencia determinante de la Caldera de los Humeros. Durante el levantamiento orogénico se desarrollaron fracturas y fallas, mismas que sirvieron a la actividad volcánica del Terciario para formar macizos andesíticos (Ortega, 1992).

Las unidades litológicas predominantes (Figura 2) están representadas por materiales débiles no consolidados de origen volcánico (ignimbritas) que sobreyacen a rocas sedimentarias de origen marino (principalmente calizas), las cuales determinan el grado de resistencia de los materiales que constituyen las laderas.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

En la naturaleza existen diversos fenómenos, algunos de ellos considerados peligros naturales (sismos, erupciones volcánicas, huracanes, etc.), que por sus características de intensidad y frecuencia causan daños a la estructura social de la zona en la que se presentan. Dentro de esta gama de procesos se integran los procesos de remoción en masa, que definidos desde un punto de vista geomorfológico, de acuerdo con Brunsdén (Alcántara, 2000), son fenómenos que involucran el movimiento de material formador de laderas por influencia de la gravedad, sin la asistencia de algún agente de transporte fluido.

A lo anterior se suma la presencia cada vez mayor de los asentamientos humanos en laderas inestables, lo cual está condicionado

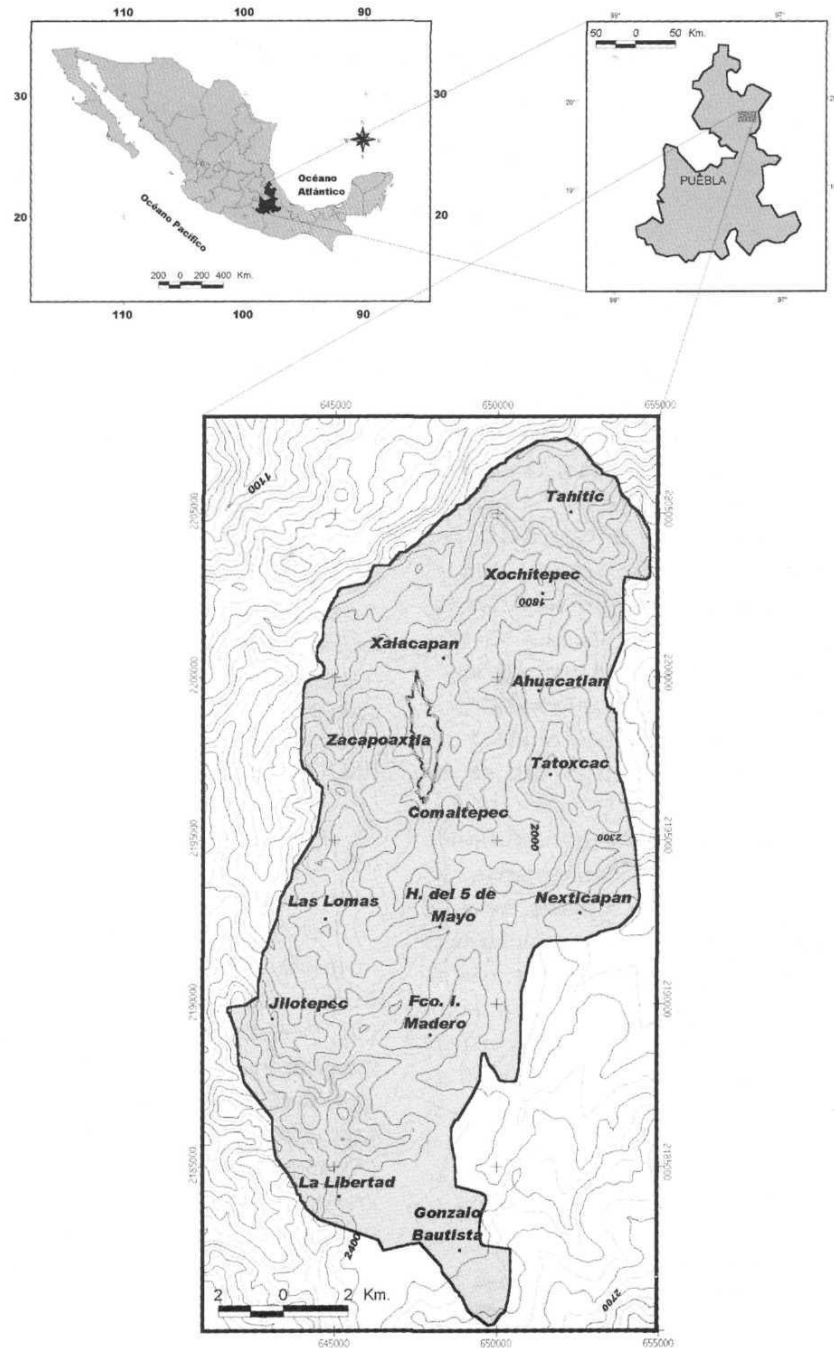


Figura 1. Localización del municipio de Zacapoaxtla, Puebla.

