

Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México

Recibido: 6 de enero de 2014. Aceptado en versión final: 28 de octubre de 2014.

José Alejandro Galindo Serrano*
Irasema Alcántara Ayala**

Resumen. En México y diversas partes del mundo los desastres asociados a la inestabilidad de laderas generan impactos negativos en el ámbito socio-económico y ambiental. Además de las pérdidas de vida, y el daño a la cubierta vegetal, las afectaciones a las viviendas y la infraestructura son frecuentes; en los últimos años, la destrucción y deterioro en la infraestructura vial ha sido de particular importancia. Entre las diferentes áreas del país que de manera recurrente suelen ser afectadas por inestabilidad de laderas, se encuentra la Sierra Norte del estado de Puebla. Pérdidas humanas y económicas directas e indirectas, resultado de la ocurrencia de procesos de remoción en masa (PRM) desencadenados principalmente por lluvias intensas, en comunidades vulnerables expuestas de esta región, han tenido lugar desde hace algunas décadas. El impacto en la infraestructura ha cobrado gran relevancia, especialmente desde 1999, razón por la cual este estudio se centró en el análisis de la susceptibilidad a procesos de remoción de masa en las principales carreteras de la región de la Sierra Nororiental de Puebla.

Dicho análisis involucró la elaboración de un inventario de PRM, así como de la cartografía temática empleada como insumo para la aplicación del análisis multicriterio y pesos de evidencia. Se obtuvieron dos mapas de susceptibilidad

de la región de interés, y los resultados fueron analizados a través de un índice de recurrencia de PRM. Finalmente, se efectuó el análisis espacial de la susceptibilidad a PRM de varios tramos carreteros de la Sierra Nororiental, con base en el análisis de proximidad y de superposición.

El inventario de PRM generado se integró por 166 procesos de remoción en masa y 40 zonas potencialmente inestables. Las áreas de muy alta susceptibilidad corresponden a zonas con un relieve muy accidentado, mientras que las regiones planas coinciden con zonas de muy baja susceptibilidad. La variación de los resultados expresados en los mapas de susceptibilidad elaborados a partir de ambas metodologías implica que la zonificación resultado del análisis multicriterio tiende a producir valores más bajos en la zona urbana, mientras que en el peso de evidencia, se le confieren valores menores a zonas montañosas que pueden caracterizarse como potencialmente inestables debido a su naturaleza geológico-geomorfológica, pero que adolecen de registros o evidencias concretas.

Palabras clave: Procesos de remoción en masa, susceptibilidad, infraestructura vial, análisis multicriterio, pesos de evidencia.

* Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: alexgalindo_87@hotmail.com

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: irasema@igg.unam.mx

Cómo citar:

Galindo S., J. A. e I. Alcántara-Ayala (2015), "Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 88, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 122-145, dx.doi.org/10.14350/rig.43790.

Slope instability and road infrastructure: susceptibility analysis of mass movement processes in the Sierra Nororiental, Puebla, Mexico

Abstract. In Mexico and around the world, disasters associated with slope instability generate negative impacts on the socio-economic and environmental contexts. Besides the loss of life and damage to vegetation cover, the damages to homes and infrastructure are common. In recent years, the destruction and deterioration of road infrastructure has been of particular importance.

The Sierra Norte de Puebla is among the different areas of the country that are recurrently affected by slope instability. Direct and indirect human and economic losses result of the occurrence of mass movement processes (MMP) –mainly triggered by heavy rains– in vulnerable exposed communities in this region, have taken place since some decades. The impact on infrastructure has become important, especially since 1999. Therefore, this study is focused on the analysis of susceptibility to mass movement processes on the main roads of the Northeast region of the Sierra de Puebla.

This analysis involved the development of an inventory of MMP as well as of the thematic maps used as input for the implementation of multi-criteria and weights of evidence analysis. Two maps of susceptibility of the region of interest were obtained and the results were analyzed by a recurrence index of MMP. Finally, the spatial analysis of susceptibility to MMP for several road sections of the Sierra Nororiental, based on the analysis of proximity and overlap, was made.

The inventory was generated based on two procedures. The first was through direct observation in the field and data collection by using a global positioning system (GPS). The second was through remote sensing using SPOT satellite images and Google Earth. The inventory included 166 landslides and 40 potentially unstable areas.

According to the recurrence index of MMP developed in order to analyze the produced maps, results obtained by applying the method of weights of evidence, showed that 72.28% of MMP occurred in the ranges of high and very high susceptibility, 24.1% in areas of medium susceptibility and 3.6% in the low range. The MMP categorized as low range

were caused by human factors, and were situated in slope cuts or artificial excavations of small dimensions, which due to map scale and the interval of contour lines were not properly represented.

Moreover, according to the multi-criteria analysis, 69.27% of MMP were located in the range of high and very high susceptibility, 23.49% are in areas of medium susceptibility and the remaining 7.22% were concentrated on low and very low areas of susceptibility. MMP that are in the low range are of small size and result from the constructions and cuts for roads, that is to say, to factors or parameters that were not considered directly in this analysis.

The high susceptibility areas correspond to areas with very rugged terrain, while the flat regions coincide with areas of very low susceptibility. The variation of the results expressed in the susceptibility maps produced by applying both methodologies implies that the zoning of multi-criteria analysis tends to produce lower values in urban areas, while the weight of evidence, conferred lower values to mountain areas that can be characterized as potentially unstable due to its geological-geomorphological nature, but lacks of records or concrete evidence.

This study represents a first step in the analysis of slope instability triggered by rainfall in the road infrastructure in the Sierra Nororiental de Puebla (North Eastern Range of Puebla). It is therefore important that future studies of multidisciplinary nature and especially the contribution of civil engineering perspective consider the interaction between the physical environment and road infrastructure. As such, it will be of great significant to address issues including slope cutting height, angle of slope, drainage works cleaning, type of cross section of the road, functionality of the retention works, type of soil and rock, rock fractures, discontinuities, the level of cutting of vegetation coverage, erosion processes, and rainfall- infiltration dynamics.

Key words: Mass movement processes, susceptibility, road infrastructure, multi-criteria analysis, weights of evidence.

INTRODUCCIÓN

En México y diversas partes del mundo los desastres asociados a la inestabilidad de laderas generan impactos negativos en el ámbito socio-económico y ambiental. Además de las pérdidas de vida, y el daño a la cubierta vegetal, las afectaciones a las viviendas y la infraestructura son frecuentes; en los últimos años, la destrucción y deterioro en la infraestructura vial ha sido de particular importancia (Zevallos, 1994; Audemard y Singer, 2002; Ching y Liao, 2006; Jaithish, 2010; Petley, 2010).

Dado lo anterior, el estudio de los desastres asociados a diversas amenazas naturales desde diferentes enfoques ha cobrado gran relevancia. Especial atención debe darse al análisis del impacto que se genera en las vías de comunicación o redes carreteras, ya que además de ser consideradas como patrimonio –y por ende es necesario proteger su integridad y funcionamiento– (García, 2003), éstas constituyen un elemento de suma importancia para que se lleven a cabo diversas funciones socio-económicas, entre las que destacan: *a)* integración de comunidades y territorios, *b)* desarrollo de las

actividades cotidianas de la población; *c*) acceso de las comunidades a servicios básicos sociales; *d*) favorecimiento de las actividades productivas; *e*) representan el motor de la economía de cualquier región, y *f*) constituyen uno de los principales medios de acceso para atender situaciones de emergencia en caso de desastre.

Entre las diferentes áreas del país que de manera recurrente suelen ser afectadas por inestabilidad de laderas, se encuentra la Sierra Norte del estado de Puebla. Pérdidas humanas y económicas directas e indirectas, resultado de la ocurrencia PRM desencadenados principalmente por lluvias intensas, en comunidades vulnerables expuestas de esta región, han tenido lugar desde hace algunas décadas. Sin embargo, uno de los eventos más importantes ocurrió en octubre de 1999.

A consecuencia de lluvias torrenciales en los estados de Puebla, Hidalgo y Veracruz, se desencadenaron cientos de procesos de remoción en masa (Bitrán, 2001; Alcántara, 2004; Lugo *et al.*, 2005). En el estado de Puebla, los daños se extendieron a 81 municipios debido al desbordamiento de ríos, procesos de ladera e inundaciones. Los sectores con mayores daños fueron la infraestructura y servicios, con dos tercios de las pérdidas totales; entre ellos destacan las afectaciones al sistema de comunicaciones y transportes, mismas que ascendieron a 974.3 millones de pesos y representaron el 41.9% del total de las pérdidas asociadas al desastre (Bitrán, 2001), (Tabla 1).

De manera reciente, en septiembre de 2013, las lluvias generadas por los huracanes Ingrid y Manuel en el territorio nacional, también afectaron considerablemente esta región poblana. Derivado de esta problemática, este estudio se centró en el análisis de la susceptibilidad a procesos de remoción de masa en las principales carreteras de la región de la Sierra Nororiental de Puebla. Dicho análisis involucró la elaboración de un inventario de PRM, así como de la cartografía temática que se empleó como insumo para la posterior aplicación del análisis multicriterio y pesos de evidencia. Con base en ambos métodos se realizaron dos mapas de susceptibilidad de la región de interés, y sus correspondientes índices de recurrencia de PRM. Finalmente, se efectuó el análisis espacial de la

Tabla 1. Impacto ocasionado por el desastre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla: daños en millones de pesos

Sector/ Concepto	Daños directos	Daños indirectos	Total	% TOTAL
	Millones de pesos mexicanos			
Sectores Sociales	505	15	520	22.4
Vivienda	486.1		486.1	20.9
Educación	16.4	15	31.4	1.3
Salud	2.5		2.5	0.1
Infraestructura y Servicios	1540	1	1541	66.3
Agua y saneamiento	84.6	1.8	86.4	3.7
Energía (CFE)	481.1		481.1	20.7
Transporte y comunicaciones	974.3		974.3	41.9
Sectores Productivos	190.7	35	225.7	9.7
Agricultura	132.5	35	167	7.2
Ganadería	15.4		15.4	0.7
Forestal	35		35	1.5
Pesca (acuicultura)	7.8		7.8	0.3
Atención a la Emergencia		38.6	38.6	1.6
Total	2 235.7	89.6	2 325.3	100

Fuente: Bitrán, 2001.

susceptibilidad a PRM de varios tramos carreteros de la Sierra Nororiental, considerando análisis de proximidad y de superposición.

