

Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México

Recibido: 30 de enero de 2015. Aceptado en versión final: 18 de abril de 2016.
Publicado en línea (pre-print): 2 de junio de 2016.

José Fernando Aceves Quesada*
Gabriel Legorreta Paulín*
José Lugo Hubp**
Juan Umaña Romero***
Héctor Alfredo Legorreta Cuevas***

Resumen. Con el propósito de fortalecer el conocimiento y la prevención de los desastres por deslizamientos en este trabajo se desarrolla una metodología que integra la cartografía geomorfológica con la elaboración de mapas de susceptibilidad a deslizamientos usando los sistemas de información geográfica (SIG) y el método de regresión logística múltiple (RLM). En México se han realizado algunos trabajos aislados con los SIG para evaluar la estabilidad de laderas. Sin embargo, hasta ahora no se ha desarrollado ningún método práctico y estandarizado que integre los mapas geomorfológicos con los inventarios de deslizamientos utilizando los SIG. Este artículo muestra el análisis llevado a cabo para elaborar un inventario de deslizamientos multitemporal junto con la técnica de análisis y cartografía morfométrica de la cuenca del río El Estado. La cuenca del río El Estado, seleccionada como área de estudio, se localiza en la ladera sudoeste del volcán Citlaltepetl o Pico de Orizaba. Los

factores geológicos y geomorfológicos en combinación con la alta precipitación estacional, el alto grado de intemperismo y las laderas escarpadas predisponen sus superficies a deslizamientos. Para evaluar la susceptibilidad por deslizamientos de tierras se elaboró un mapa de inventario de deslizamientos usando fotografías aéreas, a continuación se elaboró la cartografía geomorfométrica (altimétrico, pendientes y geomorfográfico) y se realizó trabajo de campo. Con esta información se modeló la susceptibilidad por deslizamientos usando regresión logística múltiple (RLM) dentro de la plataforma de un SIG y se obtuvo el mapa de susceptibilidad por deslizamientos.

Palabras clave. SIG, cartografía geomorfológica, mapa de inventario de deslizamientos, mapa de susceptibilidad de deslizamientos, regresión múltiple logística, Volcán Pico de Orizaba.

* Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México. E-mail: acevesquesada.fernando@gmail.com, legorretag@hotmail.com

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Ciudad de México. E-mail: lugoh@igg.unam.mx

*** Laboratorio de Mecánica de suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México. E-mail: jlur67@hotmail.com, hectora@servidor.unam.mx

Cómo citar:

Aceves, Q., J. F., G. Legorreta P., J. Lugo H., J. Umaña R. y H. A. Legorreta C. (2016), "Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México", *Investigaciones Geográficas*, núm. 91, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 43-55, dx.doi.org/10.14350/ig.46503.

Geographic Information Systems and geomorphological mapping applied to landslide inventory and susceptibility mapping in El Estado river, Pico de Orizaba, Mexico

Abstract. With the aim of raising awareness on the prevention of landslide disasters, this work develops a methodology that incorporates geomorphological mapping into the mapping of landslide susceptibility using Geographic Information Systems (GIS) and Multiple Logistic Regression (MLR). In Mexico, some studies have evaluated the stability of hillsides using GIS. However, these studies set a general framework and guidance (that includes basic concepts and explanations of landslide classification, triggering mechanisms, criteria, considerations, and analysis for landslide hazard reconnaissance, etc.) for preparing a landslide atlas at state and city levels. So far, these have not developed a practical and standardized approach incorporating geomorphological maps into the landslide inventory using GIS. This paper describes the analysis conducted to develop an analytical technique and morphometric analysis for a multi-temporal landslide inventory. Three data management levels are used to create GIS thematic layers. For the first level, analogue topographic, geological, land-use, and climate paper are converted to raster format, georeferenced, and incorporated as GIS thematic layers. For the second level, five layers are derived from topographic elevation data: slope angles, slope curvature, contributing area, flow direction, and saturation. For the third level, thematic maps are derived from the previous two levels of data: a hypsometric map (heuristically classified to highlight altimetric levels), a reclassified slope map (allowing to highlight differences in relief), and a morphographic map (derived from a heuristic reclassification of the slope map to highlight volcanic landforms). The theoretical aspects of geomorphological mapping contribute to set the conceptual basis to support landslide mapping. The GIS thematic layers provide context and establish an overall characterization of landslide processes within the watershed. Through the retrieval and on-off switching of layers in the GIS system, a base map is created to assist in the digitizing of landslides and the modeling of susceptibility. A landslide inventory is created from aerial photographs, field investigations, and all the above GIS thematic layers. El Estado river watershed on the southwestern flank of Pico de Orizaba volcano has been selected as study area. The watershed is located in the southwestern slope of Citlaltepetl or Pico de Orizaba volcano. Geological (the stream channel of El Estado river erodes Tertiary and Quaternary lavas, disjointed volcanoclastic materials such as pyroclastic flows, fall deposits, lahars deposits, and

alluvium) and geomorphological factors (steep slopes, energy relief, and vertical erosion) in combination with high seasonal rainfall (annual rainfall averages 1000-1100 mm/yr at > 4000 m a.s.l. and 927 mm/yr at <1500 m a.s.l.), and the high degree of weathering, make the study area susceptible to landslides. To assess landslide susceptibility, a landslide inventory map and geomorphometric cartography (altimetry, slope and geomorphography) were reviewed, and field work was conducted. In the study area, more than one hundred landslides were mapped. Shallow landslides (including debris slides and debris flows) are the predominant type. Shallow landslides predominate on hills capped with ash and pyroclastic deposits. The second major landslide process includes rock falls (which occur where the stream erodes lava flows and lahars) and deep-seated landslides (which occur in ash and pyroclastic deposits where lava flows act as a slip plane). In parallel, the spatial geodatabase of landslides was constructed from standardized GIS datasets. Pertinent attributes are recorded on a geo-dataset. These include 1) mass wasting process, 2) level of certainty of the observation, 3) photo identification date, 4) landslide size, 5) landslide activity, 6) landslide parts (head, evacuation zone, deposit), 7) slope shape, 8) field slope gradient, 9) map gradient measured from the 10 m digital elevation model (DEM), 10) landslide delivery, 11) land use, 12) elevation at which the landslide started, 13) aerial photograph identification number, 14) landslide area, and 15) researcher comments. Each attribute is standardized by the geo-dataset domains in the GIS system. With this information the landslide susceptibility is modeled using MLR within a GIS platform. MLR is used to examine the relation between land sliding and several independent variables (elevation, slope, contributing area, land use, geology, and terrain curvature) to create the susceptibility map. With six independent variables, the multiple logistic model susceptibility map tends to overpredict landslides at a 10 m pixel resolution. However, the model is statistically valid and able to predict 79.81% of the existing landslides. The implementation of a landslide inventory and susceptibility mapping techniques demonstrate the feasibility of the method for use in other volcanic areas of Mexico.