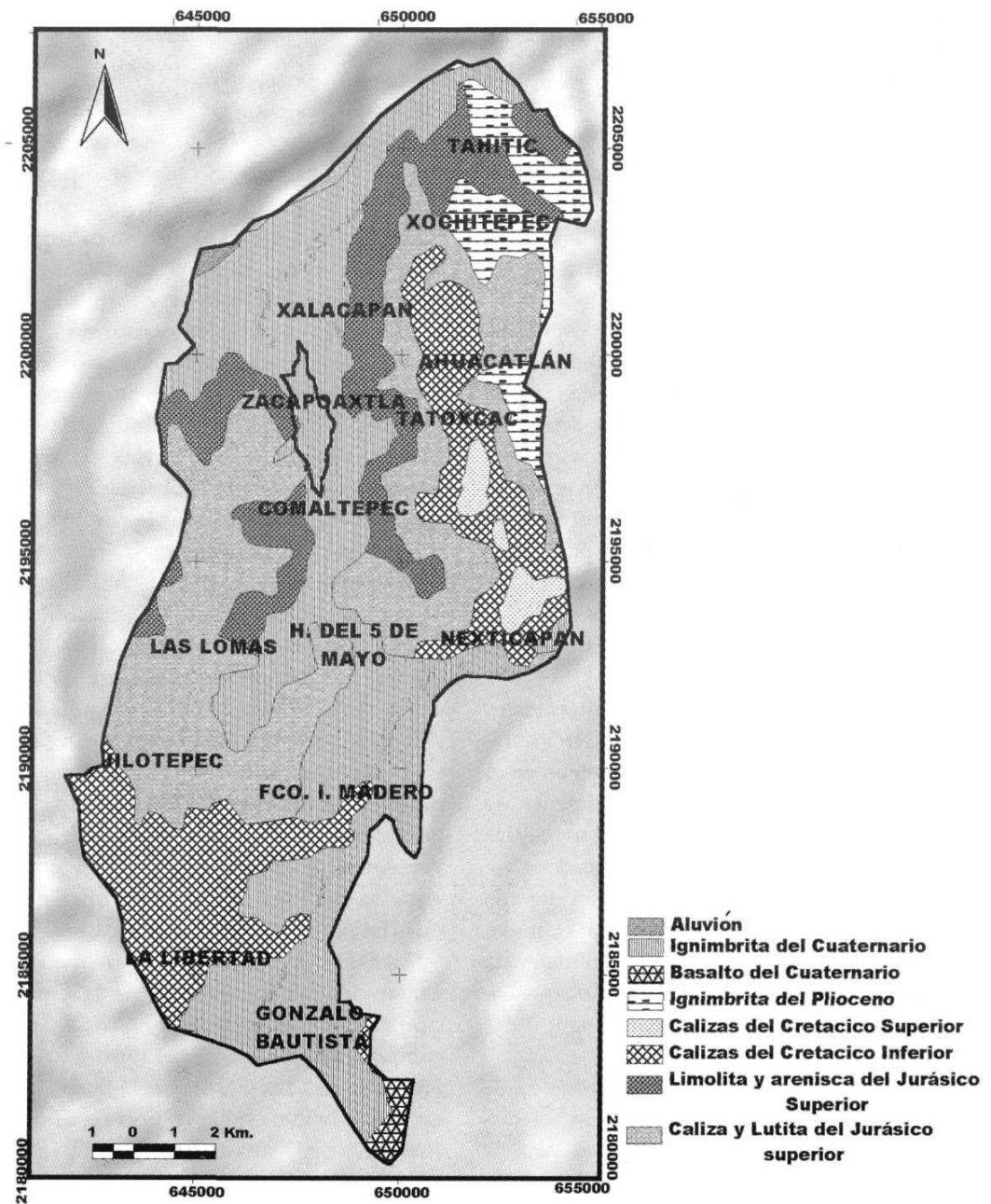


Figura 2. Mapa geológico del municipio de Zacapoaxtla (fuente: INEGI, 1978).

por la nula planeación del crecimiento, y por las características socioeconómicas de la población, combinación que magnifica los riesgos por procesos de ladera.

La importancia del estudio de los procesos de remoción en masa radica en el interés de evitar la afectación de tales fenómenos en la sociedad. De aquí se deriva el siguiente paso que es la prevención; ésta pretende, en su forma más ambiciosa, evitar todo daño posible a la estructura social y, principalmente, a la vida humana. Esta finalidad tiene en consideración la inevitable interacción que actualmente se presenta entre la actividad humana y la presencia de fenómenos gravitacionales. El entendimiento más cercano a la realidad de la génesis de los procesos de remoción en masa es el primer paso para estructurar y aplicar medidas y técnicas que eviten en lo posible el deterioro en la estructura social por la acción de estos procesos (Borja, 2003).

En esencia, los procesos gravitacionales ocurren cuando una ladera se vuelve inestable como consecuencia de los cambios en el relieve. Las causas son principalmente de dos tipos: internas y externas. Las causas internas son aquellas que aumentan el esfuerzo o la tensión, sin que al mismo tiempo crezca la resistencia de los materiales, mientras que las causas internas disminuyen la resistencia en los materiales, sin que se atenúen las fuerzas externas (Terzaghi, 1950; Selby, 1993).

Los factores que favorecen la presencia de los procesos de remoción en masa se pueden resumir en la geología (con la presencia de materiales débiles y estructura con fracturas); los procesos físicos (principalmente la precipitación, sismicidad y erupciones volcánicas); la morfología (en especial las pendientes

resultado de la tectónica y la erosión) y la actividad antrópica (como consecuencia de los cambios en el relieve y sus elementos), todos ellos ocasionan el rompimiento del equilibrio entre las fuerzas internas y externas que determinan la estabilidad de las laderas (Alcántara, 2000). Para que un proceso pueda presentarse en el terreno es necesaria la presencia de diversos ingredientes, sin embargo, existen factores que por sí solos pueden ocasionar la detonación de los procesos, tal es el caso de la variación del régimen pluvial, que puede manifestarse a través de lluvias intensas durante un período corto de tiempo, o bien lluvias extraordinarias, como sucedió en octubre de 1999, por lo que es importante para la estimación y comprensión de la estabilidad, realizar análisis de la precipitación en las zonas de interés.

Cassale y Margottini (2000) muestran que el régimen pluviométrico alterado por el cambio climático global concentra las lluvias en un período más corto al presentado con anterioridad, lo cual es factor determinante en el incremento de deslizamientos y otros procesos gravitacionales. De acuerdo con estos autores, en Italia más del 50% de los movimientos de ladera son directamente provocados por fenómenos meteorológicos, en especial por lluvias torrenciales.

La Figura 3 muestra algunos datos relevantes del comportamiento de la precipitación en el municipio de Zacapoaxtla, que al compararlos con los datos mostrados en la Figura 4a ayudan a observar la magnitud del evento de octubre de 1999. Entre el 31 de septiembre y el 13 de octubre de 1999, la precipitación acumulada fue de 1 120 mm, lo que equivale al 79% de la media anual que es de 1421 mm. Particularmente entre los días 4 y 6 se registró una precipitación total de

808 mm, que corresponde a casi cuatro veces la media de octubre de 225 mm. Durante estos días ocurrió el mayor número de procesos de ladera en el municipio, y en general a lo largo de la Sierra Norte, lo que confirma la relación existente entre las precipitaciones extraordinarias y los movimientos gravitacionales.

La Figura 4b muestra los valores de precipitación anual acumulada en el municipio de Zacapoaxtla, donde se puede percibir que se han presentado años muy húmedos, en los que la precipitación anual registró valores de casi el doble de la precipitación media anual, tal es el caso de los años 1961, 1974, 1979 y 1981, además de 1999; en estos dos últimos la precipitación presentó anomalías extremas.

En el estado de Puebla fueron 87 los municipios afectados, y en mayor grado 49 de ellos; entre estos últimos está Zacapoaxtla. Las pérdidas económicas se estimaron, en todo el estado, en más de 2 300 millones de pesos (Tabla 1). Los sectores más dañados fueron la infraestructura y los servicios. Los daños a la infraestructura se manifestaron principalmente en las vías de comunicación (particularmente la carretera interserrana), el sector eléctrico, la distribución de agua pota-

ble, la vivienda y la agricultura, en donde se estima se perdió cerca del 30% de los campos.