LA SIERRA NORORIENTAL DE PUEBLA

Marco geográfico general

El área en estudio (Figura 1) se localiza al noreste del estado de Puebla (entre 19° 45' y 19° 57', 97° 16' y 97° 35'); se encuentra en la zona de

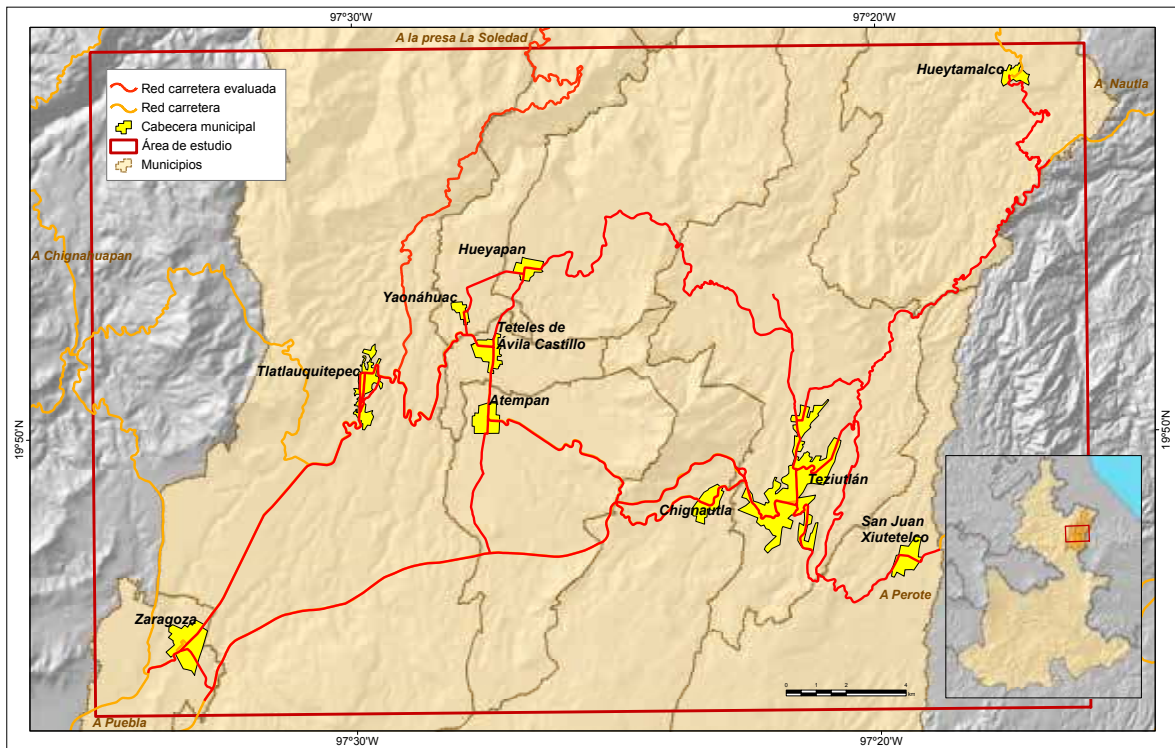
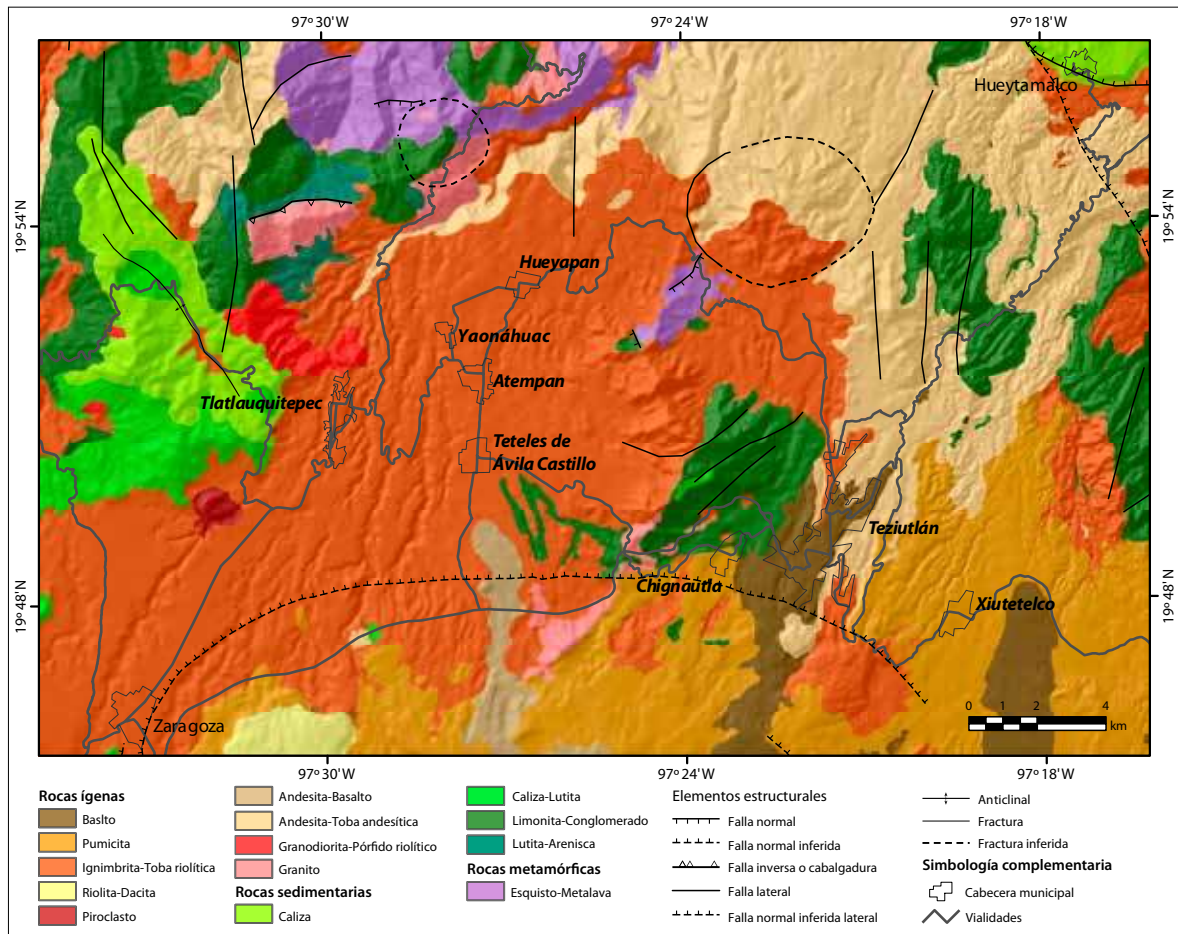


Figura 1. Localización del área en estudio.

transición de dos unidades fisiográficas, la Sierra Madre Oriental y el Sistema Volcánico Transversal. Comprende diez municipios de los 28 que corresponden a la región de la Sierra Nororiental, anteriormente denominada región de Teziutlán (COTEIGEP, 2010). Los municipios son: Zaragoza, Tlatlauquitepec, Yaonáhuac, Atempan, Hueyapan, Teteles de Ávila Castillo, Chignautla, Teziutlán, Xiutetelco y Hueytamalco.

El relieve presenta como característica principal un descenso constante de sur a norte, la altitud del área oscila entre los 500 y 2 700 msnm. Al sur se encuentran planicies onduladas medianamente disecionadas, hacia el norte la diseción del terreno va aumentando; en el centro se presentan lomeríos medianamente disecionados interrumpidos por la Cerro Chignautla (2 560 m) situado al oeste de la ciudad de Teziutlán, y los cerros Xonocuhuta (2 500 m) y las Ánimas (2 400 m) en el poniente de la ciudad de Tlatlauquitepec; en el norte hay la presencia de sierras fuertemente disecionadas.

La geología del lugar es muy diversa debido a que se encuentra en la zona de transición de dos provincias fisiográficas (Figura 2). El basamento está constituido por rocas metamórficas del esquistos Chililis (esquistos de clorita-moscovita) y metalava andesítica del Pérmico Inferior que aflora en la porción norte del área y corresponde a la base del Terreno tectonoestratigráfico Maya. Dicho basamento está cubierto de manera discordante por rocas jurásicas de la Formación Huayacocotla, la cual está formada por una alternancia de lutitas y areniscas, así como por la Formación Cahuasas, de edad Bajociano-Bathoniano, compuesta por limolita, conglomerado, y esporádicos horizontes de arenisca, y por rocas ígneas terciarias. Estas últimas están conformadas por los depósitos provenientes del campo volcánico de Los Humeros, ampliamente expuestos en la porción noreste, constituidos por andesita y andesita basáltica del Plioceno. Entre los depósitos de los Humeros se distingue la Formación Teziutlán del Plioceno, constituida por andesitas,



Fuentes: INEGI, 1984, SGM, 2010 y 2011.

Figura 2. Geología del área de interés.

andesitas basálticas, y raramente basalto y algunos horizontes de toba basáltica. También aflora la Formación San Antonio formada por andesitas, basaltos y piroclastos de composición basáltica del Plioceno tardío-Pleistoceno temprano; le sobryace de manera discordante la Formación Apaxtepec, de edad Plioceno tardío-Pleistoceno, constituida por escoria basáltica y pequeños derrames de basalto. Cubriendo las unidades anteriores discordantemente en la porción sur y centro se encuentra una toba riolítica que corresponde a la Formación Riolita Oyameles del Plioceno tardío y Pleistoceno temprano. La Ignimbrita Xaltipán, del Pleistoceno, aflora extensamente en la región y está constituida princi-

palmente por una toba riolítica que se presenta en sus tres estados de piro-consolidación (de la base a la cima: densa, mediana y ausente). En los sectores sur y suroriental se deposita pumicita la cual pertenece al Pleistoceno. Finalmente la actividad volcánica culmina con un derrame de basalto de olivino localizado en la porción suroriental pertenecientes también al Plioceno. Existen asimismo algunas rocas cristalinas, entre las que destaca el Tronco de Tlatlauquitepec de edad Mioceno, el cual aflora en el municipio del mismo nombre y está constituido principalmente por granodiorita y pórfido riolítico (Ángeles y Sánchez, 2002; SGM, 2010, 2011).

La zona en estudio se encuentra dentro de la Regiones Hidrográficas 27A y 27B, la primera correspondiente al río Nautla y la segunda al río Tecolutla (INEGI, 2011). La configuración de la red fluvial es de tipo paralelo con dirección suroeste-noreste, entre los principales ríos destacan el Acongo, Ocotlán, Xochihuatzaloyan, Maquina Vieja, Xucayucan y Xoloatl, los cuales desembocan en el río Tecolutla. También destacan los ríos El Calvario, Jalacingo y Tezayacapa que son afluentes del río Nautla.

La zona presenta tres tipos de clima. En la parte más alta al suroeste es templado subhúmedo, el templado húmedo tiene presencia en la zona al sur y centro donde se localiza la mayoría de las cabeceras municipales y el semicálido húmedo en las partes más bajas al norte. La temperatura media anual en las partes altas es de 14° C, mientras que en la parte más baja es de 20° C, siendo mayo el mes más cálido y enero el más frío. La precipitación total anual es de entre los 1 000 y 3 500 mm, en donde el mes más seco es marzo y el que presenta mayor precipitación es septiembre (INEGI, 1993a).

De acuerdo con la clasificación de la FAO UNESCO (IUSS, 2007) el tipo de suelo que predomina es el andosol ócrico en la porción noreste y el andosol húmico en la porción suroeste; estos suelos de origen volcánico están constituidos principalmente de ceniza, la cual contiene un alto contenido de alófono, que le confiere ligereza y untuosidad al suelo, además, estos suelos de color oscuro tienen alta capacidad de retención de humedad y son muy susceptibles a la erosión. Tienen bajos rendimientos agrícolas debido a que retienen considerablemente el fósforo, y el uso más favorable para su conservación es el forestal (INEGI, 2004).