Keywords: GIS, Geomorphologic Maps, Landslide Inventory Map, Landslide Susceptibility Map, Multiple Logistics Regression, Pico de Orizaba Volcano.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este trabajo es evaluar los deslizamientos y proporcionar métodos estandarizados que permitan elaborar inventarios de deslizamientos y mapas de susceptibilidad a deslizamientos que apoyen a las autoridades gubernamentales para la mitigación del riesgo y planificación del territorio en México.

La cuenca del río El Estado, que fluye sobre el flanco del sudoeste del volcán de Pico de Orizaba y que a su vez forma parte de la cuenca del río Chiquito, fue seleccionada como área de estudio.

En las regiones volcánicas del centro de México los estratovolcanes, por sus características geomórficas, tienen un gran potencial para generar deslizamientos y flujos de escombros en sus laderas debido a su elevado relieve, acumulación de voluminosos depósitos de flujos piroclásticos, laderas escarpadas, debilitamiento progresivo del edificio volcánico por la alteración hidrotermal y otras características geográficas (Legorreta *et al.*, 2013). La actividad volcánica con frecuencia genera deslizamientos voluminosos a lo largo de los sistemas de drenaje asociados al colapso de un sector del flanco del volcán (Siebe *et al.*, 1992; Siebe *et al.*, 1993; Capra *et al.*, 2002). Este tipo de deslizamientos de tierras produce volúmenes mayores a los cien mil metros cúbicos (Capra *et al.*, 2002, Korup *et al.*, 2004). Sin embargo, estos eventos volcánicos catastróficos son poco frecuentes, generalmente separados por periodos de tiempo muy amplios, desde varios cientos de años hasta algunos milenios (Capra *et al.*, 2002). Cabe indicar que, durante los períodos de reposo, los deslizamientos pequeños y los flujos de escombros ocurren continuamente a lo largo de los sistemas de drenaje de los ríos en los grandes estratovolcanes. Este tipo de deslizamientos puede generar volúmenes entre los cien y los mil metros cúbicos (Montgomery y Dietrich, 1994) los cuales crean una situación potencialmente riesgosa para los habitantes de las localidades aledañas y sus bienes. Por ello su representación cartográfica y estudio son importantes para la evaluación del daño potencial en asentamientos humanos, áreas industriales, zonas agrícolas, ganaderas y silvicultura.

En México, las regiones volcánicas con estratovolcanes y campos monogenéticos son muy comunes; por sus características pueden provocar deslizamientos y flujos de escombros, desencadenados por el colapso de laderas, terremotos y precipitaciones intensas. Tal es el caso del volcán Citlaltépetl o Pico de Orizaba, la montaña más alta en México (5 675 msnm), que tiene un gran potencial para generar deslizamientos y flujos de escombros debido a las fuertes declives de sus pendientes, lluvias torrenciales, material mal consolidado y fragmentado que constituyen sus laderas, así como la actividad humana, principalmente desforestación y agricultura. Lo anterior crea una situación peligrosa para más de 500 000 personas que viven dentro de un radio de 27 kilómetros alrededor del volcán. Un evento de este tipo, ocurrido el 6 de junio de 2003 en el río Chiquitolo, causó la pérdida de vidas y daños graves a propiedades e infraestructura debido a la confluencia de deslizamientos río arriba que alimentaron a un gran flujo de escombros que afectó a la población de Balasterra. Este flujo de escombros no sólo produjo una inundación sino que también causó la ruptura y la explosión de ductos pertenecientes a Petróleos Mexicanos (PEMEX), que estaban ubicados aproximadamente a 300 m del poblado. A pesar de la importancia de tales procesos hay pocos mapas de inventarios de deslizamientos y caídas de rocas. A la fecha no existe ningún método práctico y estandarizado que señale cómo trazar un mapa y que integre la información dentro de un SIG. Se han hecho pocos estudios que sirvan para modelar y ubicar la distribución espacial de los deslizamientos con el uso de modelos de susceptibilidad para deslizamientos de tierras (Legorreta *et al.*, 2013).

Una herramienta valiosa que se complementa con el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es el levantamiento geomorfológico que proporciona una información precisa y concreta de los procesos geomorfológicos, de las formas resultantes y los fenómenos naturales asociados, como es el caso de los deslizamientos. A partir del análisis de la cartografía topográfica y geológica, de fotografías aéreas y modelos de elevación digital del terreno, se determinan las áreas susceptibles a peligros por procesos gravitacionales. La cartografía

geomorfológica muestra las formas del relieve combinando los factores estructurales, litología, tectónica y meteorización de las rocas para explicar cómo se originaron las formas del relieve y su secuencia cronológica (Peña-Monné, 1997; Palacios y Marcos, 1996). Para este estudio se elaboraron tres mapas morfométricos que muestran las características físicas del relieve y su geomorfometría. El mapa altimétrico muestra los diferentes niveles altitudinales de la cuenca. Un mapa de pendientes presenta el declive de las laderas de la cuenca y un mapa geomorfológico que exhibe los tipos de formas que hay en el relieve obtenido a partir de la pendiente del terreno.

ANTECEDENTES

Se considera que a nivel mundial los proyectos de susceptibilidad de deslizamiento de tierras y la zonificación del riesgo se han abordado mediante la compilación de inventarios de deslizamientos y su modelación mediante el uso de los SIG (Washington State Department of Natural Resources (DNR), 2006; Hervás y Bobrowsky, 2009; Blahut *et al.*, 2010).

En México las numerosas aplicaciones basadas en SIG se han utilizado para estudiar y evaluar la estabilidad de laderas (Capra y Lugo-Hubp 2006; Pérez-Gutiérrez 2007; Secretaría de Protección Civil, 2010). Los estudios incluyen conceptos básicos y explicaciones de la clasificación de deslizamientos, mecanismos que los desencadenan, criterios, consideraciones y los análisis para el reconocimiento de los riesgos.

En lo concerniente a la cartografía geomorfológica en México ya se han realizados varios trabajos siguiendo las recomendaciones propuestas por el Instituto Técnico y Científico de los Países Bajos (Veesrappen y Van Zuidam, 1991), basados en el levantamiento geomorfológico analítico para delimitar cartográficamente a las unidades del relieve de diferentes tipos, orientado hacia la obtención de los mapas geomorfológicos básicos y monotemáticos. Entre los principales están los geomorfométricos, de pendientes, hipsométricos, morfogenéticos, morfodinámicos, como los realizados en la Cuenca

de México (Tapia-Varela y López Blanco, 2002), en el Volcán Jocotitlán (Salinas, 2005) y en el Volcán Nevado de Toluca (Aceves *et al.*, 2014, Aceves *et al.*, 2015).