ÍNDICE DE ESTABILIDAD

Este trabajo presenta un análisis de inestabilidad de laderas a partir de la modelación de la interacción del relieve, la concentración de humedad y las propiedades de los materiales, utilizando un Modelo Digital del Terreno (MDT) con una resolución de 20 x 20 m para el municipio, generado a partir de las curvas de nivel de la carta topográfica, en el cual se calculan factores de seguridad para cada celda. La utilización de los Modelos Digitales del Terreno en el análisis de inestabilidad de laderas ofrece la ventaja de poder manipular datos de manera espacial, permitiendo delimitar zonas potencialmente inestables y que requieren de especial atención.

El índice de estabilidad presentado fue elaborado con la ayuda de SINMAP (*Stability Index Mapping*) utilizando la plataforma del sistema de información geográfica (SIG) ArcView. Información específica acerca del en Tarboton, 1997.

A partir del MDT es factible obtener información del relieve (pendientes, áreas de concentración de humedad, escorrentía, etc.),

Tabla 1. Daños totales en Puebla a consecuencia de las lluvias de octubre de 1999 (en millones de pesos)

Sector	Daños directos	Daños indirectos	Total	% del total
Social	505.0	15.0	520.0	22.4
Infraestructura y servicios	1 540.0	1.0	1 541.0	66.3
Sectores productivos	190.7	35.0	225.7	9.7
Atención a la emergencia	—	38.6	38.6	1.6
Total de efectos	2 235.7	89.6	2 325.3	100

Fuente: Bitrán, 2000.

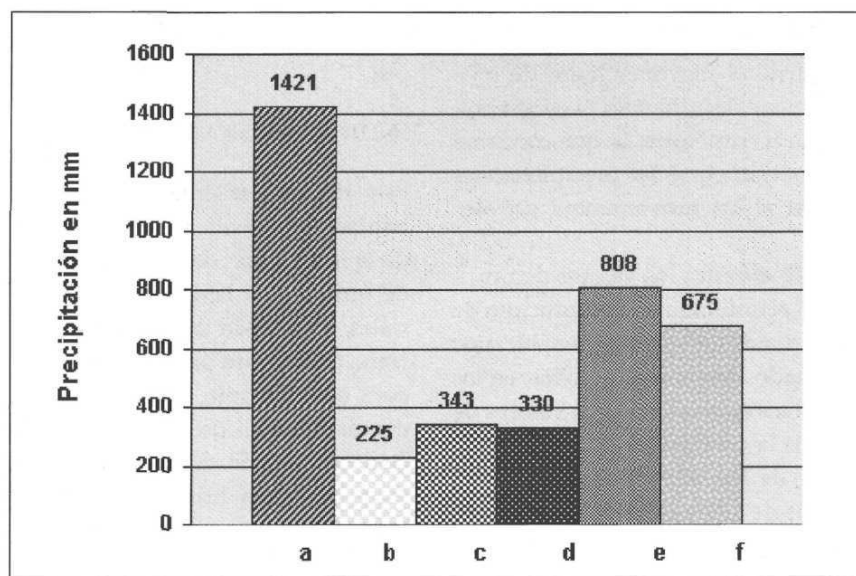


Figura 3. Gráfica de registros de distintos eventos de precipitación para el municipio de Zacapoaxtla (a. Media anual, b. Media de octubre, c. Máxima en 24 horas (5 de octubre de 1999), d. Máxima en 24 horas antes de octubre de 1999 (sept. 28, 1955), e. Total del 4 al 6 de octubre de 1999, f. Acumulada del 27 de septiembre al 1 de octubre de 1999).

en tanto que para calcular el índice de estabilidad se incorporan datos de resistencia de materiales en función de las diferentes unidades litológicas existentes a la información extraída del MDT. En el caso de Zacapoaxtla, para los materiales ignimbríticos se utilizaron valores de resistencia Cu de 22.4 y 14.1 kPa, y ángulos de fricción de 25 y 19°, que corresponden a los sitios La Concordia y Los Arcos, respectivamente (Alcántara y Domínguez, en preparación), en tanto que para los sedimentarios se consideró una de resistencia de 27 kPa y un ángulo de fricción de 31° (Selby, 1993).

El índice de estabilidad es calculado a través de factores de seguridad para cada celda, donde los valores menores a la unidad representan condiciones de inestabilidad y los

mayores, zonas estables. Cabe mencionar que los límites entre lo estable y lo inestable, es decir valores entre 1 y 1.5, se consideran como áreas moderadamente inestables (Figura 5). Las zonas estables ocupan una gran extensión en el área de estudio, la pendiente en su mayor parte es de 5 a 10° y sólo en algunos puntos llega a 15°. La litología es diversa, destacan los materiales de origen volcánico del Cuaternario (ignimbrita y basaltos) y, en menor proporción, calizas; la densidad de cauces es de 2 a 4 km/km², por lo que la baja erosión fluvial favorece dicha estabilidad. De acuerdo con los resultados obtenidos, la cabecera municipal, así como las poblaciones Gonzalo Bautista, Xalacapan y La Libertad son consideradas como estables.

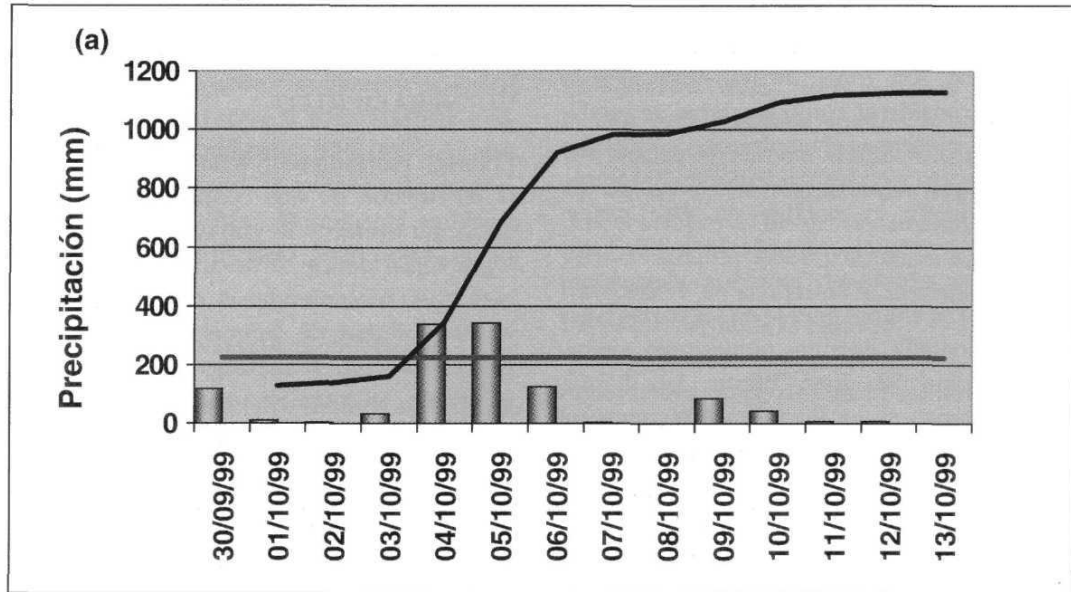


Figura 4a. Gráfica de precipitación diaria y acumulada durante el evento extraordinario de 1999, de la estación Zacapoaxtla.