El tipo de vegetación es muy variado, en la zona norte en donde hay presencia de fuertes pendientes, se encuentran bosques mesófilos de montaña que han sido afectados por actividades antrópicas en las que destacan la inducción de cultivos y pastizales; en las elevaciones de la zona centro y sur se localizan bosques de pino, de pino-encino y encino-pino; en las zonas planas de toda el área en estudio hay presencia de zonas agrícolas de temporal acompañadas con pastizales cultivados en la zona oriente (INEGI, 1993b).

Inestabilidad de laderas en la infraestructura vial: un breve recuento

La red carretera de México nació en 1925. No obstante, en aquel entonces la región de Teziutlán (Sierra Nororiental) solo contaba con brechas y veredas. Fue hasta el periodo de 1940-1960 que dicha región fue dotada de infraestructura, etapa en la cual la red nacional se incrementó y la comunicación del territorio nacional alcanzó el 33% (SCT, 1996).

En 1955 el huracán Janet provocó algunos PRM en la zona en estudio, y afectó diversas carreteras y las comunicaciones, e indirectamente propició un desabasto alimenticio. Las pérdidas humanas y materiales no fueron considerables debido a que la distribución de los PRM se centraba principalmente en lugares poco poblados. Décadas más tarde, las intensas lluvias de octubre de 1999 desencadenaron cientos de PRM, mismos que en combinación con poblaciones vulnerables expuestas involucró pérdidas humanas y materiales considerables; la magnitud de este evento fue tan importante que llegó a ser considerado como el desastre de la década (Bitrán, 2001).

En octubre de 2005, a consecuencia del huracán *Stan*, cuyo impacto fue notable en los estados de Hidalgo, Puebla, Guerrero, Oaxaca, Chiapas y Veracruz, la generación de lluvias desencadenó nuevamente inundaciones y procesos de remoción en masa en las Sierras Norte y Nororiental de Puebla. Hubo 25 poblaciones incomunicadas y una veintena de viviendas arrasadas por la creciente de los ríos; en el municipio de Xochiapulco un deslizamiento sepultó una vivienda y perdieron la vida tres personas (CENAPRED, 2006).

El total de daños cuantificados en el estado de Puebla fue de aproximadamente 917,3 millones de pesos. Los daños en la infraestructura física representaron más del 60% del total de los daños registrados a consecuencia del huracán; el sector más afectado fue el de las comunicaciones y transportes (Tabla 2). Se presentaron afectaciones en las vías de comunicación de 77 municipios; 426 caminos con una longitud de 3 544 kilómetros fueron dañados. La red estatal fue la que presentó mayores afectaciones con un monto estimado de 374 millones de pesos para resarcir los daños. La

Tabla 2. Impacto ocasionado por el huracán Stan en 2005 en Puebla: daños en millones de pesos

Sector/ Concepto	Daños directos	Daños indirectos	Total	% TOTAL
	Millones de pesos mexicanos			
Sectores Sociales	246.8	18.6	265.5	28.9
Vivienda	163.4	4.7	168.1	18.3
Educación	64.6	1.4	66.1	7.2
Salud	11.6	12.4	24	2.6
Infraestructura hidráulica (CNA)	7.1	0	7.1	0.8
Infraestructura	540.8	17.1	558	60.8
Sector electric	0.3	0.01	0.31	0
Obras públicas	0	0.9	0.9	0.1
Transporte y comunicaciones	540.5	16.2	556.7	60.7
Sectores Productivos	19.8	0	19.8	2.2
Agropecuario	19.8	0	19.8	2.2
Atención a la Emergencia	0	73.9	73.9	8.1
Total	807.5	109.7	917.3	100

Fuente: CENAPRED, 2006.

red municipal también sufrió graves afectaciones, su atención requirió un monto de 167 millones de pesos (*Ibid.*). Los daños a la infraestructura carretera afectaron a una población de más de un millón de personas, de las cuales una cantidad considerable permaneció incomunicada por un periodo prolongado.

El 27 de julio de 2004 se inauguró el último tramo de la autopista Puebla-Teziutlán, que corresponde al tramo Zaragoza-Teziutlán; a lo largo de esta vialidad cada año en temporada de lluvias (principalmente en los meses de septiembre y octubre), se presentan diversos PRM (Figura 3).

En septiembre de 2010, la presencia del Huracán *Karl* provocó la ocurrencia de algunos PRM en

las vialidades de la zona de interés. En la cabecera municipal de Teziutlán, el movimiento de mayor impacto se registró en la Avenida Juan Pablo II, vialidad importante que comunica al barrio de Ahuateno con el de Francia al poniente de la ciudad (Rodríguez, 2010). En el Kilómetro 129 de la carretera federal Amozoc-Teziutlán, en un paraje denominado La Escondida, se registró un deslizamiento que obstruyó la vialidad por varias horas, hasta que el material fue retirado. Otro proceso de remoción ocurrió en el Kilómetro 5 de la carretera Teziutlán-Perote en un sitio denominado Las Coles y pese al riesgo que representó este evento se mantuvo abierta la circulación de vehículos (*Noticias de Puebla*, 2010).

En septiembre de 2011, las constantes lluvias provocaron la caída de grandes bloques de roca sobre la carpeta asfáltica en el Kilómetro 130+500 de la autopista Puebla-Teziutlán, tramo que se encuentra en el municipio de Chignautla; este evento ocurrió en la noche por lo que no hubo percances y únicamente quedó un carril habilitado para la circulación (*Diario de Teziutlán*, 2011).

En agosto de 2012, la depresión tropical *Ernesto* ocasionó diversos eventos asociados a PRM en la infraestructura carretera de la región (Arriola, 2012), entre ellos destacan:

1. Quedó bloqueado el Libramiento Oriente de Teziutlán en el tramo las Coles-La Legua a la altura de Ixtipan a causa de un deslizamiento de tierra.
2. En la carretera federal Teziutlán-Nautla a la altura del Kilómetro 17 denominado como Cruz Verde, un deslizamiento y desbordamiento de talud bloqueó los dos carriles.
3. En el circuito Juan Pablo II hubo socavamiento en un puente.
4. En la carretera Teziutlán-Perote, a la altura de Xoloco correspondiente al Kilómetro 3, se presentó un considerable encharcamiento.
5. En San Juan Tezongo, localidad que se encuentra al norte de la ciudad de Teziutlán, los caminos presentaron socavamiento.
6. En el municipio de Tlatlauquitepec, en la Carretera Federal Núm. 129, a la altura del Kilómetro 27 denominado como "Banco



Figura 3. Deslizamiento en el Kilómetro 115 de la autopista Puebla-Teziutlán (foto: Alejandro Galindo).

Negro” ocurrió un deslizamiento sobre la carretera.

7. En Jiliapa, que se ubica al norte de la cabecera municipal de Tlatlauquitepec, un árbol cayó sobre la red de distribución de energía eléctrica provocando que toda la comunidad se quedara sin luz.
8. En el tramo carretero Atotocoyan-Mazatepec, al norte de Hueyapan, cerca de la Presa la Soledad, un árbol cayó sobre la vialidad bloqueando ambos carriles.

La cabecera municipal de Teziutlán se caracteriza por poseer una dinámica comercial importante debido a su producción ganadera, agrícola y frutícola (INAFED, 1998). Al mismo tiempo, al ser una ciudad con diversos tipos de servicios y varias fuentes de empleo, existe un importante desplazamiento de personas provenientes de las localidades y cabeceras municipales de la región, entre las que destaca Hueytamalco; esta situación ha originado un considerable flujo comercial y de pasajeros en la red carretera actual.

Como se puede observar en la Figura 4, la configuración espacial de la red carretera y los asentamientos es muy compleja. De acuerdo con la importancia de las vías de comunicación, la parte

oeste del área en estudio tiene una configuración lineal, es decir, la principal vía de comunicación, la carretera federal Amozoc-Teziutlán, cruza por la mayoría de las principales localidades y atraviesa la zona de suroeste a este. Al este de la zona en estudio hay una configuración de tipo nucleado, varias vías de comunicación importantes confluyen en un centro urbano importante, en este caso, la ciudad de Teziutlán.

Las carreteras de tipo estatal y municipal se derivan de las federales en forma de ramificaciones y arcos; las ramificaciones comunican a localidades pequeñas con las principales carreteras y los arcos tienen la función de ser libramientos de las localidades más grandes. La autopista Puebla-Teziutlán tiene un recorrido semi-paralelo a la carretera Amozoc-Teziutlán sin cruzar ninguna localidad importante hasta desembocar en la ciudad de Teziutlán, pero está conectada con tramos alimentadores a la misma; esto le da una configuración de tipo focal al suroeste de la zona y de tipo nucleado al este de la misma.

Para el desarrollo de esta investigación fueron considerados 17 tramos carreteros que comunican a las diez cabeceras municipales localizadas en el área en estudio, las cuales pertenecen a la Región de la Sierra Nororiental de Puebla (Tabla 3).

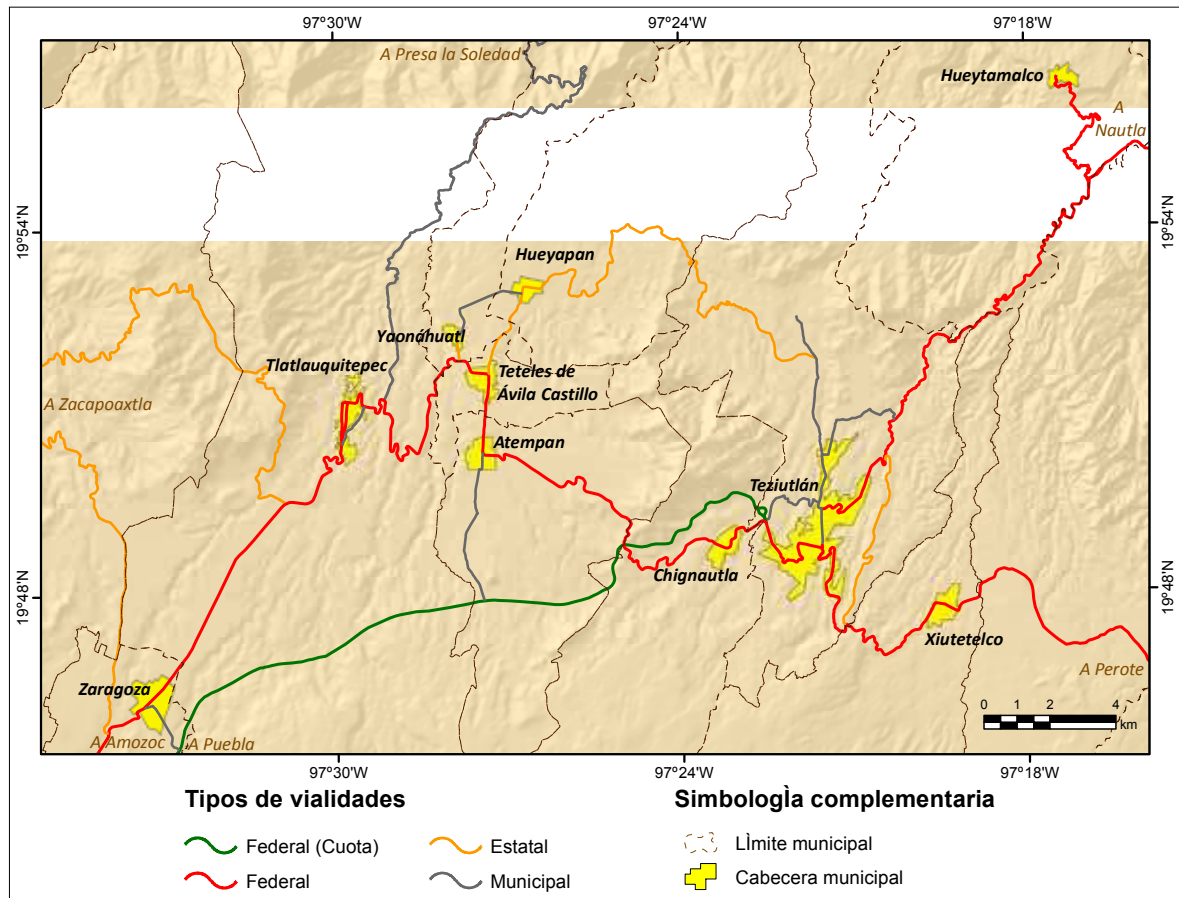


Figura 4. Red carretera de la región Sierra Nororiental de Puebla.