En lo concerniente a mapas de peligros y riesgos, la Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz elaboró el Atlas de riesgos geológicos e hidrometeorológicos en dicha entidad en 2010, con la colaboración de otras dependencias de los gobiernos federal y estatal. La mayor parte de las investigaciones inherentes al volcán Pico de Orizaba se han centrado en la historia volcánica para tratar de establecer la morfología presente del paisaje y el riesgo potencial por eventos volcánicos así como el colapso de sus flancos (Siebe *et al.*, 1992; Carrasco-Núñez *et al.*, 1993; Carrasco-Núñez y Rose, 1995; De la Cruz-Reyna y Carrasco-Núñez, 2002; Macías 2005). También se han elaborado mapas de riesgo por flujos de lahares a lo largo de los sistemas de drenaje fluvial del volcán basados en estudios geológicos anteriores y simulaciones en computadora con SIG y percepción remota (Sheridan *et al.*, 2001; Hubbard *et al.*, 2007). Aunque ya se han efectuado estos tipos de investigaciones, aún no existe ningún tipo de cartografía específica de deslizamientos que sea práctico y estandarizado y que, con base en el uso de los SIG, identifique y describa pequeños deslizamientos en zonas volcánicas como los que ocurren continuamente a lo largo de las cuencas fluviales ubicadas en las laderas del Pico de Orizaba. Basados en la experiencia de proyectos realizados con anterioridad en otras regiones donde se ha evaluado la susceptibilidad a deslizamientos y zonificación del riesgo (Angeli *et al.*, 2000; Ministerio de Asuntos Exteriores de Washington de Recursos Naturales (DNR), División de Prácticas Forestal 2006; Galli *et al.*, 2007; Weirich y Blesius, 2007; Hervás y Bobrowsky, 2009; Blahut *et al.*, 2010). En este estudio se integró la cartografía geomorfológica con la elaboración de mapas de susceptibilidad a deslizamientos usando el método de regresión logística múltiple (RLM). La RLM fue seleccionada porque su evaluación bajo condiciones naturales ha mostrado ser muy acertada para la identificación de laderas donde se han observado deslizamientos, probando ser adecuada si se muestrea estratégicamente y con un tamaño de muestra apropiado y

si las variables seleccionadas están fuertemente relacionadas con los deslizamientos (Ohlmacher y Davis 2003; Can *et al.*, 2005).

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río El Estado se seleccionó como el espacio para desarrollar un inventario y la susceptibilidad de deslizamientos. La cuenca se localiza en el flanco suroeste del volcán de Pico de Orizaba (Citlatepetl) y presenta continuos deslizamientos de tierra y flujos de escombros. El área de estudio cubre un área 5.2 km² y abarca pequeñas porciones de los estados de Puebla y Veracruz. Se caracteriza por ser un terreno montañoso y escarpado con elevaciones de 4 248 a 2 677 msnm y pendientes de 56° en la parte montañosa y 6° valles interiores con llanuras relativamente llanas. El río El Estado es un afluente de río Chiquito-Barranca del Muerto, el cual descarga en el río Blanco, que desemboca en el Golfo de México (Figura 1).

Los procesos geomorfológicos observados en la cuenca El Estado están condicionados por los diversos tipos de afloramientos litológicos, destacando las lavas y los flujos piroclásticos erosionados por la corriente fluvial.

En el cauce principal se observan deslizamientos profundos activos e inactivos, desarrollados

en depósitos de ceniza y flujos piroclásticos, así como deslizamientos de escombros, flujos de escombros y deslizamientos de tierras, mientras que las caídas de rocas ocurren en las laderas formadas por flujos de lava y depósitos de lahar.

MÉTODO

El proceso de investigación se efectuó a tres niveles principales de análisis para evaluar la susceptibilidad de deslizamiento de tierras. En el nivel I se realizó una revisión bibliográfica y se elaboró la cartografía geomorfológica mediante el procesamiento del mapa digital con curvas de nivel cada 10 m, así como con la interpretación de fotos aéreas a escala 1:10 000 y 1:20 000, complementado con el trabajo de campo. Se elaboró un modelo de elevación digital del terreno obtenido a partir de mapa topográfico digital del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI) con resolución de pixel de 10 m. Con esta base cartográfica se elaboraron tres mapas. El hipsométrico (Figura 2) se clasificó heurísticamente para resaltar las diferencias de altitud que muestra la cuenca e identificar los principales rasgos del relieve. El mapa de pendientes (Figura 3) se obtuvo por medio de operaciones algebraicas y trigonométricas relacionadas con las curvas de nivel. El mapa

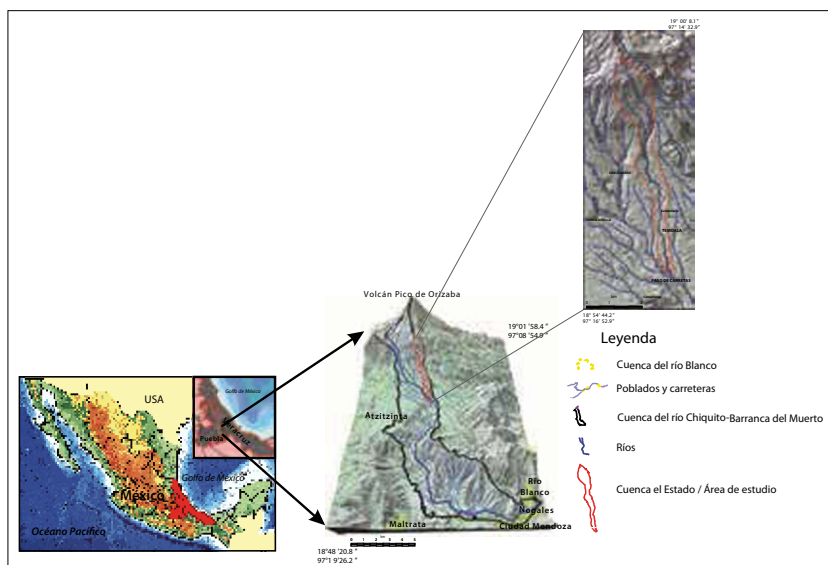


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.