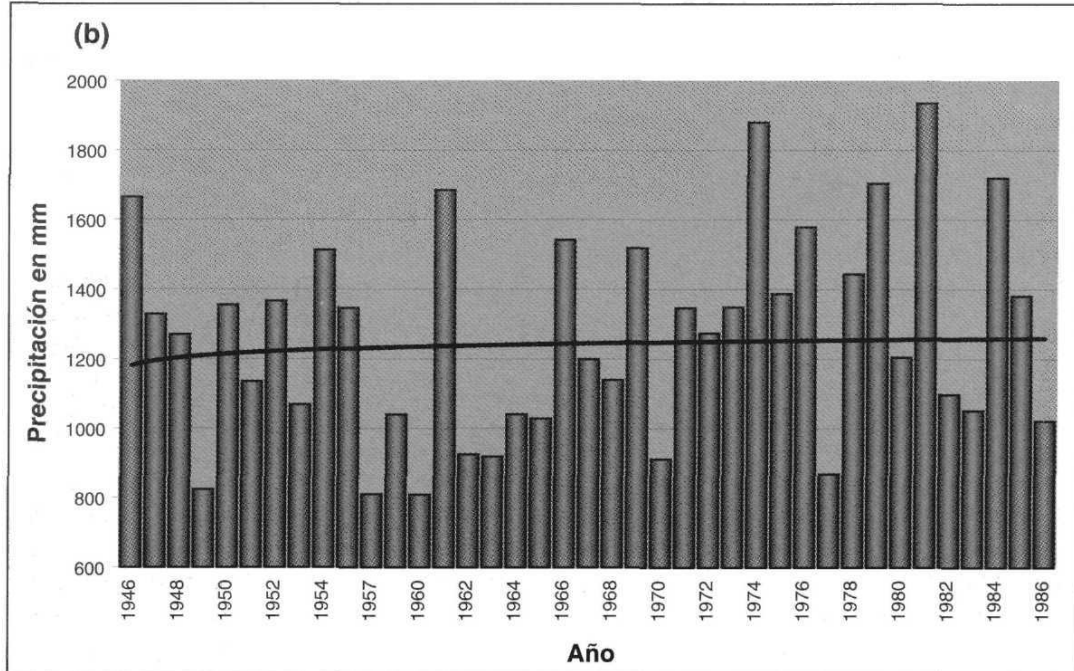


Figura 4b. Gráfica de precipitación total anual durante el período 1946-1986, de la estación Zacapoaxtla.

Las áreas moderadamente inestables, por lo general, son zonas de transición que se pueden considerar como fronteras de estabilidad. Se presentan generalmente a las orillas de los cauces y en los piedemonte. El cambio de pendiente es notable en este rango, llegando a ser del orden de 15 a 30°. Estos valores se ubican en lomeríos, elevaciones aisladas y preferentemente en las partes bajas de premontaña. Algunas poblaciones importantes como San Juan Tahitic, Las Lomas y Nexticapan se localizan en esta categoría de estabilidad.

Las regiones inestables representan aquellas en que la probabilidad de ocurrencia de un movimiento es considerable. La pendiente es en promedio mayor a 30° y la concentración de la humedad es alta, ambos factores importantes en la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Cerca del 15% del área del municipio se encuentra en este rango de inestabilidad; corresponde a montañas y laderas de montañas disecadas, con predominio de rocas calizas y en menor proporción lutitas. Un área de particular interés es al norte del río Apulco, donde se presentan laderas de pendiente mayor a 35°, como resultado de erosión remontante, sin embargo, afortunadamente no existen núcleos de población.

Los resultados del índice de estabilidad del municipio de Zacapoaxtla fueron combinados con los registros de procesos de ladera proporcionados por la Dirección de Protección Civil de Puebla, así como con los sitios inestables derivados de la interpretación de fotografías aéreas, y con observaciones de campo; lo anterior permitió comprobar que la zonificación expresada en dicho índice corresponde a los procesos de remoción en masa actuales y potenciales del área

(Figuras 6 y 7).

VULNERABILIDAD

El riesgo asociado a un fenómeno natural está en función de dos condiciones: la magnitud del evento y la vulnerabilidad del entorno social donde se desarrolla. De tal manera que para entender el riesgo asociado a la inestabilidad de laderas es necesario no sólo contar con un análisis espacial de dicho fenómeno, sino también analizar la vulnerabilidad de la comunidad involucrada.

La vulnerabilidad es la susceptibilidad o predisposición de un elemento (individuo, vivienda, población, etc.) a ser afectado por un fenómeno, proceso o calamidad, así como de sufrir una pérdida. Maskrey (1993) considera que existen dos tipos primordiales de vulnerabilidad: la técnica y la social; la diferencia entre ambas está determinada por la forma de cuantificación. Mientras la primera se refiere a pérdidas potenciales sobre los servicios y bienes materiales e implica una evaluación cuantitativa, la vulnerabilidad, enfocada con base en los aspectos de la población, sólo puede estimarse de forma cualitativa. Dicha vulnerabilidad está en función de la situación socioeconómica de la población, así como de las herramientas estructurales, culturales y económicas para afrontar un desastre y reestablecer las condiciones previas a su ocurrencia. Asimismo, involucra el grado de preparación de la población, a través de su organización o de instituciones; en particular cabe destacar la protección civil.