METODOLOGÍA

Inventario de PRM y base de datos

El inventario de PRM es una herramienta fundamental para la generación de cartografía de inestabilidad de laderas (Hansen, 1984; Parise, 2000), y en particular para la evaluación de amenazas; éste puede ser definido como la relación ordenada de la ocurrencia y características de los procesos de remoción en masa en un territorio determinado (Alcántara y Murillo, 2008).

El análisis de susceptibilidad aquí presentado requirió la elaboración de un inventario, el cual fue realizado con base en dos procedimientos. El primero de ellos fue a través de observación directa en campo y la recolección de los respectivos datos

con el uso de un sistema de posicionamiento global (GPS). El segundo fue a través de percepción remota (PR), mediante el uso de imágenes de satélite SPOT del año 2011, que junto con *Google Earth* y el sistema de información geográfica (SIG) ArcGis 9.3 fueron fundamentales para la generación de los datos.

La observación de campo y uso de GPS incluyó recorridos en tres sectores principales:

1. El recorrido inició en el Kilómetro 114 de la Carretera Federal N° 129 correspondiente al tramo Amozoc-Teziutlán en la localidad de Acuaco en el municipio de Zaragoza y se concluyó en el Kilómetro 128 de la misma en la cabecera municipal de Teziutlán. Esta carretera

Tabla 3. Caracterización generalizada de los tramos carreteros de la Sierra Nororiental de Puebla analizados

Tramo	Administración	Número	Longitud (km)	Estado físico	Pavimentación	Función
Autopista Puebla-Teziutlán	Federal Concesionada	129D	62.4	Bueno	Asfalto	Comunicar a la ciudad de Teziutlán directamente con la capital del estado de Puebla.
Carretera Amozoc-Teziutlán	Federal	129	157.9	Bueno Regular Malo	Asfalto Concreto hidráulico	Comunicar a los municipios de las regiones Valle de Serdán y Sierra Nororiental con la región de Angelópolis.
Carretera Teziutlán-Nautla	Federal	129	93.4	Bueno	Asfalto	Comunicar a la ciudad de Teziutlán con el Golfo de México e importantes localidades del centro del estado de Veracruz.
Carretera Teziutlán-Perote	Federal	131	48	Regular	Asfalto	Comunicar a las ciudades de Teziutlán y Altotonga con la ciudad de Perote.
Carretera Teziutlán-Aire Libre	Estatad	214	2.5	Bueno	Asfalto	Comunicar a la cabecera municipal de Teziutlán con la localidad de Aire Libre.
Carretera Aire Libre-Hueyapan-Tételes	Estatad	209	14.5	Bueno	Asfalto	Comunicar a diversas localidades del municipio de Hueyapan con su cabecera municipal.
Hueyapan-Yaonáhuac	Municipal	S/N	2.9	Bueno	Asfalto Concreto hidráulico	Comunicar directamente la cabecera municipal de Yaonáhuac con la cabecera de Hueyapan
Entronque Carretera Amozoc-Teziutlán/Yaonáhuac	Estatad	210	0.8	Regular	Asfalto	Conectar a la cabecera municipal de Yaonáhuac con la principal vialidad de la zona, la carretera Amozoc-Teziutlán.
Libramiento Efrén Ramos Salazar	Municipal	S/N	1.4	Malo	Asfalto	Ser una alternativa vial para evitar transitar por el centro de la localidad de Tlatlauquitepec.
Entronque Km. 122.5 Autopista Puebla-Teziutlán/Atempan	Municipal	S/N	4.8	Bueno	Asfalto	Comunicar la cabecera municipal con la autopista Puebla-Teziutlán.

Tabla 3. Continuación

Tramo	Administración	Número	Longitud (km)	Estado físico	Pavimentación	Función
Entronque carretera Amozoc-Teziutlán/ Tramo alimentador a autopista Puebla-Teziutlán	Municipal	S/N	1.9	Bueno	Asfalto	Comunicar a la cabecera municipal de Zaragoza con la autopista Puebla-Teziutlán.
Entronque carretera Teziutlán-Nautla/ Acateno	Municipal	S/N	6.2	Regular	Asfalto	Comunicar el centro de la ciudad de Teziutlán con la localidad de San Juan Acateno.
Carretera Amozoc-Teziutlán/ Coyotzingo-Ahuateno	Municipal	S/N	3.5	Muy malo	Asfalto	Comunica a la carretera Teziutlán-Aire Libre con la Federal Teziutlán-Nautla enlazando a las localidades de Atoluca y El Carrizal.
Entronque carretera Teziutlán-Nautla/ Ramal a Hueytamalco	Federal	129	6.9	Malo	Asfalto	Comunicar a la localidad de El Mohón localizada en el Kilómetro 19 de la carretera número 129, con la cabecera municipal de Hueytamalco.
Libramiento Oriente de Teziutlán	Estatad	215	6.3	Regular	Asfalto	Enlaza al Kilómetro 5 de la carretera Teziutlán- Perote con el Kilómetro 5 de la Teziutlán-Nautla.
Circuito Juan Pablo II	Municipal	S/N	2.8	Muy Bueno	Concreto hidráulico	Ser un libramiento para evitar entrar al centro de Teziutlán.
Entronque carretera Amozoc-Teziutlán/ Tlatlauquitepec-Mazatepec	Municipal	S/N	25.2	Bueno Regular	Asfalto Concreto hidráulico	Comunicar a la Presa La Soledad y a la localidad de Atotocoyan con la carretera federal Amozoc-Teziutlán.

comunica las cabeceras municipales de Zaragoza Tlatlauquitepec, Atempan, Tétéles de Ávila Castillo, Chignautla y Teziutlán. En este trayecto se recorrieron carreteras de carácter estatal y municipal, las cuales tienen un carácter de alimentadoras a la carretera federal. Éstas son: el Libramiento Tlatlauquitepec-Hospital General, la carretera estatal Entronque carretera federal N° 129-Yaonahuac, la carretera

municipal Yaonahuac-Hueyapan, la carretera estatal Hueyapan-Tétéles y la carretera municipal Entronque Km 122.5 de la autopista Virreyes/Teziutlán-Atempan.

2. La segunda parte del recorrido se inició al norte de la ciudad de Teziutlán en la carretera estatal Teziutlán-Aire Libre con sus ramales, que son caminos de tipo municipal y comunican a las localidades de Acateno y Coyotzingo.

Después se prosiguió con la carretera estatal Aire Libre-Hueyapan-Teteles. Posteriormente se recorrió la carretera federal N° 131 Teziutlán-Perote, al sureste de la ciudad de Teziutlán, en la cual se levantaron datos del Kilómetro 0 al 11. En este último se encuentra el límite estatal entre Puebla y Veracruz; esta vialidad comunica a la cabecera municipal de Xiutetelco con la de Teziutlán. Después se transitó por el Libramiento Oriente de la ciudad de Teziutlán que comunica al Km 5 la carretera federal Teziutlán-Perote con el Km 5 de la carretera federal Teziutlán-Nautla.

3. En la última etapa del levantamiento de datos se trabajó del Km 0 al 20 de la carretera federal N° 129 Teziutlán-Nautla al noreste del área en estudio. Al concluir con este tramo se continuó con un ramal de esta misma que comunica a la cabecera municipal de Hueytamalco. Finalmente, el trabajo de campo se concluyó con el recorrido de la autopista Puebla-Teziutlán, a partir del Km 132 al oeste de la ciudad de Teziutlán al Km 111, localizado al sureste de la cabecera municipal de Zaragoza.

La identificación de los PRM a través de PR se realizó con el uso del software *Google Earth*. Este programa permite visualizar cualquier punto de la superficie terrestre por medio de un mosaico de diversas imágenes de satélite, entre las que destacan las de Digital Globe/Geo Eye; éstas ofrecen una resolución espacial de 2.44 m en las imágenes multispectrales y de 60 cm en las pancromáticas.

Mapas temáticos

a) Geología

Mediante uso del software ArcGis 9.3 de ESRI. Se utilizaron como base dos cartas geológicas en formato digital del Servicio Geológico Mexicano (SGM); las hojas Teziutlán E14-B15 (SGM, 2011) y Altotonga E14-B16 (SGM, 2010), ambas a escala 1: 50 000. Dichas cartas fueron georreferenciadas y digitalizadas para posteriormente generar una capa de información en formato vectorial, la cual finalmente se transformó en formato raster (Figura 2).

b) Edafología

El mapa de edafología se realizó de la misma manera que el mapa geológico. Para ello se georreferenció la carta edafológica Veracruz (INEGI, 1984) escala 1:250 000. Se realizó la extracción del área de interés y se digitalizaron las unidades edáficas; se asignaron datos a cada unidad, que incluyen las unidades dominantes y subunidades, por último se convirtió a formato raster (Figura 5a).

c) Uso del suelo

El mapa de uso del suelo se elaboró por medio de una clasificación digital supervisada con base en tres imágenes de satélite SPOT en el software ENVI 4.7. Dichas imágenes fueron tomadas el día 26 de octubre de 2011 y tienen una resolución espacial de 10 m. En las regiones de interés se asignaron cinco unidades o categorías: de color verde las zonas forestales, en amarillo las zonas urbanas, de anaranjado las zonas agrícolas, en verde olivo los pastizales y de color café las zonas de suelo desnudo. La clasificación obtenida se transformó a formato raster para poder ser procesada en el software Arc-Map (Figura 5b).

d) Pendientes

El mapa de pendientes se realizó a partir de las curvas de nivel del conjunto de datos vectoriales correspondientes a las cartas topográficas Teziutlán E14B15 y Altotonga E14B16 escala 1:50 000 provenientes del INEGI. En el software ArcGis 9.3 se elaboró una interpolación basada en los valores de altitud de las curvas de nivel para generar un modelo digital de terreno (MDT). A partir de este modelo se derivó la pendiente, tomando en cuenta las relaciones existentes entre los valores de un pixel y sus ocho vecinos; de esta manera se establecen los valores de pendiente que existen entre valores altimétricos y las configuraciones que describen (Peet y Sahota, 1985; Philipp y Smadja, 1994; Cocquerez y Philipp, 1995). Una vez obtenida la capa de pendientes se asignaron seis rangos a los pixeles con sus respectivos colores (Figura 5c).