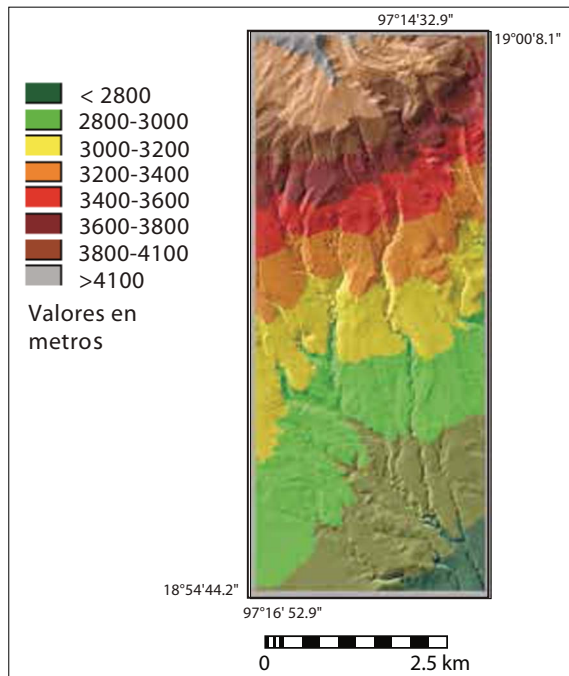


Figura 2. Mapa altimétrico.

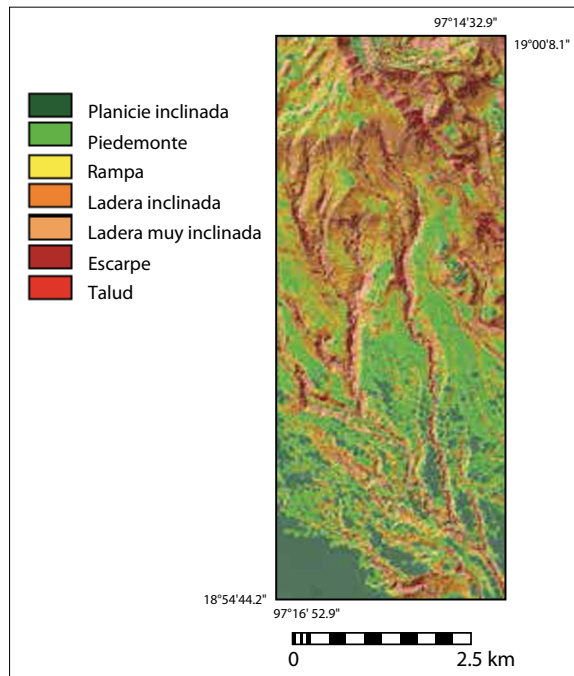


Figura 3. Mapa de pendientes.

se reclassificó heurísticamente para obtener los grados de inclinación que presenta el terreno en diversos lugares de la cuenca. El tercer mapa es el morfográfico (Figura 4) se elaboró reclassificando el mapa de pendientes; en él se pueden identificar las formas del relieve con base en los declives de las formas del terreno (Pedraza- Gilzans, 1996; Van Zuidam, 1986). Un aspecto importante de este primer nivel del método empleado es la generación de información condensada y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos y los fenómenos ambientales asociados, todo ello reforzado y verificado con el trabajo de campo. Lo precedente permite generar una información que, integrada con los SIG, es de utilidad para la elaboración del mapa de peligro con bastante precisión.

En el nivel II se elaboró un inventario histórico de deslizamiento de tierras. En el área de estudio se identificaron más de 100 deslizamientos de tierras con base en el análisis multitemporal, ortofotos aéreas y trabajo en campo para identificar y describir la distribución espacial de los deslizamientos de tierras. Los deslizamientos (de tierras) fueron

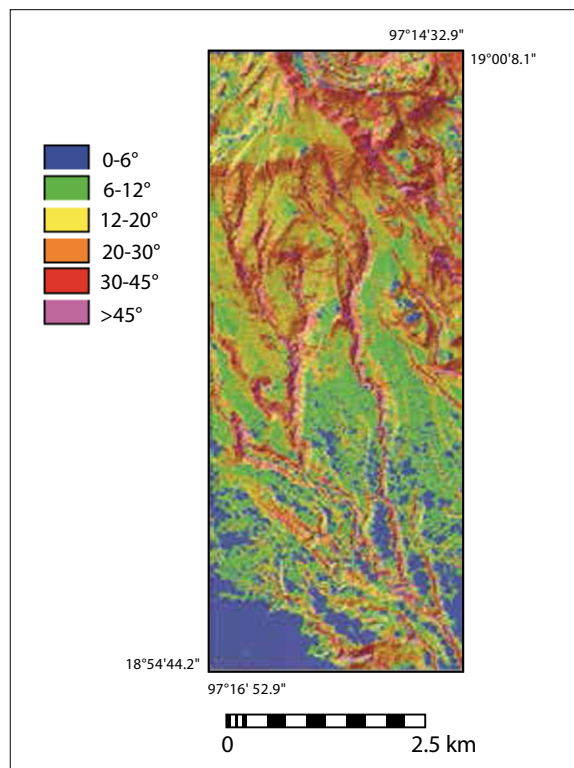


Figura 4. Mapa geomorfológico.

digitalizados en el SIG y se elaboró una base de datos digital de dichos movimientos.

Para el inventario histórico de deslizamientos la información previa fue recopilada para proporcionar el contexto y establecer una caracterización generalizada de procesos de gasto de masas dentro de la línea divisoria de aguas de la cuenca del río El Estado. La información incluyó geología, relieve, uso de la tierra, clima e hidrología, así como mapas de deslizamiento de tierras preexistentes e informes de campo. La información fue georeferenciada y se incorporó en el SIG ArcMap.

En el nivel III se calculó la susceptibilidad para la cuenca y así generar el conocimiento para establecer las zonas donde existen las condiciones necesarias para que sucedan los procesos de deslizamientos.

A partir de la información recabada en el inventario histórico de deslizamientos se obtuvieron las ocho variables independientes usadas para el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos.

La base topográfica se obtuvo de los datos de elevación digital generados y proporcionados por el INEGI (resolución 10 m) y obtenidos a partir de los mapas topográficos (E14B46, E14B55, E14B56) del área a escala 1:50 000. Seis capas de datos fueron obtenidas de dicha información: altitud, pendiente, curvatura de la ladera, área de aporte, dirección de flujo y la saturación. Además, se obtuvieron dos capas digitales a partir de los mapas impresos de geología y uso de suelo del INEGI a escala de 1:250 000, capturados en el SIG y convertidos a un formato digital de 10 m por pixel.