La relación existente entre la vulnerabilidad y el riesgo estriba en que la primera es un concepto eminentemente social, en tanto que un fenómeno natural sólo podrá ser catalogado como riesgo cuando se presente en un

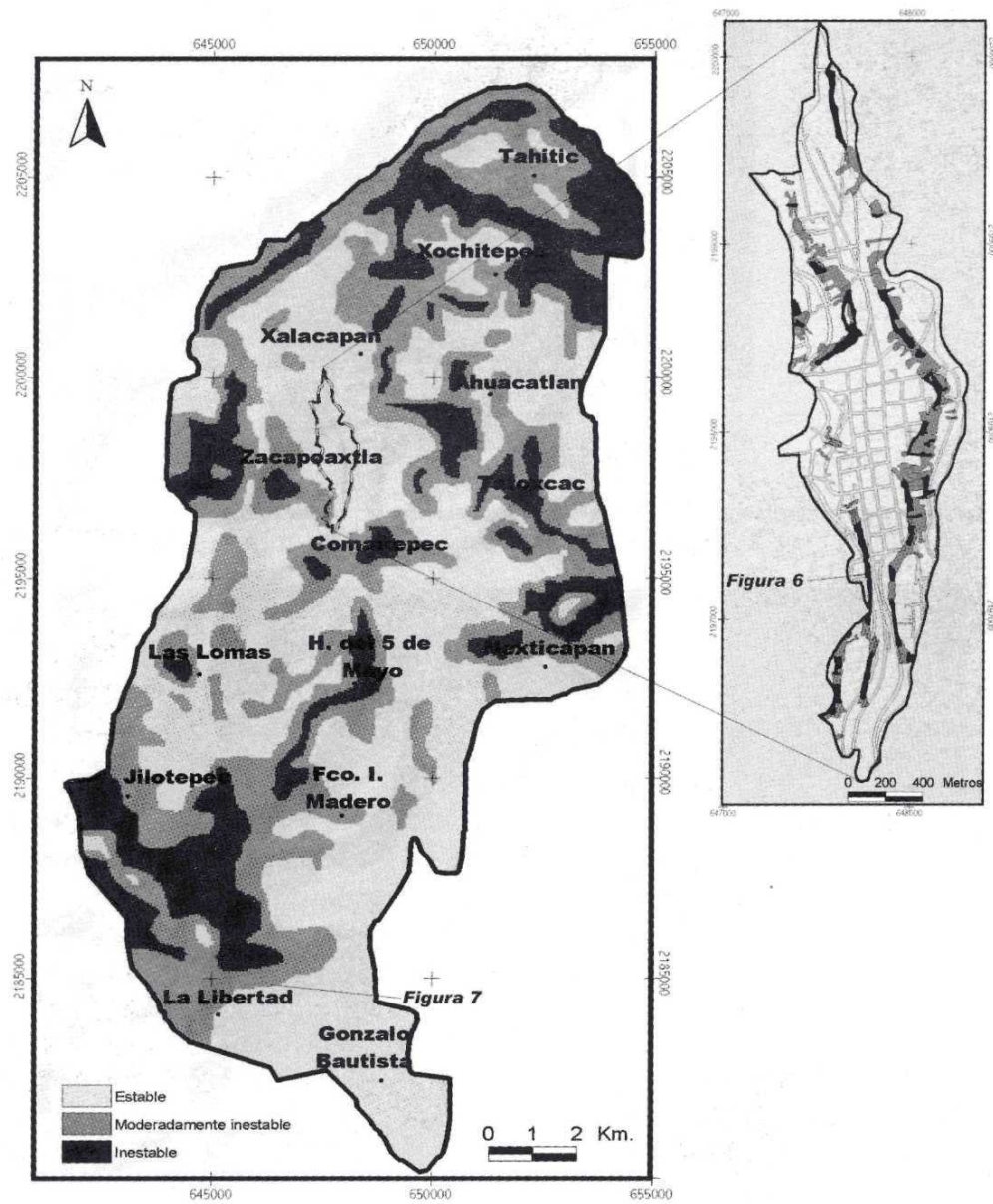


Figura 5. Índice de estabilidad del municipio de Zacapoaxtla y de la cabecera municipal (recuadro).

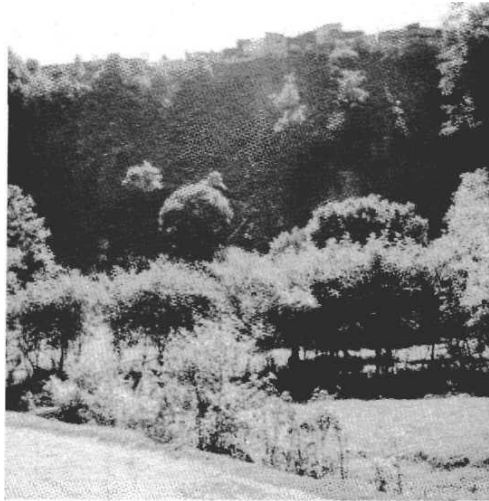


Figura 6. Zona de alta susceptibilidad a movimientos del terreno: poniente de la cabecera municipal de Zacapoxtla (foto de los autores, junio de 2002).



Figura 7. Zona de susceptibilidad media y baja a movimientos del terreno: suroeste del municipio de Zacapoxtla (foto de los autores, junio de 2002).

espacio ocupado por una entidad social. Consecuentemente la magnitud de dicho fenómeno junto con el nivel de vulnerabilidad determina el grado de riesgo de la población.

Para determinar la vulnerabilidad del municipio de Zacapoaxtla se utilizaron doce variables de datos de población y vivienda del censo del año 2000 (INEGI, 2000b), por ejemplo, población menor de 14 años y sin instrucción, con ingresos menores a uno y a dos salarios mínimos, viviendas sin servicios básicos o de materiales ligeros, así como población con discapacidad o sin atención médica gratuita (Tabla 2). Dichas variables fueron consideradas en función de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs) para las localidades urbanas y de la información correspondiente a las localidades rurales.

Los resultados (Figura 8) se clasificaron en cuatro rangos, vulnerabilidad muy alta, alta, media y baja. Es importante señalar que se consideraron los valores de vulnerabilidad al interior del municipio, así como la vulnerabilidad del municipio comparada con otras entidades del mismo estado. Los rangos establecidos representan las siguientes condiciones:

1. Vulnerabilidad baja, presenta condiciones favorables de vivienda y estructura de servicios básicos, que permiten afrontar las consecuencias que puedan ocasionar un desastre.
2. Vulnerabilidad media, presenta valores intermedios de la estructura social, lo que resulta en ciertas dificultades de la población para asimilar los estragos de un siniestro ocasionado por un fenómeno natural.
3. Vulnerabilidad alta, contexto que pone en evidencia carencias notables en la estructura social y económica para afrontar situaciones

críticas. Los habitantes de estas zonas necesitan de largos períodos y ayuda para solventar sus necesidades básicas posteriores a la ocurrencia de un desastre originado por fenómenos físicos, aun cuando éstos no sean de gran magnitud.

4. Vulnerabilidad muy alta, la población presenta los niveles más bajos de bienestar, educación y servicios básicos. Se requiere de ayuda externa no sólo para recuperarse de un desastre, sino para establecer condiciones que permitan reactivar la precaria economía. La restauración y recuperación de la actividad cotidiana toma años. Los planes de prevención necesitan de una especial atención en estas zonas.