e) Densidad de disección

El mapa de densidad de disección se generó usando como base el conjunto de datos vectoriales de la red

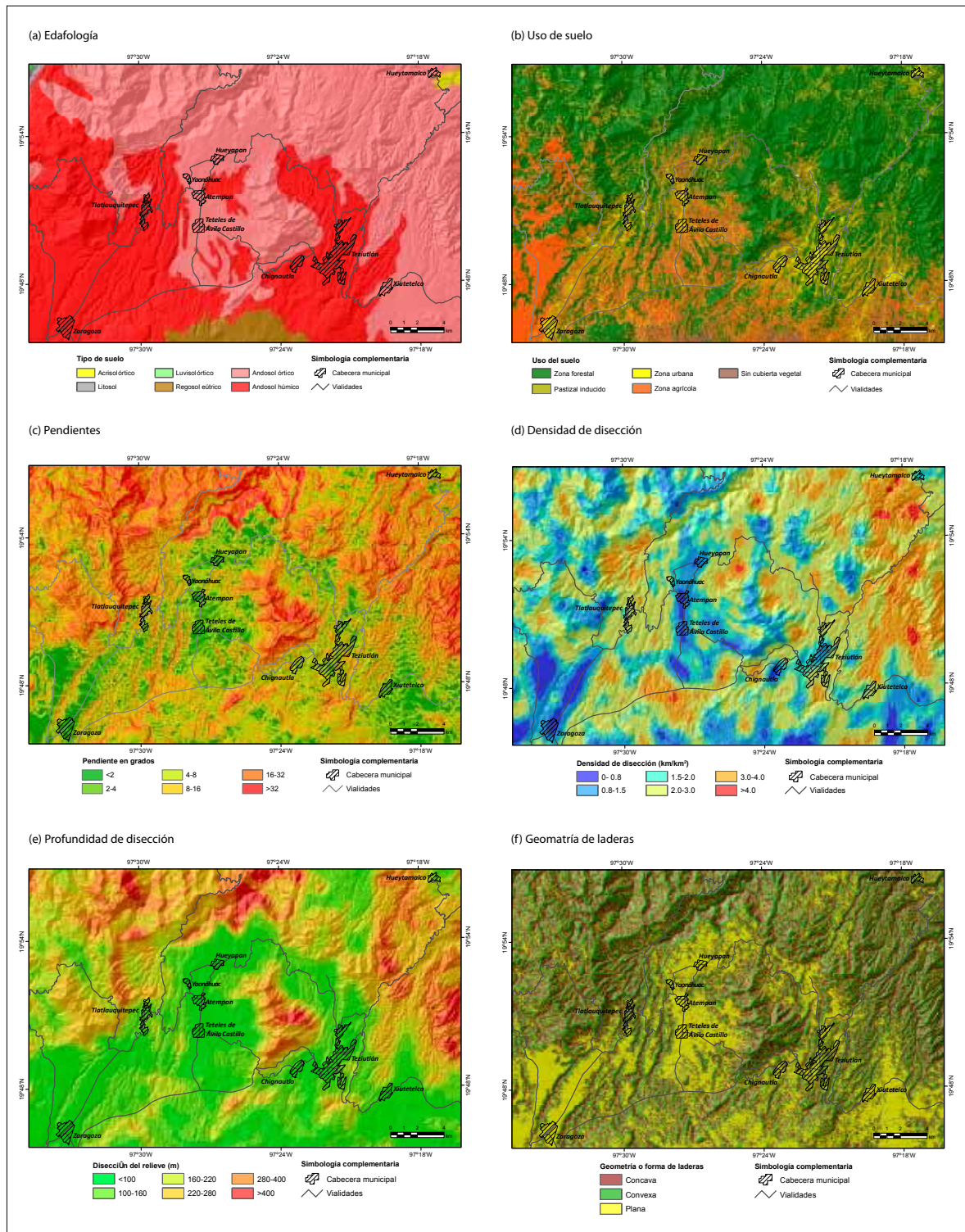


Figura 5. Cartografía temática desarrollada: (a) Edafología; (b) Uso del suelo; (c) Pendientes; (d) Densidad de disección; (e) Profundidad de disección; (f) Geometría de ladera.

hidrográfica escala 1:50 000 de las cuencas de los ríos Nautla y Tecolutla de la Región Hidrográfica 27 (INEGI, 2011). El parámetro de la densidad se obtiene dividiendo la longitud total de las corrientes fluviales (km) de determinada superficie entre el área (km²) de dichas superficies asignadas. Se generó un archivo raster y se asignó a cada pixel un valor de densidad (km/ km²), para finalmente ser agrupados en seis rangos (Figura 5d).

f) Profundidad de disección

Este mapa se generó usando de base las dos cartas topográficas correspondientes a las hojas Teziutlán E14-B15 (INEGI, 2008) y Altotonga E14-B16 (INEGI, 2005), escala 1:50 000. En ambas hojas se delimitó el área en estudio; sobre ésta se trazó una malla con cuadros de 4 x 4 cm, lo que equivale a 4 km² en el mapa, y en cada cuadro se identificaron los valores de la curvas de nivel que se encontraban en talweg y el parteaguas. Con ambos valores se hizo una diferencia y se obtuvo el valor de la disección (m). Una vez obtenidos los valores de profundidad de disección de toda el área de interés, se obtuvo la distribución de los puntos con sus respectivos valores de disección en formato vectorial, y se hizo una interpolación de los puntos para generar una capa raster. Finalmente se reclasificaron los valores de los pixeles en seis categorías (Figura 5e).

g) Geometría de la ladera

El mapa de geometría de la ladera se generó en el software ArcGis usando como base el modelo digital de terreno creado al elaborar el mapa de pendientes; al disminuir los valores altimétricos de los pixeles en relación con sus vecinos, el valor era negativo (pendiente cóncava), al aumentar, el valor era positivo (pendiente convexa) y al mantenerse constantes el valor era 0 (plano). De este modo, todos los pixeles obtienen un valor asociado con la configuración o geometría del terreno. Por último, los pixeles fueron reclasificados de acuerdo con las tres categorías mencionadas anteriormente, se les asignó color para finalmente crear mapa (Figura 5f).

h) Dirección de laderas

La capa de dirección de la ladera se realizó de manera automatizada en el software ArcGis mediante

el modelo digital de terreno; de acuerdo con la disposición y valores altimétricos a cada pixel el software asigna un valor de azimut (0° a 360°) se agrupan en ocho categorías (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW), con esto se genera una capa raster la cual se reclasifica para que los pixeles agrupados en cada categoría tengan un mismo valor.

Análisis multicriterio

Es una herramienta de análisis en la toma de decisiones que ha sido desarrollado y empleado desde la década de los sesenta. Este considera la influencia de diversos parámetros simultáneamente sobre un proceso o fenómeno en forma numérica, tomando en cuenta la opinión de especialistas involucrados en el tema (Díaz, 1998); con esto es posible identificar la importancia de cada uno de los parámetros (Saaty, 1984). En los últimos años, la aplicación de esta herramienta se ha incrementado con el uso de los SIG, principalmente en aspectos de riesgos volcánicos (Aceves, 2007), identificación de áreas para restauración ecológica (Geneletti, 2007), determinar zonas de susceptibilidad a PRM (Komac, 2006; Castellanos y Van Westen, 2008; Yalcin, 2008; Borja y Alcántara, 2009; Flores y Alcántara, 2012), entre otras aplicaciones.

Para llevar a cabo la aplicación del análisis multicriterio, los parámetros empleados fueron derivados de la elaboración o adecuación de ocho capas de información geográfica: tipo de roca, suelos, uso de suelo, pendiente, densidad de disección, profundidad de disección, geometría y orientación de la ladera. Posteriormente, de acuerdo con Saaty (1984), se estableció una escala común de clasificación para cada parámetro o factor (Tabla 4); y se elaboró una matriz de pares (Tabla 5), la cual se basa en una técnica de comparación por pares para desarrollar un conjunto de pesos de cada parámetro mediante una entrevista realizada a seis especialistas en el tema.

Una vez concluidas las entrevistas, se calculó el peso específico. El proceso de asignación de pesos considera que la problemática tiene un valor igual a 1, los valores de peso deben estar entre 0 y 1, la suma total de los valores debe ser 1 (Caloni, 2010). Posteriormente se obtuvo el peso específico de cada factor y se representó en porcentaje.

nados fenómenos a través de medios estadísticos (Bonham, 1994).

La probabilidad incondicional de un evento es determinada por los mismos tipos de eventos que ocurrieron en el pasado durante un periodo de tiempo determinado. Por ejemplo, la probabilidad de que ocurra un proceso de ladera en una unidad de área (o pixel) puede ser estimada con base en la frecuencia con la que los materiales han sido inestables en el pasado; esto puede ser determinado tomando la relación entre el área o el número total de píxeles donde se presentan PRM y el número total de píxeles del área en estudio.

Esta probabilidad puede ser modificada utilizando cualquier fuente de información, de esta manera puede ser actualizada con la adición de nuevas evidencias, de modo que al agregar una nueva prueba las probabilidades del suceso cambian y se genera una probabilidad condicional denominada "probabilidad posterior" (Bonham, 2002).

En la formulación de probabilidades se obtiene un peso de evidencia positivo (W_+) que indica la presencia de los elementos de análisis y un peso negativo, el cual refleja la ausencia de dichos elementos (W_-). Con la diferencia de estos pesos se obtiene un *peso final* para cada unidad o factor analizado de acuerdo con la cantidad de PRM existentes.

Para la aplicación de este método también se utilizaron las ocho capas de información geográfica en formato raster mencionadas en el anterior apartado y el inventario de PRM en formato vectorial.

Las fórmulas empleadas para el cálculo del peso positivo y negativo de cada clase o unidad de cada factor fueron:

$$(W_+) = (W_-) = \log_e \left(\frac{\frac{A_2}{A_1 + A_2}}{\frac{A_4}{A_3 + A_4}} \right)$$

en donde:

A1 es el número de procesos de remoción en masa de cada unidad.

A2 es el número total de deslizamientos menos los deslizamientos que caen en cada clase o unidad.

A3 es el número de píxeles de la clase menos el número de deslizamientos que caen en esa clase o unidad.

A4 es el total de píxeles del área en estudio menos la suma de los píxeles de la clase y el número total de deslizamientos.

Log_e es el logaritmo natural.

El número de PRM de cada clase se obtuvo de forma automatizada con el uso del software ArcGis mediante la sobreposición de las capas de información con el inventario, es decir, que de cada punto (PRM) se extrajo la clase o unidad a la que pertenecía cada capa de información. Otros valores fundamentales para realizar las operaciones fueron el número de píxeles de cada clase o unidad, el número total de PRM (166) y el número total de píxeles de toda el área en estudio. Posteriormente, se realizaron las operaciones para el cálculo del peso final.