Los datos de deslizamiento de tierras se obtuvieron a partir de dos grupos de ortofotos, complementados y verificados con trabajo de campo para con ello elaborar un mapa de deslizamientos históricos. El conjunto total de ortofotos abarca un período de 14 años; el primer grupo corresponde a 1994, a escala de 1:20 000 y el segundo grupo corresponde al año 2008, a escala de 1:10 000. En el mapa se marcaron 107 sitios identificados como deslizamientos y con esta información se evaluó y describió la distribución espacial de los deslizamientos (Figura 5a).

Por medio de observaciones detalladas y las fotografías aéreas los deslizamientos se clasificaron de acuerdo con el protocolo de zonificación

de deslizamientos del Departamento de Reservas Naturales, Estado de Washington División de Prácticas Forestales (2006), complementado con los criterios propuestos por Cruden y Varnes (1996) y Wieczorek (1984). La clasificación arrojó los siguientes tipos: deslizamientos de tierras someros, flujos de escombros, deslizamientos de escombros, deslizamientos de asentamientos profundos y caídas de bloques. Todos los deslizamientos se digitalizaron en el SIG y se creó una base de datos espacial. Para complementar el trabajo de gabinete se hizo una verificación y reconocimiento de campo que proporcionó una visión precisa de la cuenca, el relieve y los tipos de deslizamiento. La verificación de campo abarcó 37% de sitios con deslizamientos a lo largo del cauce principal, lo que permitió confirmar la validez del método para la evaluación de deslizamientos.

Para el cálculo de susceptibilidad se realizó un análisis multicolineal con las ocho variables independientes (Tabla 1) por medio del factor de la inflación de la varianza (VIF) (Pallant, 2005).

Previo a la aplicación de la regresión logística múltiple (RLM), se calculó la susceptibilidad a deslizamientos y se cartografió utilizando el programa LOGISNET (Legorreta-Paulin y Bursik, 2009) y el paquete estadístico SPSS. Para modelar la RLM en LOGISNET se siguieron tres pasos. En el primero se usaron muestras aleatorias de áreas con deslizamientos y áreas sin deslizamientos para conducir el análisis RLM. Se usó el 40% del área total de todas las cabeceras (0.0169 km²) de los deslizamientos y la misma cantidad de muestras aleatorias en áreas de no deslizamientos (Legorreta *et al.*, 2010).

El segundo paso consistió en exportar la información a los mapas temáticos de las 8 variables independientes a LOGISNET, convirtiendo la imagen digital a un archivo de ASCII para calcular el intercepto y coeficientes β , así como para evaluar el modelo de RLM con el módulo de regresión logística del programa SPSS Statistics (Paulín-Legorreta *et al.*, 2013). La elaboración del mapa de susceptibilidad (Figura 2b) se realizó bajo LOGISNET usando la función de logit. La función logística estima la probabilidad de que pueda ocurrir o no un acontecimiento (como es el caso de un deslizamiento)

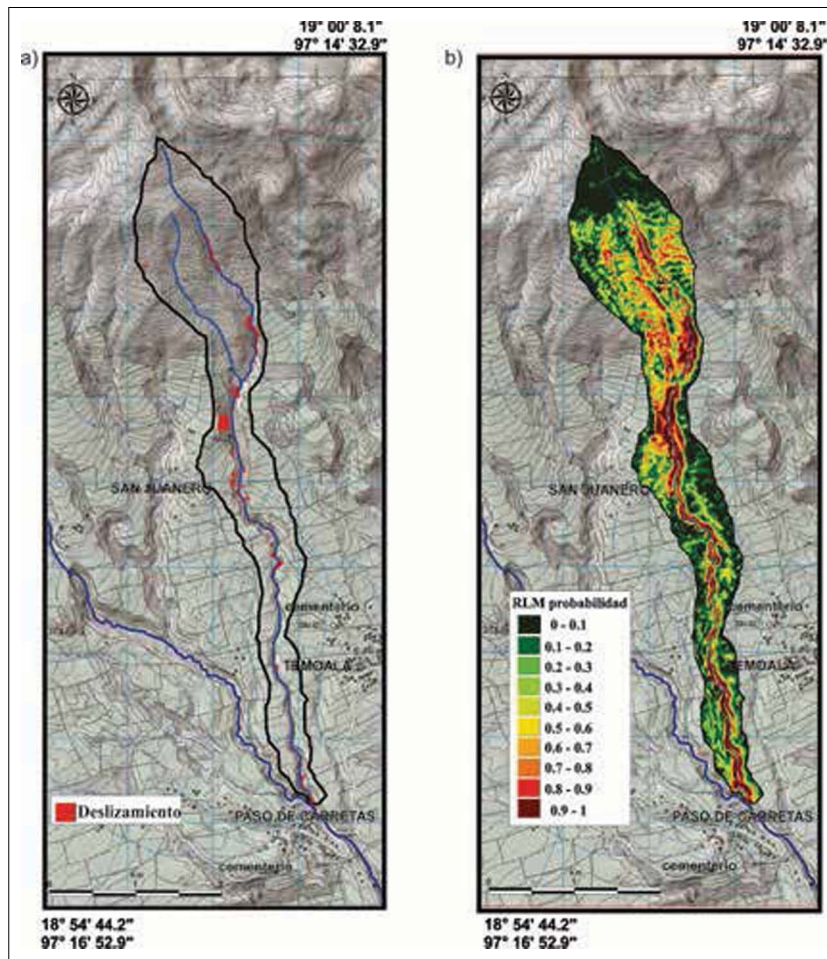


Figura 5. a) Mapa de inventario de deslizamientos, b) MLR modelo de susceptibilidad con diez esquemas de clasificación.

Tabla 1. Variables utilizadas para el mapa.

Variable	Índice	Referencia
Altimetría	No codificado	Datos crudos
Angulo de la pendiente	No codificado	Datos crudos
Curvatura del terreno (relieve)	-1	Relieve cóncavo
	0	Relieve plano
	1	Relieve convexo
Dirección de flujo	No codificado	Datos crudos
Saturación	No codificado	Datos crudos
Área de soporte	No codificado	Datos crudos
Geología	1	Q flujos de lava dacíticos masivos
	2	Q flujos de lava andesíticos en bloques
	3	Q basalto-andesitas (flujos de lava brechados y en bloques)
	4	Q basaltos, lahares y depósitos de caída
Uso de suelo	1	Agricultura de temporal
	2	Pastizal secundario
	3	Bosque de oyamel (<i>Abies religiosa</i>)

(Kleinbaum y Klein, 2002; Dai y Sotavento 2002). La RLM fue calculada pixel por pixel trazado un mapa sobre la base de la función de logit: $1 / 1 + \text{Exp}(-18.469774) * \text{mapa altimétrico} (-0.005463) * \text{mapa de pendientes} (0.143026) * \text{mapa de dirección de flujo} (-0.025160) * \text{mapa de uso de la tierra} (0.326680) * \text{mapa de geología} (0.326680) * \text{mapa de curvatura} (-0.647303)$ (véase Tabla 2).