RIESGO POR INESTABILIDAD DE LADERAS

Existe un sinnúmero de definiciones e interpretaciones del concepto riesgo. En este despliegue de ideas se ubican desde las de concepto social y físico, hasta aquéllas que se refieren al riesgo económico u otros temas específicos. Cada uno de éstos cuenta con divisiones especializadas, en donde se aplica el concepto a cada actividad integrada. Por ejemplo, para Tilling (1989) el riesgo, desde el punto de vista de los desastres naturales, se define como "la posibilidad de pérdida de vidas humanas, propiedades, capacidad productiva, etc., dentro de un área determinada sujeta a peligro". En 1974 White insertaba el concepto de la vulnerabilidad, al postular que el riesgo a sufrir un desastre dependía además de la magnitud y duración del fenómeno natural *per se*, de la vulnerabilidad que la población expuesta presente. Dicho de otra manera, es el impacto de un peligro natural sobre un sistema socioeconómico con

un nivel de vulnerabilidad alto. La relación entre el peligro de un fenómeno natural y las condiciones vulnerables creadas por el ser humano en su espacio físico, económico, social, político y ambiental es lo que determina el grado de riesgo.

Existen diversos métodos para el análisis del riesgo, sin embargo, todos ellos coinciden en la inclusión de tres componentes básicos: determinación de la fuente de peligro, delimitación del área de influencia y cuantificación de la población y las propiedades con la finalidad de estimar la vulnerabilidad.

El riesgo se puede calificar con diferentes criterios, considerando de forma general la localización, magnitud, frecuencia y tipo de fenómeno, todo en relación con la ubicación, extensión y características sociales de la actividad humana. Dicho enfoque es relativo, ya que al incorporar la variable social en el conjunto de criterios a considerar, es difícil establecer la línea exacta que delimita los valores otorgados al riesgo.

La necesidad de contar con mapas de riesgo por inestabilidad de laderas y de la difusión de la metodología desarrollada, surge de su aporte al entendimiento de la génesis de los procesos gravitacionales que, sin duda, es el primer paso para estructurar y aplicar medidas y técnicas que eviten en lo posible pérdidas tanto humanas como materiales, consecuencia de la acción de dichos procesos.

Los mapas de riesgo por movimientos de ladera expresan la potencialidad de ocurrencia de este tipo de fenómenos y su localización. Sin embargo, debido a que la inestabilidad es un proceso complejo y dinámico, de manera similar a la sismicidad, no es aún posible determinar de manera puntual cuando ocurrirán.

La combinación del índice de estabilidad y el nivel de vulnerabilidad de Zacapoaxtla establece el grado de riesgo del municipio a través de un mapa dividido en cuatro clases (Figura 9).

Tabla 2. Variables utilizadas para la delimitación de la vulnerabilidad

Variables	Total
Población menor de 14 años	2 517
Población mayor de 15 años sin instrucción	388
Población de 15 años o más con primaria incompleta	640
Población económicamente inactiva	2 767
Población que recibe menos de un salario mínimo	549
Población que recibe de uno a dos salarios mínimos	797
Viviendas con techos ligeros, naturales y precarios	783
Viviendas con paredes ligeras, naturales y precarias	786
Viviendas sin drenaje, electricidad y agua	6
Viviendas sin drenaje	86
Población con alguna discapacidad	78
Población no derechohabiente a servicios de salud	5 235

Fuente: INEGI, 2000.

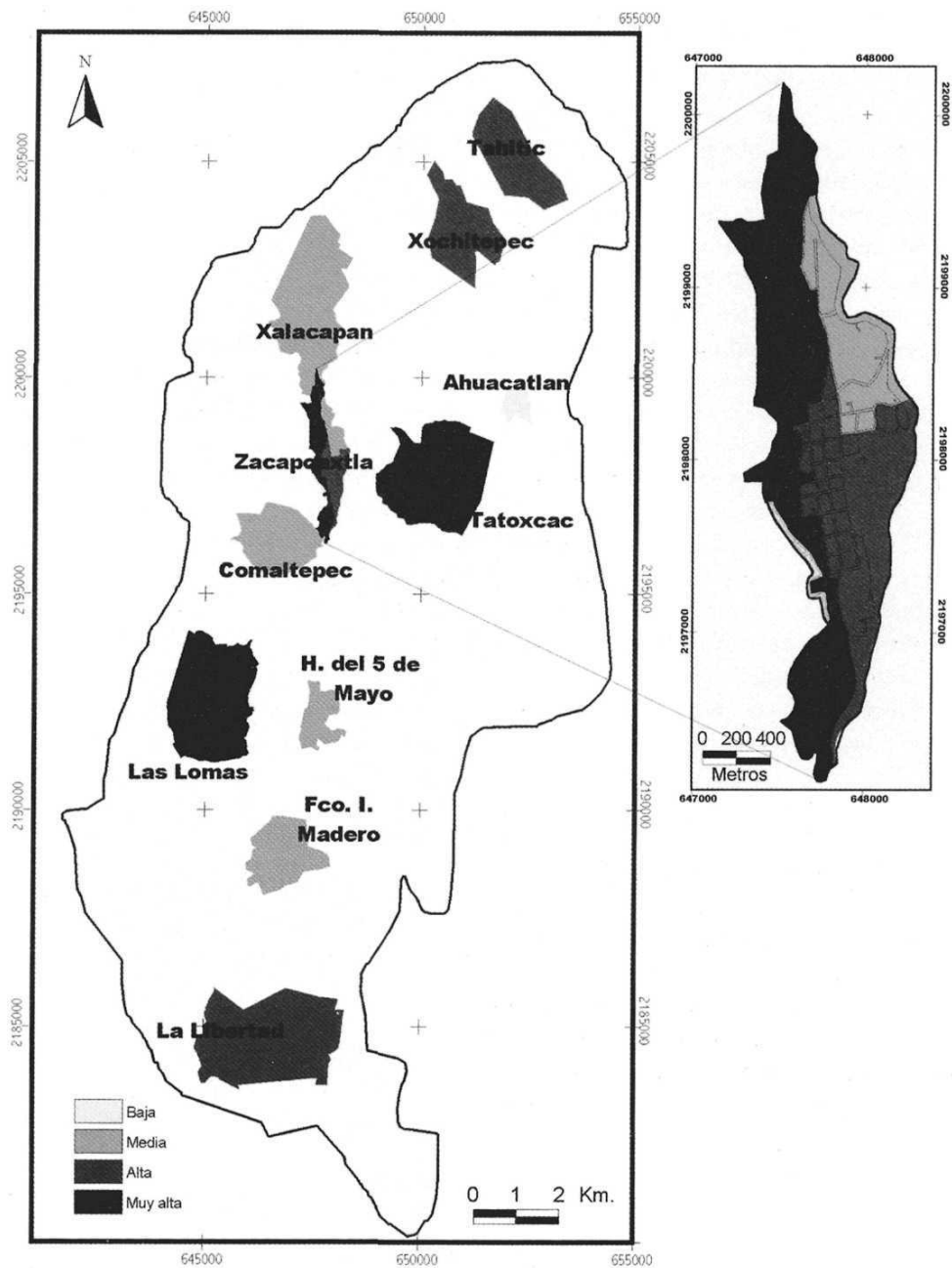


Figura 8. Índice de vulnerabilidad del municipio de Zacapoaxtla y de la cabecera municipal (recuadro).