Índice de recurrencia de PRM

Con la finalidad de analizar los resultados de los mapas de susceptibilidad generados a partir del análisis multicriterio y los pesos de evidencia, se elaboró un índice de recurrencia de PRM, mismo que se calculó a partir de la fórmula:

$$Ir = \frac{t}{\sum t}$$

en donde:

Ir= Índice de recurrencia.

t= pr/a

pr= Procesos de remoción en masa por rango de susceptibilidad.

a= Área por rango de susceptibilidad (kilómetros cuadrados).

Análisis espacial de susceptibilidad a PRM en la red carretera

Finalmente, a partir de los resultados de la aplicación del análisis multicriterio y peso de evidencia, se efectuó el análisis espacial de la susceptibilidad a PRM de varios tramos carreteros con base en dos de las cinco herramientas analíticas propuestas por Backhoff (2002): el análisis de proximidad (Figura 6a) y el análisis de superposición (Figura 6b).

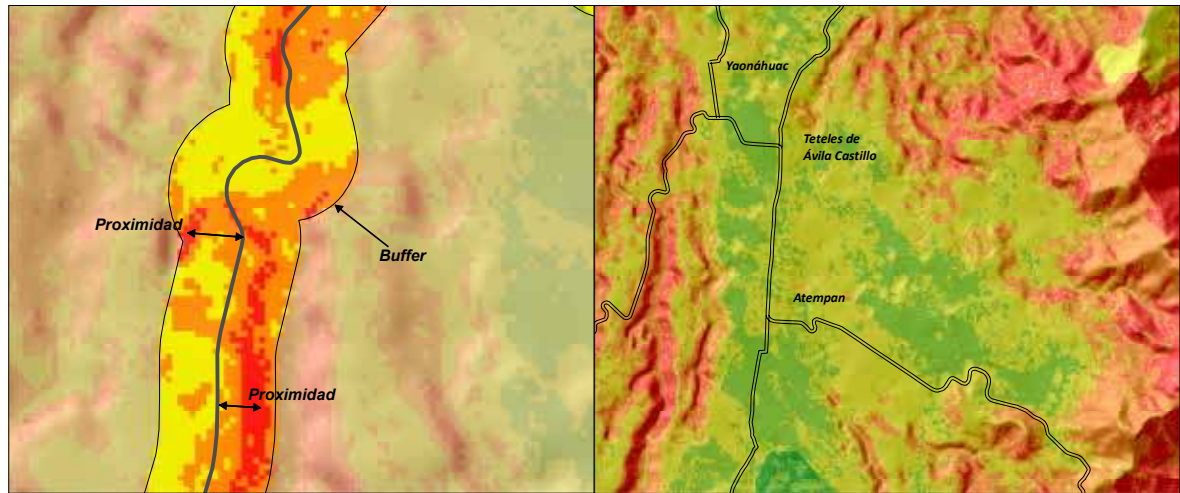


Figura 6. Esquema de análisis espacial de proximidad (a) y sobreposición (b).

RESULTADOS

En el trabajo de campo se obtuvo un total de 94 puntos que corresponden 54 a PRM que se identificaron y 40 a zonas potenciales. Las zonas potenciales se determinaron de acuerdo con los síntomas que presenta una ladera inestable tales como fisuras, inclinación de árboles y desprendimiento de peque-

ños fragmentos de suelo y roca. A través de PR se identificaron 30 PRM y se corroboraron 42 puntos que indican los PRM que ocurrieron en octubre de 1999 y corresponden a una base de datos generada por personal de Protección Civil del Estado de Puebla. El inventario de PRM generado se integró por 166 procesos de remoción en masa y 40 zonas potencialmente inestables (Figura 7).

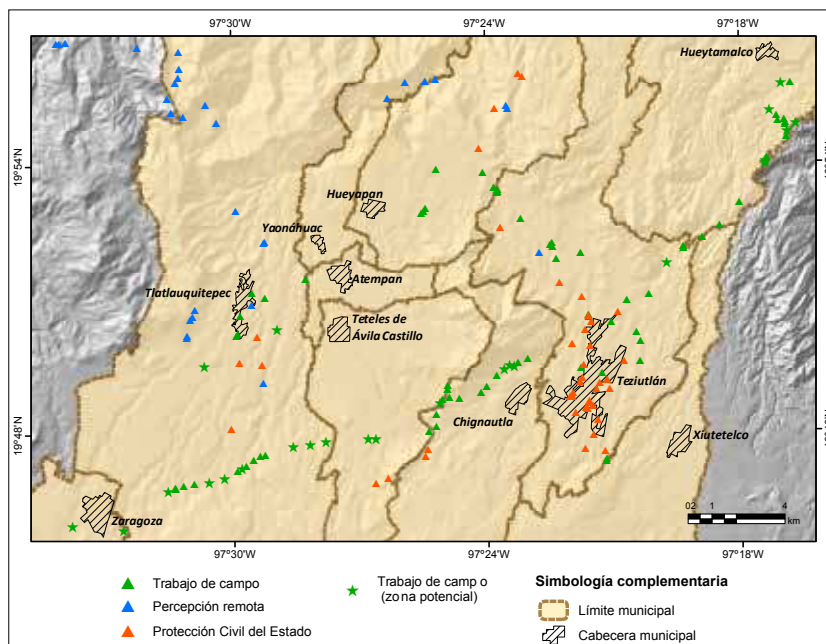


Figura 7. Inventario de PRM de la Sierra Nororiental de Puebla.

De acuerdo con los resultados mostrados en los mapas de susceptibilidad elaborados con base en el análisis multicriterio (Figura 8) y pesos de evidencia (Figura 9) para toda la zona de interés, se observan diferencias y similitudes. Entre las semejanzas destaca que todas las cabeceras

municipales con excepción de Tlatlauquitepec y Teziutlán, se encuentran en una zona con bajo grado de susceptibilidad; los barrancos originados por los escurrimientos que cruzan de sur a norte el municipio de Tlatlauquitepec presentan un alto grado de susceptibilidad, mientras que las laderas

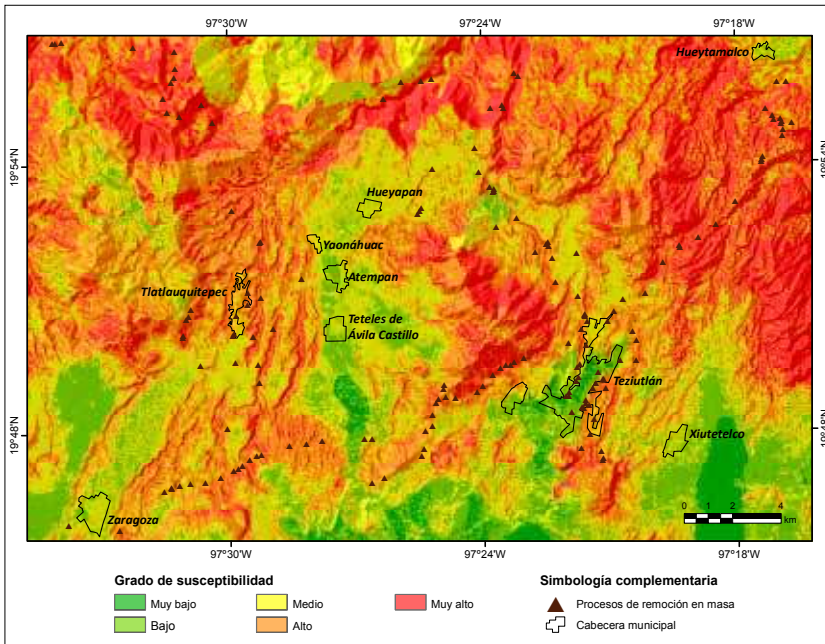


Figura 8. Análisis multicriterio de susceptibilidad a PRM en la Sierra Nororiental de Puebla.

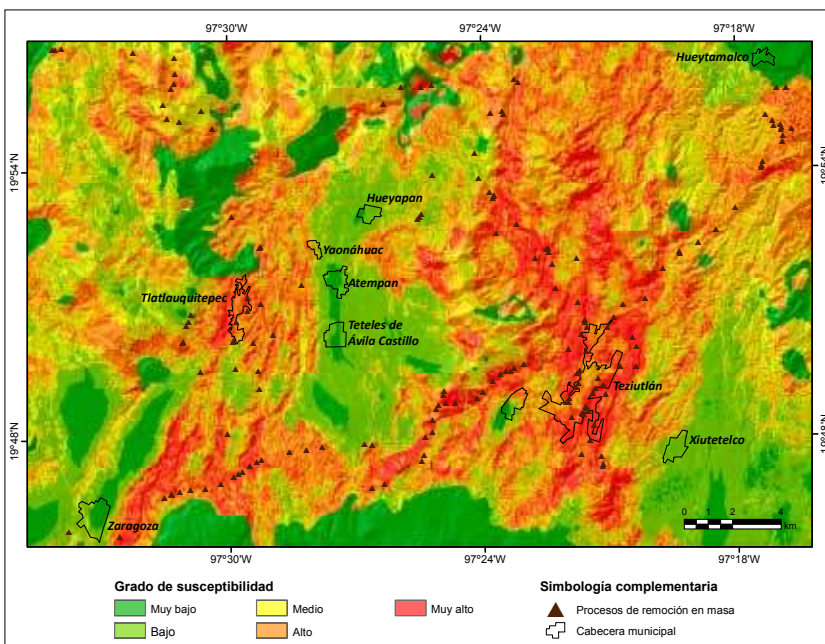


Figura 9. Susceptibilidad a PRM en la Sierra Nororiental de Puebla mediante la aplicación de Pesos de Evidencia.

orientales de la Sierra Chignautla localizada al oeste de la cabecera municipal de Teziutlán presentan alto grado y las planicies que se encuentran al sur del área en estudio se caracterizan por tener un bajo grado de susceptibilidad.

Una de las diferencias más significativas es la cabecera municipal de Teziutlán; el mapa de pesos de evidencia indica que el sector centro tiene grado de susceptibilidad medio y la periferia de la ciudad se encuentra en rango alto. En el mapa derivado del análisis multicriterio, el centro queda como una zona de bajo grado y la periferia en un grado medio; los barrancos son los únicos marcados como altamente susceptibles a inestabilidad.

Otra zona sobresaliente es el área que se ubica al noroeste de la cabecera de Tlatlauquitepec, misma que corresponde a las laderas orientales de una serie de elevaciones orientadas de norte a sur. De acuerdo con el análisis multicriterio, éstas se clasifican como de alto grado y muy alto grado debido en gran medida a las altas pendientes, mientras que en el mapa de pesos de evidencia quedan dentro de la categoría de muy baja susceptibilidad. Esta área marcada como de muy baja susceptibilidad corresponde a tres unidades litológicas (granodiorita-pórfido riolítico, granito y lituta-arenisca), en las cuales

no se tiene registro o evidencia alguna de PRM, por lo que su peso negativo es muy significativo.

De manera general, en ambos mapas se puede apreciar que las áreas de muy alta susceptibilidad corresponden a zonas con un relieve muy accidentado, mientras que las regiones planas coinciden con zonas de muy baja susceptibilidad.