El último paso consistió en comparar el mapa de susceptibilidad de RLM con el mapa del inventario histórico de deslizamientos y observar las diferencias y coincidencias espaciales. El porcentaje de cobertura entre los dos mapas es la medida de cómo el modelo es capaz de identificar con veracidad las áreas con deslizamientos. Para facilitar la comparación se utilizó un esquema de dos clasificaciones (deslizamiento de tierras y no deslizamiento de tierras). Este esquema fue usado tanto para el mapa de inventario (Figura 5a) como para el mapa de susceptibilidad del modelo de RLM (Figura 5b). Para la RLM se usó un esquema de dos clasificaciones basada en una probabilidad de 0.5

como el punto de ruptura (Dai y Sotavento 2002). Los valores mayores de 0.5 se clasifican como áreas de deslizamiento y valores menores de 0.5 como áreas sin deslizamiento. La evaluación del modelo de RLM contra el inventario de deslizamiento de tierras se realizó en términos de: *a*) exactitud total que es el número total de píxeles correctamente clasificados de deslizamientos y sin deslizamientos divididos entre el número total de píxeles en el área de estudio; *b*) la exactitud del productor, que es la proporción del número de píxeles correctamente clasificados en cada categoría entre el número total de píxeles verdaderos para esa categoría; *c*) la exactitud del usuario determinado por la proporción del número de píxeles correctamente clasificados en cada categoría dividida entre el número total de píxeles que son clasificados por el modelo en esa categoría, y *d*) la eficacia del modelo, la cual se obtiene con la proporción de píxeles correctamente clasificados a lo que se le resta la proporción de píxeles erróneamente clasificados dividido entre el número total de píxeles clasificados de deslizamien-

Tabla 2. Tabla de coeficientes para la obtención de la regresión logística múltiple (Método Backward) para evaluación logit y prueba estadística de RLM, VIF, factor de inflación de la varianza, WSig, grado de importancia en la prueba de Wald y prueba de Hosmer y Lemeshow.

RLM (Método Backward)									
Variable	Coeficiente	S.E.	Wald	df	WSig	Exp(β)	95% C.I. for EXP(β)		Colinealidad estadística
							Inferior	Superior	
Interceptor	18.470	3.035	37.029	1	2.4E-12	0.995			VIF
Altimetría	-5.5E-03	0.001	49.106	1	1.4E-41	1.154	0.993	0.996	7.223
Pendiente	0.143	0.011	182.505	1	3.0E-03	0.975	1.130	1.178	1.318
Dirección de flujo	-0.025	0.008	8.816	1	3.7E-11	0.523	0.959	0.991	1.048
Uso de suelo	-0.647	0.098	43.743	1	1.1E-05	0.640	0.432	0.634	2.874
Geología	-0.447	0.102	19.369	1	1.0E-04	1.386	0.524	0.780	4.535
Curvatura	0.327	0.084	15.047	1	1.2E-09	1.1E+08	1.175	1.635	1.078
Forma Logit	1 / 1 + exp - (18.469774 + mapa de elevación (-0.005463) + mapa de pendientes (0.143026) + mapa de dirección de flujo (-0.025160) + mapa de uso de suelo (0.326680) + mapa geológico (0.326680) + mapa de curvatura (-0.647303))								
				Modelo			Prueba de Hosmer y Lemeshow		
% Índice de clasificación	-2log likelihood	Cox & Snell R Cuadrada	Nagelkerke R cuadrada	Chi-Cuadrada	df	Sig.	Chi-Cuadrada	df	HLSig.
82.185	714.493	0.416	0.555	452.767	6	0.000	18.608	8	0.017

tos verdaderos cartografiados (Van den Eeckhaunt *et al.*, 2005).

RESULTADOS

Durante los trabajos de campo de evaluación de la cuenca del río El Estado, se inventariaron 107 deslizamientos y se identificaron cinco tipos de deslizamientos. Predominan los deslizamientos de escombros y flujos de escombros (40.2% y 28%, respectivamente), seguidos de caídas de rocas (13.1%), deslizamientos superficiales (10.3%) y deslizamientos de asentamientos profundos (8.4%). La superposición de la geología, la geomorfografía y el inventario de deslizamientos muestra que más de las tres cuartas partes de los deslizamientos están en lahares volcánicos y depósitos de caída de las zonas de laderas inclinadas y escarpas (>18°) dentro de los valles. Estas áreas se ven afectadas por la agricultura y la deforestación de subsistencia. Los restantes deslizamientos se encuentran en los piedemontes y rampas (6°-18°) compuestos de lavas andecíticas y dacíticas erosionadas, en donde hay depósitos de flujos, bloques y ceniza cubiertos por depósitos de ceniza de caída.

El análisis geomorfométrico muestra que la cuenca del río El Estado se localiza entre los 2 700 y los 4 000 metros, y que entre los 3 000 y 3 200 metros se han desarrollado barrancos de más de 100 metros de profundidad y con pendientes de 20 a 45°, lo que ha favorecido el desarrollo de deslizamientos tanto superficiales como profundos, mientras que la pendiente predominante en la cuenca es de 6 a 20°. Estas condiciones de pendientes altas y con grandes diferencias de alturas, aunadas a la mala consolidación de los materiales vulcanoclásticos, han permitido el desarrollo y desencadenamiento de los deslizamientos (Figuras 2, 3 y 4).

El factor de inflación de la varianza VIF (Tabla 2) mostró que la altimetría, la pendiente, la curvatura del terreno, la dirección del flujo, la saturación, el área de aporte, la geología y el uso del suelo fueron las variables más importantes para utilizar en el análisis de RLM. Estas ocho variables están estrechamente relacionadas con la probabilidad de

la distribución de la variable dependiente (deslizamiento de tierra o no deslizamiento de tierra), pero no fuertemente relacionadas entre sí.

Después de la evaluación de multicolinealidad se calculó la RLM. El análisis muestra que a partir de las ocho variables originales, sólo la elevación, la pendiente, la dirección del flujo, el uso del suelo, la geología y la curvatura del terreno aportan información importante al modelo. Las pruebas estadísticas muestran que un interceptor y coeficientes β son lo suficientemente confiables para el modelo de RLM (Tabla 2). Las estadísticas muestran que RLM es confiable. La prueba de Hosmer y Lemeshow muestra resultados no significativos (0.017). Por lo tanto, al usar las seis variables el modelo no difiere significativamente de los datos y puede predecir el mundo real bastante bien. La confiabilidad del interceptor y de los coeficientes β se evaluaron con una prueba de Wald y la WSig. Los dos valores de R^2 (0.416 y 0.555) sugieren que solo entre el 41.6% y el 55.5% de los deslizamientos se explican por las seis variables (Cox y Snell y de prueba Nagelkerke R^2) (Tabla 2).