Las zonas de riesgo muy alto se caracterizan por contar con las condiciones topográficas, litológicas y de relieve más favorables para la ocurrencia de procesos de remoción en masa, además de una alta vulnerabilidad de la población para afrontar dificultades por la acción de fenómenos naturales. Son las áreas que requieren de una atención especial, no sólo para su planeación futura, sino para su atención a corto plazo, con el propósito de disminuir el nivel de riesgo. En general, las áreas presentan litología de calizas y pendiente de 15 a 20°.

Con una combinación de vulnerabilidad alta y con posibilidades potenciales de ocurrencia de procesos de ladera frecuentes, las zonas de alto riesgo generalmente rodean las áreas de riesgo muy alto. Las zonas de premontañas y de laderas de flujos piroclásticos coinciden en gran medida con esta categoría. La influencia de ríos que generan intensa erosión fluvial determinan algunos puntos, en laderas con pendientes de 30 a 40° (Figura 10).

El riesgo medio involucra valores de vulnerabilidad y peligro cercanos a la media. En el caso del municipio de Zacapoaxtla, son zonas potencialmente riesgosas, pero los niveles de vulnerabilidad son de medio a bajo. Al este de la cabecera municipal se presenta una zona en donde prevalece el riesgo medio sobre el bajo, principalmente en algunas áreas de las localidades de Xalacapan, Comaltepec y Xaltipac. La ocurrencia de este tipo de procesos en las unidades de calizas de premontaña y laderas de 15 a 30° son comunes en esta clase (Figura 11). Cabe destacar que algunos de los procesos de remoción en masa, registrados por la Secretaría de Protección Civil de Puebla (SEPROCI) en 1999, se presentaron en las zonas de riesgo medio,

condicionado por la cercanía de ríos, además de presentarse en la rampa piroclástica, compuesta de ignimbrita, con origen en la Caldera de los Humeros.

El nivel de riesgo bajo es el dominante en el municipio, hecho que se explica por los espacios deshabitados a lo largo de la entidad, más que por condiciones de vulnerabilidad baja o aspectos físicos que favorezcan la estabilidad del terreno. Las comunidades de Ahuacatlán y Xochitepec al norte del municipio muestran valores de riesgo bajo, puesto que su nivel de vulnerabilidad es de medio a muy bajo, y se ubican en material antiguo de origen volcánico (Plioceno) con pendientes no mayores a 10°. Al sur se encuentran áreas que no están sujetas a riesgo, principalmente debido a la pendiente, la cual no supera los 10°, aunado a la ausencia de cauces que favorecen la erosión. En algunas partes de Comaltepec se presenta un nivel de vulnerabilidad bajo, además de que existen pendientes no mayores a 5°, por lo que el terreno es estable y el nivel de riesgo bajo.

CONCLUSIONES

El municipio de Zacapoaxtla se asienta sobre un relieve cuya susceptibilidad ante procesos de remoción en masa es indiscutible. El grado de susceptibilidad está determinado por unidades litológicas predominantes, representadas por materiales débiles no consolidados de origen volcánico (ignimbritas) que sobreyacen a rocas sedimentarias de origen marino (principalmente calizas), los cuales determinan el grado de resistencia de los materiales que constituyen las laderas. La morfología está representada en gran medida por una extensa rampa de piroclastos y por montañas en bloque, con pendientes abruptas y disectadas, unidades morfológicas don-