Los resultados del análisis de susceptibilidad a PRM en la red carretera de la Sierra Nororiental de Puebla, mediante el análisis multicriterio (Figura 10) y pesos de evidencia (Figura 11), indican que las zonas con un grado muy alto de susceptibilidad pudieron ser identificadas en toda la región con excepción de dos casos particulares (Figura 12). El primero de ellos es el tramo carretero que corresponde a la parte central de la ciudad de Teziutlán, el cual se identifica como un área con bajo grado de susceptibilidad mediante el análisis multicriterio, en tanto que con el método de pesos de evidencia se le designa un alto grado de susceptibilidad; observaciones de campo, sin embargo, indican un bajo grado de susceptibilidad (Figura 12a y 12b). El segundo caso corresponde al tramo La Unión-Atotocoyan de la carretera Tlatlauquitepec-Mazatepec, localizado al norte del área en estudio. El análisis multicriterio le confiere un alto grado

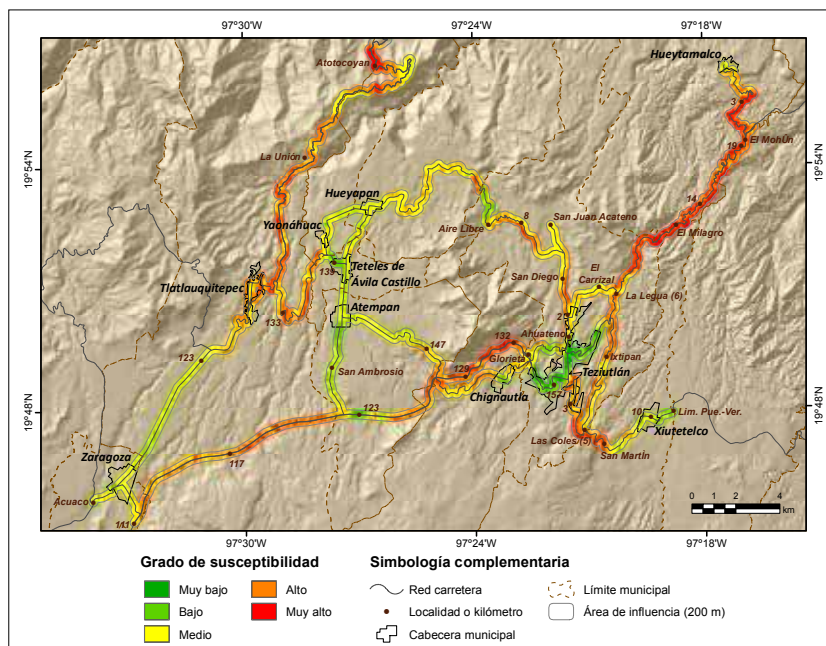


Figura 10. Susceptibilidad a PRM en la red carretera de la Sierra Nororiental de Puebla con base en análisis multicriterio.

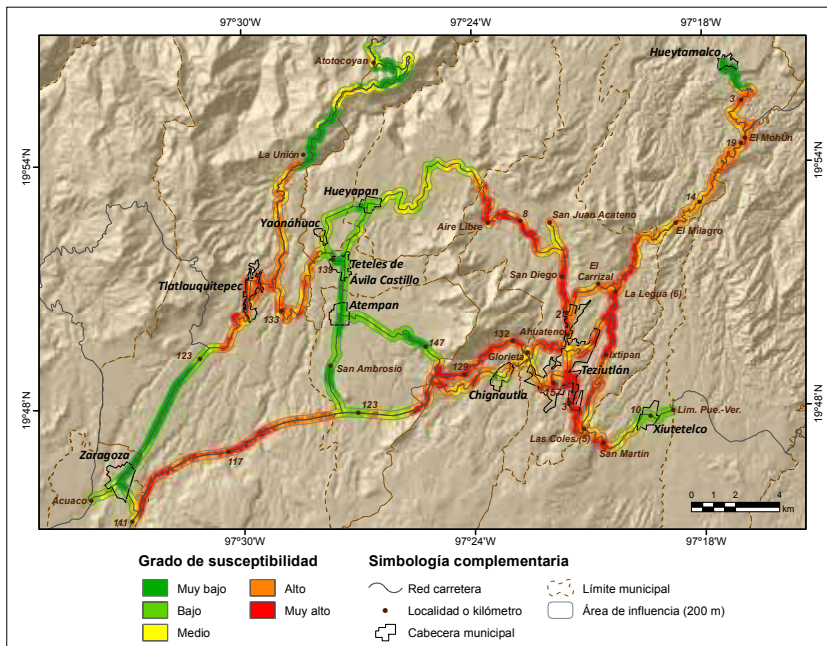


Figura 11. Susceptibilidad a PRM en la red carretera de la Sierra Nororiental de Puebla mediante la aplicación de pesos de evidencia.

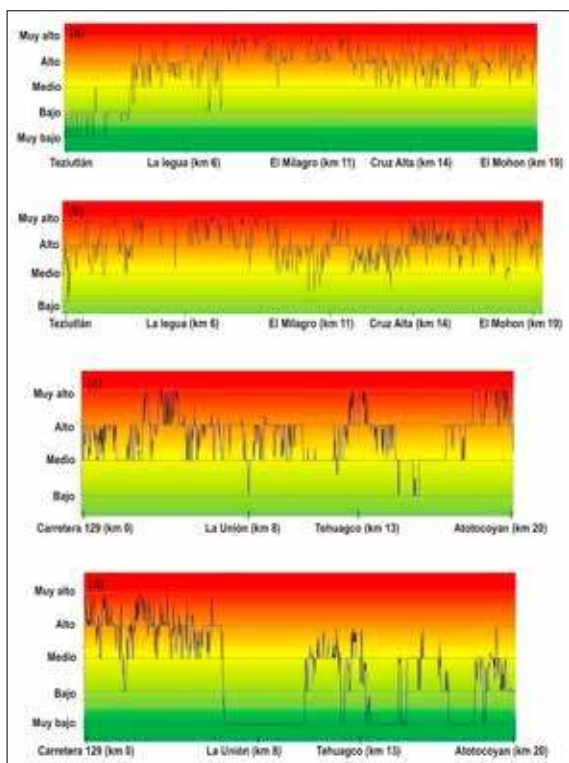


Figura 12. Susceptibilidad a PRM en la autopista Puebla-Teziutlán, tramo Zaragoza-Teziutlán ((a): análisis multicriterio; (b): pesos de evidencia), y carretera federal Amozoc-Teziutlán, tramo Acuaco-Teziutlán ((c): análisis multicriterio; (d): pesos de evidencia).

de susceptibilidad, mientras que el otro método sugiere lo contrario; en campo, la inestabilidad de laderas es evidente (Figura 12c y 12d).

Cabe destacar que con base en ambas metodologías fue posible identificar los tramos carreteros más susceptibles a PRM, éstos son:

1. En la autopista Puebla-Teziutlán el tramo que cruza el municipio de Tlatlauquitepec (del km 112 al 120) y el de Chignautla (del km 126 al 132).
2. En la carretera Teziutlán-Perote la zona denominada las Coles (Figura 13).



Figura 13. Carretera Teziutlán-Perote, km 5, Las Coles.

3. En la carretera Amozoc-Teziutlán los tramos próximos a la ciudad de Tlatlauquitepec.
4. En la carretera Teziutlán-Nautla el tramo comprendido entre La Legua y El Mohón.
5. En el Ramal a Hueytamalco del km 0 al 5 (Figura 14).
6. En la localidad de Aire Libre.
7. En la localidad de Atotocoyan.
8. En las vialidades que se encuentran en la periferia de la ciudad de Teziutlán.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En México, la construcción de infraestructura vial implica de manera evidente la desestabilización de las laderas, de tal forma que a lo largo de estas vías de comunicación, las laderas permanecen potencialmente inestables por dos razones cardinales. La primera de ellas se vincula directamente con el método de construcción empleado, su calidad y conveniencia, en tanto que la segunda, con los umbrales de resistencia de la infraestructura, de los taludes y de las laderas, ante los efectos de la precipitación y la sismicidad. Cabe destacar, sin embargo, que en el área en estudio no se han documentado casos que sugieran un papel significativo de la sismicidad como mecanismo detonante de procesos de remoción en masa.

La infraestructura vial es de vital importancia para el desarrollo socio-económico, en los ámbitos local, regional, nacional e internacional; el flujo de recursos humanos y financieros está fuertemente vinculado a su funcionalidad y funcionamiento. La movilidad de la población, de los bienes y servicios, tanto en condiciones cotidianas, como durante la ocurrencia de desastres depende de su configuración, características y dinámica, por lo que es necesario realizar evaluaciones de susceptibilidad, amenaza y riesgos asociados a la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

Los métodos empleados en este análisis de susceptibilidad a PRM en la red carretera de la Sierra Nororiental de Puebla son una herramienta importante para determinar áreas potencialmente inestables. Sin embargo, de manera natural involucran cierto grado de incertidumbre, ya que repre-



Figura 14. Muro de contención en el km 4 del Ramal a Hueytamalco.

sentan modelos que se aproximan a la realidad y expresan, al mismo tiempo, la necesidad de realizar investigaciones detalladas de sitio que permitan comprender de mejor manera la dinámica natural de las laderas, así como la influencia de elementos y acciones antrópicas en las mismas.

El inventario de PRM se integró por 166 procesos de remoción en masa y 40 zonas potencialmente inestables. De manera general, en los dos mapas producidos se puede apreciar que las áreas de muy alta susceptibilidad corresponden a zonas con un relieve muy accidentado, mientras que las regiones planas coinciden con zonas de muy baja susceptibilidad. No obstante, es importante señalar que existe una variación en los resultados expresados en los mapas de susceptibilidad elaborados a partir de ambas metodologías. Dicha variación implica que la zonificación resultado del análisis multicriterio tiende a producir valores más bajos en la zona urbana, mientras que en el peso de evidencia se le confieren valores menores a zonas montañosas que pueden caracterizarse como potencialmente inestables debido a su naturaleza geológico-geomorfológica, pero que adolecen de registros o evidencias concretas.

Con la intención de analizar los resultados derivados de la aplicación de los métodos estadísticos para generar los mapas de susceptibilidad, fue importante elaborar un índice de recurrencia de PRM. De acuerdo con éste, en el mapa de susceptibilidad a PRM realizado por medio del método de pesos de

evidencia, el 72.28% del total de PRM se presentaron en los rangos de alta y muy alta susceptibilidad, el 24.1% en áreas de susceptibilidad media y el 3.6% en el rango de bajo. Los PRM que se encuentran en el rango catalogado como bajo fueron originados por factores antrópicos, y se encontraron en cortes o excavaciones artificiales de pequeñas dimensiones, las cuales por la escala del mapa y la equidistancia de las curvas de nivel (20 m) no fueron representadas de manera adecuada (Tabla 6).

Los resultados expuestos en la Tabla 7 derivados del mapa de susceptibilidad a PRM realizado por el análisis multicriterio, indican que el 69.27% de los PRM se localizaron en el rango de alto y muy alto, el 23.49% están en zonas de susceptibilidad media y el restante 7.22% se encuentra en zonas bajas y muy bajas. Los PRM que se encuentran en el rango bajo son de pequeña dimensión y resultado de construcciones y cortes para caminos, es decir, no están relacionados con los factores o parámetros considerados directamente en este análisis.