Con la estimación del interceptor y los coeficientes de β para las seis variables, la probabilidad de deslizamiento de tierra se cartografió pixel por pixel en función de la función logit. Finalmente, la comparación entre el mapa de susceptibilidad y el inventario a través de sobreexposiciones en el SIG permiten evaluar el grado de certeza del modelo (Figuras 5a y 5b).

CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra brevemente la aplicación de un método para la cartografía de deslizamientos y su respectiva evaluación de la susceptibilidad en terrenos volcánicos inestables.

El estudio en el río El Estado es un intento por adaptar y producir el prototipo de métodos estandarizados para futuros estudios de deslizamientos en las regiones volcánicas del centro de México. El método propone la normalización y la integración de las capas temáticas y su base de datos geográficos correlacionados con apoyo de análisis digital apoyado en la tecnología informática de los SIG.

Preparar el mapa del inventario de deslizamientos es un gran paso en el modelado de la susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río El Estado.

Mediante la superposición de capas en el SIG se pudo determinar que la abundancia y los tipos de deslizamientos están determinadas por las condiciones geomorfológicas y también guardan relación con el uso del suelo. En la parte alta de la cuenca los flujos de lava andesíticos y dacíticos no se erosionan fácilmente y hay una fuerte infiltración. Por lo tanto, los deslizamientos superficiales son poco frecuentes, pero en contraparte los desprendimientos de rocas son abundantes.

Se utilizó un análisis de regresión logística múltiple para definir la distribución espacial de la susceptibilidad de deslizamientos de tierra en la cuenca a una escala de 1:50 000. El método RLM indica que la elevación, la pendiente, la dirección del flujo, el uso del suelo, la geología y la curvatura del terreno constituyen los factores más importantes para la generación de deslizamientos en el área de estudio. La cantidad de sobreposición entre el mapa de susceptibilidad de deslizamientos y el mapa de inventario proporciona una evaluación de la precisión y la eficiencia del modelo. La sobreposición entre los modelos del inventario y la susceptibilidad muestra que la RLM tiene éxito del 79.81% en la predicción de áreas de deslizamientos.

Los aspectos teóricos de la cartografía geomorfológica contribuyen a desarrollar una base conceptual de apoyo para la cartografía de deslizamientos y el establecimiento de su carácter analítico representa un acercamiento y un esfuerzo tentativo para tratar de establecer cuáles son los aspectos mínimos del relieve que deben considerarse para el estudio y elaboración de mapas de riesgos por deslizamientos. Los mapas morfométricos resaltan las diferencias de altitud de los diferentes tipos de relieve y sus cambios de pendiente, como elementos que favorecen los deslizamientos.

Vale destacar que este artículo es parte del trabajo y del inventario de deslizamientos que se ha venido realizando en esta zona, y del cual ya se ha publicado una primera etapa del trabajo en Legorreta *et al.* (2013). Así mismo se están realizando otros inventarios de deslizamientos en el Nevado de Toluca y en la Sierra de Guadalupe

para comparar y hacer mapas de susceptibilidad con esta metodología propuesta.

La metodología aquí aplicada es un procedimiento alternativo para la construcción de mapas de prevención en áreas con escasa información geológica y geográfica.

Hacemos hincapié en que el estudio está sujeto a modificaciones y mejoras con base en una mejor cartografía topográfica y temática y una validación adicional en otras áreas volcánicas. Se reconoce la limitación técnica del inventario de deslizamientos cuya calidad depende de la disponibilidad de información, las habilidades y la experiencia de los investigadores, facilidad de acceso y la seguridad de los lugares para efectuar el trabajo de campo y la complejidad de las regiones de estudio. A pesar de sus limitaciones, el inventario de deslizamientos de la cuenca del río El Estado tiene el potencial de ser la base de una metodología integrada para manejar y apoyar estudios de pronóstico de inestabilidad de laderas.

El conocimiento de estos aspectos beneficiará a las autoridades estatales y municipales de Puebla y Veracruz para que se tomen las medidas de planificación y precaución necesarias y se pueda mitigar el peligro de deslizamientos.

Las investigaciones futuras consistirán en el modelado de los tipos de deslizamientos individuales, la caracterización de los accidentes geográficos y tipos específicos de deslizamientos, el cálculo de volumen y el modelado de su distribución en las partes bajas de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Programa de Ciencia Básica SEP-CONACYT # 167495 y PAPIIT # IN102115.

REFERENCIAS

Aceves-Quesada, F., G. Legorreta-Paulín e Y. Álvarez-Ruiz (2014), "Gravitational processes in the eastern flank of the Nevado de Toluca México", *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 58, núm. 2, pp. 185-200.