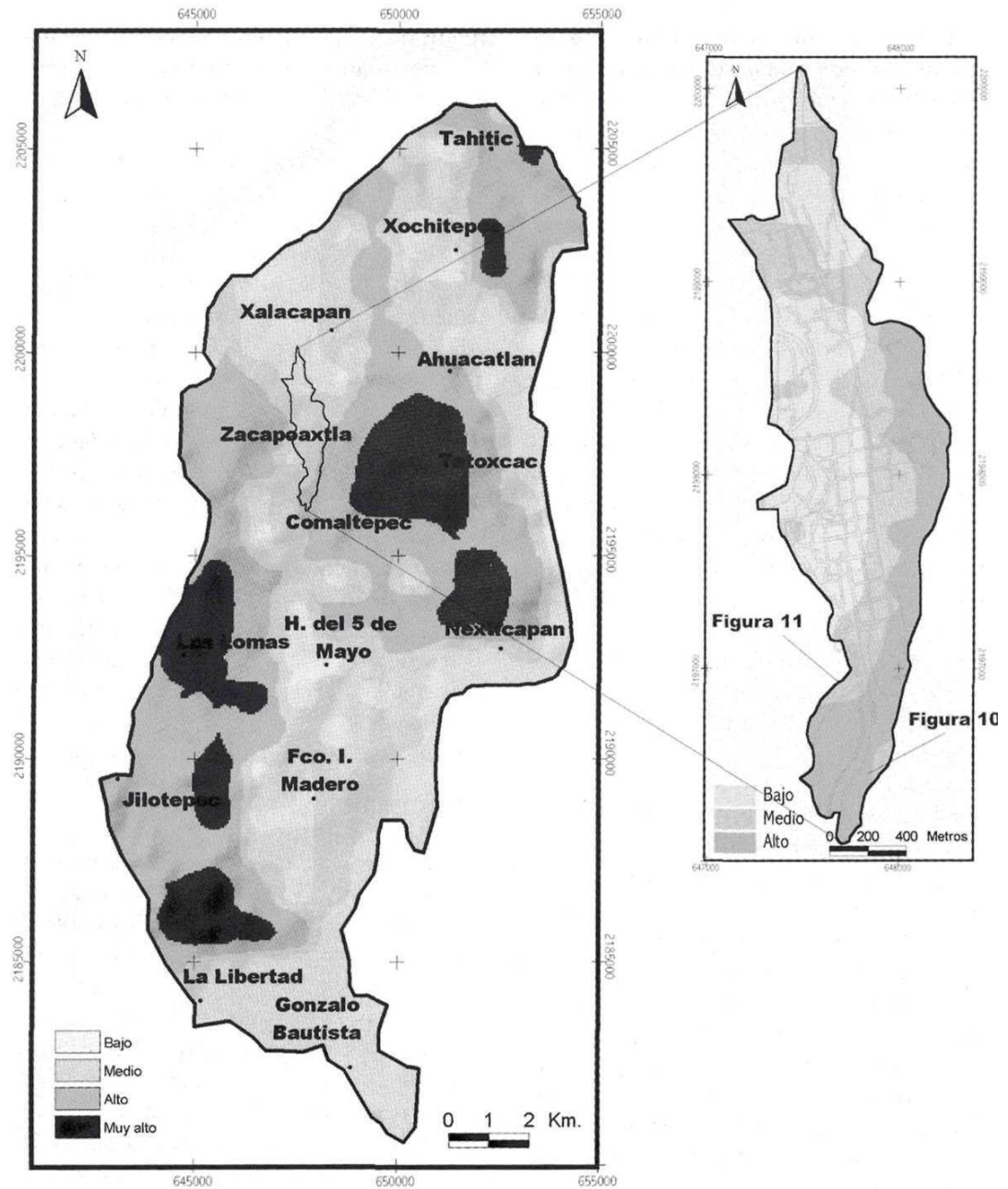


Figura 9. Mapa de riesgo por inestabilidad de laderas del municipio de Zacapoaxtla y de la cabecera municipal (recuadro).



Figura 10. Zona de alto riesgo por inestabilidad de laderas: libramiento de la cabecera municipal (foto de los autores, mayo de 2002).



Figura 11. Zona de riesgo medio por inestabilidad de laderas: poniente de la cabecera municipal (foto de los autores, mayo de 2002).

de se concentró la mayor parte de los movimientos del terreno.

Durante 1999, cientos de procesos de remoción ocurrieron a lo largo de la Sierra Norte de Puebla como resultado de un período de precipitación extraordinario. Este factor, aunado a las características morfológicas y de resistencia de los materiales formadores de las laderas, determinó la magnitud del evento, aunque cabe destacar que el impacto en poblaciones como Zacapoaxtla, fue resultado del grado de vulnerabilidad existente. Consecuentemente, a través de esta investigación se enfatiza la importancia de llevar a cabo estudios que analicen el riesgo -en este caso por inestabilidad de laderas- a través de la incorporación tanto de las variables derivadas del aspecto físico o natural, es decir, el peligro, como del aspecto social, expresado en la vulnerabilidad.

La zonificación de áreas en riesgo está estrechamente ligada al grado de vulnerabilidad de la población, a las propiedades de los materiales y al relieve actual. De tal manera que, por un lado, la delimitación de zonas susceptibles a inestabilidad de laderas en el municipio de Zacapoaxtla, permitirá sin lugar a dudas a las autoridades correspondientes brindar atención específica a los casos que así lo requieran y, por otro, los resultados plasmados en el mapa de riesgo podrán ser empleados para la elaboración de planes de prevención de desastres y mitigación del riesgo por inestabilidad de laderas, así como en la planeación de crecimiento de las poblaciones.

Cabe destacar que aunque si bien los mapas elaborados no pueden indicar la ocurrencia de dichos procesos en el ámbito temporal, es decir, cuándo ocurrirán, sí muestran de manera espacial los sitios potencialmente

inestables. Por último, es importante mencionar que el trabajo aquí presentado es resultado de la integración de los aspectos teóricos de los procesos de remoción en masa y del manejo de modelos, del análisis de las condiciones físicas del relieve (geomorfología) y de los materiales que lo componen (geología-mecánica de suelos), junto con los aspectos sociales de la población (características socio-económicas y vulnerabilidad); todo ello fundamental para la evaluación del riesgo por deslizamientos, o por cualquier fenómeno natural.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT por el apoyo financiero brindado a través del proyecto de investigación J33428-T "Inestabilidad de laderas y riesgos asociados: estrategias de prevención de desastres para la región Puebla-Veracruz", así como a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios.

REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I. (2000), "Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 41, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-25.
- Alcántara-Ayala, I. y L. Domínguez-Morales (en preparación), *On the advantages of an in situ method to determine soil strength and its applicability to landslide research*.
- Bitrán-Bitrán, D. (2000), "Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la República Mexicana durante 1999", *Cuadernos de Investigación*, núm. 50, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México, pp. 194-210.

- 📖 Borja-Baeza, R. C. (2003), *Análisis de susceptibilidad y riesgos asociados a procesos de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla*, tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- 📖 Casale, R. y C. Margottini (2000), *Floods and landslides: Integrated Risk Assessment*, Springer, Berlin.
- 📖 INEGI (2000a), *Cuaderno estadístico municipal de Zacapoaxtla*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- 📖 INEGI (2000b), *Censo de Población y Vivienda 2000*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- 📖 López-Ramos, E. (1982), *Geología de México*, tomo II, Secretaría de Educación Pública, México, pp. 244-402.
- 📖 Lugo-Hubp, J., M. T. Vázquez-Conde, G. Melgarejo-Palafox, F. García-Jiménez y G. Matías-Ramírez (2001), "Procesos gravitacionales en las montañas de Puebla", *Ciencia y Desarrollo* 27:157, pp. 24-33.
- 📖 Maskrey, A. (1993), "Los desastres no son naturales", *La Red: Red de estudios sociales en prevención de desastres naturales en América Latina*, Ed. Tercer Mundo, Colombia, pp. 61-74.
- 📖 Ortega-Gutiérrez, F. (1992), *Texto explicativo de la quinta edición de la carta geológica de la República Mexicana*, Instituto de Geología, UNAM, México, pp. 11-26.
- 📖 Selby, M. J. (1993), *Hillslope material and process*, Oxford University Press, pp. 5-82.
- 📖 Tarboton, D. G. (1997), "A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models", *Water Resources Research*, 33 (2), pp. 309-319.
- 📖 Terzaghi, K. (1950), "Mechanisms of landslides", *Geol. Soc. Am.*, Berkeley.
- 📖 Tilling, R. (1989), "Los peligros volcánicos", *Organización Mundial de Observatorios Volcanológicos*, Santa Fe, Nuevo México.
- 📖 White, G. F. (1974), "Natural hazards research: concepts, methods and policy implications", In White, G. (ed.), *Natural Hazards: local, national, global*, Oxford University Press, New York.
- 📖 Yañez-García, C. y S. García-Durán (1982), *Exploración de la región geotérmica Los Hornos-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz*, Comisión Federal de Electricidad, México.