Los resultados del análisis de susceptibilidad a PRM en la red carretera de la Sierra Nororiental de

Puebla, indican que las zonas con un grado muy alto de susceptibilidad pudieron ser identificadas en toda la región con excepción de dos casos particulares. Áreas que requieren por lo tanto mayor atención por su alta susceptibilidad a PRM son: en la autopista Puebla-Teziutlán, el tramo que cruza el municipio de Tlatlauquitepec (del Km 112 al 120) y el de Chignautla (del Km 126 al 132); la zona “Las Coles” de la carretera Teziutlán-Perote; los tramos próximos a la ciudad de Tlatlauquitepec en la carretera Amozoc-Teziutlán; el tramo comprendido entre La Legua y El Mohón en la Carretera Teziutlán-Nautla; el Ramal a Hueytamalco ubicado del Km 0 al 5; las localidades de Aire Libre y Atotocoyan, y las vialidades que se encuentran en la periferia de la ciudad de Teziutlán.

El presente estudio representa un primer paso en el análisis de inestabilidad de laderas desencadenada por precipitación en la infraestructura vial de la Sierra Nororiental de Puebla. Es importante entonces que estudios posteriores de tipo multidisciplinario y en especial con el aporte de la perspectiva de la ingeniería civil consideren la interacción entre el medio físico y la infraestructura vial. Para

Tabla 6. Índice de recurrencia para el método pesos de evidencia

Susceptibilidad	Área km ²	Área (%)	PRM	PRM (%)	Índice de recurrencia
Muy alto	78 914	10.75	10	6.02	0.138
Alto	203 142	27.66	110	66.27	0.589
Medio	1 917 564	26.11	40	24.10	0.227
Bajo	1 429 464	19.47	6	3.61	0.046
Muy Bajo	1 175 404	16.01	0	0.00	0.000
Total	7 342 992	100	166	100	1

Tabla 7. Índice de recurrencia para el método análisis multicriterio

Susceptibilidad	Área km ²	Área (%)	PRM	PRM (%)	Índice de recurrencia
Muy alto	244 764	3.33	49	29.518	0.679
Alto	918 332	12.51	66	39.759	0.244
Medio	2 226 788	30.33	39	23.494	0.059
Bajo	2 507 688	34.15	11	6.627	0.015
Muy Bajo	144 542	19.68	1	0.602	0.002
Total	7 342 992	100	166	100	1

ello, será necesario abordar aspectos tales como la altura del corte, el ángulo del talud, la limpieza de las obras de drenaje, las irregularidades en la carta de corte, el tipo de sección transversal del camino, la funcionalidad de las obras de retención, el tipo de suelo y roca, el nivel de fracturamiento de la roca, orientación y características de las discontinuidades, el nivel de cobertura del corte por la vegetación, el nivel de erosión y la dinámica precipitación-infiltración. Asimismo, sería igualmente conveniente realizar investigaciones específicas para determinar los umbrales de precipitación que puedan detonar la inestabilidad de las laderas a lo largo de los distintos tipos de vialidades.

Dada la natural extensión de la infraestructura vial en zonas montañosas y la frecuente incidencia de procesos de remoción en masa desencadenados por precipitación o sismicidad, la aplicación de metodologías derivadas del uso de la gran variedad de sensores remotos existentes, continuará siendo necesaria y de gran valor. No obstante, es importante no desatender las evaluaciones en campo, ya que éstas son fuente primordial del entendimiento de la dinámica de la inestabilidad de laderas, además de una de las formas esenciales de validación de resultados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT el apoyo financiero otorgado para la realización del Proyecto 156242: "MISTLI: Monitoreo, Instrumentación y Sistematización Temprana de Laderas Inestables", al Instituto de Geografía de la UNAM, por haber concedido su apoyo dentro del programa Becas MacGregor, así como a los dos revisores anónimos, cuyas sugerencias fueron de gran relevancia para la culminación del artículo.

REFERENCIAS

Aceves, F. (2007), *Mapa de riesgo volcánico basados en sistemas de información geográfica: Volcán Nevado de Toluca*, tesis de Doctorado, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.

- Alcántara Ayala, I. (2004), "Hazard assessment of rain-fall induced landsliding in Mexico", *Geomorphology*, no. 61, pp. 19-40.
- Alcántara Ayala, I. y F. G. Murillo García (2008), "Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 66, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 47-64.
- Ángeles Moreno, E. y S. Sánchez Martínez (2002), *Geología, geoquímica y geología estructural de las rocas del basamento del macizo de Teziutlán, estado de Puebla*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Arriola Bernave, H. (2012), "Se reportan deslaves en Tlatlauquitepec y Teziutlán", *Noticias de Teziutlán*, La Pura Verdad, 10 de agosto [<http://noticiasteziutlan.blogspot.mx/2012/08/deslaves-en-teziutlan-por-fuertes.html>].
- Audemard, F. A. y A. Singer (2002), "El alud torrencial de 6 septiembre de 1987 en la cuenca del río El Limón, al norte de Maracay, Venezuela Septentrional", *Desastres Naturales en América Latina*, Fondo de Cultura Económica, pp. 385-408.
- Backhoff P., M. A. (2002), *El Sistema de Información Geoadministrativa para el Transporte. Desarrollo y aplicaciones Multitemáticas*, tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Bitrán, D. (2001), "Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99", *Serie Impacto socioeconómico de los desastres en México*, núm. 1, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- Bonham Carter, G. F. (1994), *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS*, Pergamon Press, Canada.
- Bonham Carter, G. F. (2002), "Geographic information systems for geoscientist: modeling with GIS", in Merriam, D. F. (ed.), *Computer Methods in the Geosciences*, Pergamon/Elsevier, New York, pp. 302-334.
- Borja Baeza, R. C. and I. Alcántara Ayala (2009), "Susceptibility to mass movement processes in the municipality of Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 73, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-21.
- Caloni, N. (2010), "Análisis espacial de evaluación multicriterio en la generación de alternativas viales para el trazado de la autopista Luján-Mercedes", *Geografía y Sistemas de Información. Aspectos conceptuales y aplicaciones*, Universidad Nacional de Luján, Argentina, pp. 487-519.
- Castellanos Abella, E. A and C. J. Van Westen (2008), "Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba", *Geomorphology*, vol. 94, pp. 453-466.
- CENAPRED (2006), *Características e impacto socioeconómico de los huracanes "Stan" y "Wilma" en la República Mexicana en el 2005*, Secretaría de Gobernación, México.

- Ching, J. and L. Hung J. (2006), "Predicting landslides probabilities along mountain road in Taiwan", *International Symposium on New Generation Design Codes for Geotechnical Engineering Practice*, Taipei, Taiwan, pp. 1-11.
- Cocquerez, J. P. and S. Philipp (1995), *Analyse d'images: filtrage et segmentation*, Ed. Masson.
- COTEIGEP (2010), Mapas Regionales, Comité Técnico de Estadística y de Información Geográfica del Estado de Puebla [<http://www.coteigep.pue.gob.mx/>].
- Diario de Teziutlán* (2011), "Lluvias dejan deslaves en carreteras y pista" 8 de septiembre [diariodeteziutlan.blogspot.mx/2011/09/lluvias-dejan-deslaves-en-carreteras-y.html].
- Díaz Salgado, J. (1998), *Evaluación del potencial acuicola costero mediante la aplicación de un sistema de información geográfica: dos estudios caso en Oaxaca y Chiapas*, tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Flores Olvera, P. and I. Alcántara Ayala (2012), "Susceptibility to shallow landslides of soil in the municipality of Temoaya, Mexico: multicriteria analysis", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 77, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 31-47.
- García, M. G. (2003), *Sistema de información para el análisis especial de riesgos en la Red Nacional de Carreteras*, tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Geneletti, D. (2007), "An approach based on spatial multicriteria analysis to map the nature conservation value of agricultural land", *Journal of Environmental Management*, vol. 83, no. 2, pp. 228-235.
- Hansen, A. (1984), "Landslide hazard analysis", in Brunsden, D. and D. Prior D., *Slope instability*, pp. 553-595.
- INAFED (1998), *Enciclopedia de los Municipios de México Puebla*, Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Puebla, México [<http://www.inafed.gob.mx>].
- INEGI (1984), Carta Edafológica Hoja Veracruz E14-3, escala 1:250 000, Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1993a), Teziutlán, Estado de Puebla, Cuaderno estadístico municipal, Secretaría de Gobernación del Estado de Puebla, H. Ayuntamiento de Teziutlán e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1993b), *Síntesis Geográfica del Estado de Puebla*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (2004), *Guía para la Interpretación de Cartografía Edafología*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (2005), Carta Topográfica Hoja Altotonga E14-B16, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (2008), Carta Topográfica Hoja Teziutlán E14-B15, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (2011), Red Hidrográfica, escala 1:50 000, edición 2.0 [<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/hidrologia/Descarga.aspx>].
- IUSS (2007), *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*, Grupo de Trabajo WRB, primera actualización 2007, Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103, International Union of Soil Sciences, FAO, Roma.
- Jaithish, J. (2010), *Landslide occurrences at Maierato, Italy. An engineering geological view*, Universidad de Pensilvania.
- Komac, M. (2006), "A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia", *Geomorphology*, vol. 74, pp. 17-28.
- Lugo, J., J. J. Zamorano, L. Capra, M. Inbar e I. Alcántara Ayala (2005), "Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999, causas y efectos", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Instituto de Geología, vol. 22, no. 2, pp. 212-228.
- Noticias de Puebla* (2010), "Karl provoca dos muertos, 17 derrumbes e inundaciones en Puebla", 17 de septiembre [www.e_consulta.com/index.php?option=com_content&task=view&id=58973&Itemid=285].
- Parise, M. (2000), "Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard", *Phys. Chem. Earth*, vol. 26, no. 9, pp. 697-703.
- Peet, F. G. and T. S. Sahota (1985), "Surface curvature as a measure of image texture", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 734-738.
- Petley, D. (2010), *The mechanism of the Highway 3 landslide in Taiwan*, 26 de abril [www.landslideblog.org].
- Philipp, S. and M. Smadja (1994), "Approximation of granular textures by quadratic surfaces", *Pattern recognition*, pp. 1051-1063.
- Rodríguez, O. (2010), "Decretan alerta roja en Teziutlán por paso del huracán Karl", *Noticias de Puebla* [<http://www.e-consulta.com>].
- Saaty, T. L. (1984), *Décider face à la complexité*, Ed. Entreprise Moderne d'Édition, Paris.
- SCT (1996), *Criterio para jerarquizar la conservación de carreteras con base a su importancia económica*, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, Secretaría de Comunicaciones y Transporte, México.
- SGM (2010), Carta Geológico Minera Teziutlán E14-B16.
- SGM (2011), Carta Geológico Minera Teziutlán E14-B15.
- Yalcin, A. (2008), "GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations", *Catena*, no. 72, pp. 1-12.
- Zevallos Moreno, O. (1994), *Lecciones del deslizamiento "La Josefina"*, Ecuador, Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres Colombia.