- Aceves-Quesada, F., G. Legorreta-Paulín e Y. Álvarez Ruíz (2014), "Cartografía geomorfológica para el inventario de procesos gravitacionales en la cuenca endorreica del arroyo La Ciénega, flanco oriental del volcán Nevado de Toluca", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 62, núm. 2, pp. 329-342.
- Angeli, M. G., A. Pasuto y S. Silvano (2000), "A critical review of landslide monitoring experiences", *Engineering Geology*, núm. 55, pp. 133-147.
- Blahut, J., C. J. Van Westen y S. Sterlacchini (2010), "Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas", *Geomorphology*, vol. 119, núms. 1-2, pp. 36-51.
- Can, T., H. A. Nefeslioglu, C. Gokceoglu, H. Sonmez y T. Y. Duman (2005), "Susceptibility assessments of shallow earth flows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses", *Geomorphology*, núm. 72, pp. 250-271.
- Capra, L. y J. Lugo-Hubp (2006), "Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: Relación entre litología y tipo de movimiento", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 20 núm. 2, pp. 95-106.
- Capra, L., J. L. Macías, K. M. Scott, M. Abrams y V. H. Garduño-Monroy (2002), "Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, México. Behavior and implication for hazard assessment", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 113, núms. 1-2, pp. 81-110.
- Carrasco-Núñez, G. y W. I. Rose (1995) "Eruption of a major Holocene pyroclastic flow at Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba). México 8.5-9.0 ka", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 69, núms. 3-4, pp. 197-215.
- Carrasco-Núñez, G., J. W. Vallance y W. I. Rose (1993), "A voluminous avalanche-induced lahar from Citlaltépetl volcano, Mexico: Implications for hazard assessment", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 59, núms. 1-2, pp. 35-46.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2001), *Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria*, Instituto de Geofísica, UNAM, México, 157 pp.
- Cruden, D. M. y D. Varnes (1996), "Landslide types and processes." en A. K. Turner y R. L. Shuster (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transp. Res. Board, Spec. Rep., núm. 247, pp. 36-75.
- Dai, F. C., C. F. Lee e Y. Y. Ngai (2002), "Landslide risk assessment and management: an overview", *Engineering Geology*, núm. 64, pp. 65-87.
- De la Cruz-Reyna, S. y G. Carrasco-Núñez (2002), "Probabilistic hazard analysis of Citlaltépetl (Pico de Orizaba) Volcano, eastern Mexican Volcanic Belt", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, núm. 113, pp. 307-318.
- Galli, M., F. Ardizzone, M. Cardinali, F. Guzzetti y P. Reichenbach (2007), "Comparing landslide inventory maps", *Geomorphology*, núm. 94, pp. 268-289.
- Hervás J. y P. Bobrowsky (2009), "Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk" en K. Sassa y P. Canuti (eds.), *Landslides - Disaster Risk Reduction*, Springer, Berlín, pp. 321-349.
- Hubbard, B. E., M. F. Sheridan, G. Carrasco-Nunez, R. Díaz-Castellon y S. Rodriguez (2007), "Comparative lahar hazard mapping at Volcan Citlaltépetl, Mexico using SRTM, ASTER and DTED-1 Digital Topography", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 160, núm. 1, pp. 99-124.
- Kleinbaum, D. G. y M. Klein (2002) *Logistic Regression: A Self-learning Text*, segunda edición, Springer, Nueva York, 513 pp.
- Korup, O., M. J. McSaveney y T. R. Davies (2004), "Sediment generation and delivery from large historic landslides in the Southern Alps, New Zealand", *Geomorphology*, vol. 6, núms. 1-2, pp. 189-207.
- Legorreta, P. G., M. Bursik, Ramírez-Herrera, M. T. Contreras, T. Polenz, M. Lugo-Hubp, J. Paredes-Mejía y L. M. Arana-Salinas (2013), "Landslide inventory mapping and landslide susceptibility modeling assessment on the SW flank of Pico de Orizaba volcano, Puebla-Veracruz, Mexico". *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 57, núm. 3, pp. 371-385.
- Legorreta, P. G., M. Bursik, J. Lugo-Hubp y J. J. Zamorano-Orozco (2010), "Effect of pixel size on cartographic representation of shallow and deep-seated landslide, and its collateral effects on the forecasting of landslides by SINMAP and Multiple Logistic Regression landslide models", *Physics and Chemistry of the Earth*, núm. 35, pp. 137-148.
- Legorreta, P. G. y M. Bursik (2009) *Assessment of landslides susceptibility: LOGISNET: a tool for multimethod, multilayer slope stability analysis*, VDM Verla y Dr. Müller, EE.UU., 360 pp.
- Macías, J. L. (2005), "Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, volumen conmemorativo del Centenario Temas Selectos de la Geología Mexicana, vol. VII, núm. 3, pp. 379-424.
- Montgomery, D. R. y W. E. Dietrich (1994), "A physical based model for the topographic control on shallow landslides", *Water Resources Research*, núm. 30, pp. 1153-1171.
- Ohlmacher, G. C. y J. C. Davis (2003), "Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA", *Engineering Geology*, núm. 69, pp. 331-343.

- Pallant, J. (2005), *SPSS survival manual: a step by step guide to data analysis using SPSS for Windows (Version 12)*, Open University Press, Buckingham, 319 pp.
- Pedraza-Gilsanz, J. (1996), *Geomorfología: Principios, Métodos y Aplicaciones*, Ed. Rueda, 414 pp.
- Pérez-Gutiérrez, R. (2007), "Análisis de la vulnerabilidad por los deslizamientos en masa, caso: Tlacuitlapa, Guerrero", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 59 núm. 2, pp. 171-181.
- Tapia-Varela, G. y J. López-Blanco (2002), "Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogénicas a escala 1:100,000", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 19, núm. 1, pp. 50-65.
- Salinas-Sánchez, S. (2005), Mapeo Morfogénico y Análisis Cuantitativo del Depósito de Avalancha del Volcán Jocotitlán, Estado de México, tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, UNAM, México.
- Secretaría de Protección Civil (2010), *Atlas de peligros geológicos e hidrometeorológicos del estado de Veracruz*, Ignacio Mora González, Wendy Morales Barrera y Sergio Rodríguez Elizarrarás (comps.), Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, UNAM, México.
- Sheridan, M. F., G. Carrasco-Nuñez, B. E. Hubbard, C. Siebe y S. Rodríguez-Elizarraraz (2001), *Mapa de peligros del Volcan Citlaltépetl (Pico de Orizaba)*, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma México, escala 1:250 000.
- Siebe, C., M. Abrams, M. F. Sheridan (1993), "Major Holocene block-and-ash fan at the western slope of ice-capped Pico de Orizaba volcano, Mexico: Implications for future hazards", *Journal of Volcanic Geothermal Research*, núm. 59, pp. 1-33.
- Siebe, C., J. C. Komorowski y M. F. Sheridan (1992) "Morphology and emplacement collapse of an unusual debris avalanche deposit at Jocotitlán Volcano, Central Mexico", *Bull. Volcanology*, núm. 54, pp. 573-589.
- Van Den Eeckhaunt, M., J. Poesen, G. Verstraeten, V. Vanacker, J. Moeyersons, J. Nyssen y L. P. H. Van Beek (2005), "The effectiveness of hillshade maps and expert knowledge in mapping old deep-seated landslides", *Geomorphology*, núm. 67, pp. 351-363.
- Van Zuidam, R. A. (1986), *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*, La Haya, Holanda, 442 pp.
- Verstappen, H.Th. y R. A. VanZuidam (1991), *The ITC system of geomorphology Survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards*, ITC Publication núm. 10, Holanda, 89 pp.
- Washington State Department of Natural Resources (DNR), *Forest Practices Division (2006) Landslide Hazard Zonation (LHZ) Mapping Protocol*, version 2.0 [http://www.dnr.wa.gov/BusinessPermits/Topics/LandslideHazardZonation/Pages/fp_lhz_review.aspx].
- Weirich F. y L. Blesius (2007), "Comparison of satellite and air photo based landslide susceptibility maps", *Geomorphology*, núm. 87, pp. 352-364.
- Wieczorek, G. F. (1984) "Preparing a detailed landslide inventory map for hazard evaluation and reduction", *Bulletin of the Association of Engineering Geology*, núm. 21, pp. 337-342.