

Estimación del volumen de los depósitos asociados a deslizamientos a través de geoformas, en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz

Estimating volume of deposits associated with landslides on volcanic landscapes in the SW flank of the volcano Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz

Gabriel Legorreta Paulín*, Marcus Bursik**, José Juan Zamorano Orozco***, José Lugo Hubp***, Bettina Martinez-Hackert**** y Jorge V. Bajo Sánchez+

Recibido: 7/09/2015. Aceptado en versión final: 11/03/2016. Publicado en línea (e-print): 1/09/2016.

Resumen. El estudio de deslizamientos de tierras en terrenos volcánicos a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y bajo un criterio geomorfológico ha permitido elaborar una metodología integral vinculada con la elaboración de inventarios multi-temporales, con la susceptibilidad y la estimación del volumen de los materiales desplazados. Este tipo de investigaciones buscan ser de ayuda en la mitigación de los daños ocasionados por los deslizamientos en los asentamientos humanos y también en sus actividades cotidianas.

El volcán Pico de Orizaba, el más alto de México, ha presentado a lo largo de su historia geológica deslizamientos de grandes dimensiones, eventos que han destruido de manera parcial el edificio y se vinculan con erupciones Bezymianny-Sta. Elena. En la actualidad los más frecuentes y peligrosos

se asocian con lluvias estacionales intensas, cuyo impacto se ve favorecido por el sustrato en el que se desarrollan, detritos volcánicos no consolidados.

En el presente trabajo se analizan las causas, distribución y vínculos que tienen este tipo de fenómenos con las formas de relieve y se calcula su susceptibilidad. De la misma manera, se estima y analiza el volumen de materiales desplazados con el fin de caracterizar las causas que provocan la inestabilidad de las laderas en terrenos volcánicos. Se seleccionó como caso de estudio la cuenca del río El Estado, en el flanco suroeste del volcán Pico de Orizaba, donde será posible caracterizar áreas susceptibles a procesos gravitacionales.

En este estudio el relieve volcánico se analizó bajo un criterio geomorfológico apoyado en fotografías aéreas, trabajo

* Instituto de Geografía, Laboratorio de Análisis Geoespacial, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04520, Coyoacán, México, D.F. E-mail: legorretag@hotmail.com, legorretag@igg.unam.mx

** Department of Geology, University at Buffalo, SUNY Buffalo, 12 Capen Hall, 14260, NY. E-mail: mib@buffalo.edu

*** Instituto de Geografía, Departamento de Geografía Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04520, Coyoacán, México, D.F. E-mail: zamojj@igg.unam.mx, lugoh@igg.unam.mx

**** Department of Geology, Buffalo State College, 1300 Elmwood Avenue, 14222, Buffalo, NY. E-mail: martinb@buffalostate.edu

+ Department of Geography, University at Buffalo, SUNY Buffalo, 12 Capen Hall, 14260, NY. E-mail: bajasajv@buffalostate.edu

de campo y cartografía a detalle; los resultados obtenidos se ajustaron al protocolo de zonación de peligros a deslizamientos elaborado por el Departamento de Recursos Naturales, del Estado de Washington, EE.UU. Para ello, a cada forma del relieve se le otorgó una calificación de susceptibilidad semi-cuantitativa obtenida a partir de la relación área y frecuencia de deslizamientos. La estimación de volúmenes se obtuvo en campo, de esta manera fue posible establecer una relación empírica entre área-volumen utilizando una ley de potencias con la que se estimó el total de volumen desplazado

Abstract. Landslides that occur along river systems are very common and have the potential to cause harm to human, to its infrastructure or affect their socio-economic activity. This dynamic is magnified in territories where morphological contrasts are very marked; as in the border between the mountains and subhorizontal land. This is especially true for volcanic terrains where volcanic activity can trigger voluminous landslides along stream systems by sector and flank collapse and where high seasonal rainfall on terrains covered by poorly consolidated materials produces small but hazardous landslides and debris flows that occur continually along stream systems during the volcanic repose periods. Those type of landslides can deliver volumes of hundreds and millions cubic meters that create a potentially hazardous situation for people and property down the valleys. The study of landslides in volcanic terrains through a Geographic Information System (GIS) and under a geomorphological criterion, have allowed to develop a comprehensive methodology linked to the development of multi-temporal inventory, with susceptibility and volume estimation of displaced material. The aim of this research is to develop a method (protocol) for landslide susceptibility and landslide volume assessment of potentially unstable volcanic landscapes in order to be helpful in mitigating landslide damages to human settlements. Pico de Orizaba volcano is the highest volcano in Mexico. The volcano has been affected by large flank collapse landslides throughout its geological history. These events have partially destroyed the cone as it happened in Bezymianny volcano and St. Elena volcano. In this volcano, the risk associated with landslide and debris flows, is increased by the growing of human settlements along the hillslopes and by the subsistence agriculture, and deforestation. This situation is favored by a volcanic calm that has lasted 147 years, approximate. These conditions create a dangerous situation for more than 360 000 people living on the southern flank of the volcano Pico de Orizaba, where landslides along the hillslopes and the river system threaten towns like Cordova, Orizaba, Rio Blanco, Nogales and Ciudad Mendoza. Today the most common and dangerous landslides are associated with unconsolidated volcanic deposits and heavy seasonal rains.

In this paper, the cause, distribution, and link between landslides and the volcanic landscape relief susceptibility are analyzed. Similarly, the volume of displaced material is estimated in order to characterize the landslide instability in volcanic terrains. The Río El Estado watershed on the southwestern flank of Pico de Orizaba volcano is selected to describe and analyze susceptible areas of

en el área de estudio. Los resultados obtenidos permitieron comprender la evolución a largo plazo del arreglo fluvial en el flanco suroeste del volcán Pico de Orizaba y mostrar los alcances de una metodología cartográfica útil para la elaboración de inventarios, la evaluación de la susceptibilidad y la estimación de los volúmenes asociados a deslizamientos en terrenos volcánicos.

Palabras clave: deslizamientos, SIG, modelado, volcán Pico de Orizaba.

gravitational processes. The study area allows to show a systematic methodology for landslide mapping and volume calculation in areas with scarce information. The methodology encompasses three main stages of analysis. In the first stage, background information is collected to provide context and establish a generalized characterization of landslide processes, landsforms and volumes within the study area. Background information includes the following maps: topographic, geologic, land use, climate, slope, slope curvature, contributing area, flow direction, saturation, reclassified hypsometry, reclassified slope, and morphography. By retrieval and on-off switching of the background information in the GIS, a base map is created to assist in the digitizing of landslides. The base map and the theoretical aspects of the geomorphological mapping help to develop a conceptual base of support for mapping landslides. Landslides are digitized directly into a geographic information system (GIS), and in parallel, a spatial geodatabase of landslides attributes (*eg.* size, volume, activity, landslide type, etc.) is constructed. Previous landslide mapping in the study area is verified and new landslides are added to the landslide inventory.

Once the locations of landslides are mapped and evaluated, similar potential landslide areas are grouped into individual landforms. During the second stage, the volcanic relief is analyzed under a geomorphological criterion based on aerial photographs, fieldwork, and detailed mapping and the results are adjusted to the landslide hazard zonation protocol from Washington State, Department of Natural Resources, USA. For each volcanic landform a semi-quantitative susceptibility rating is obtained from values that correspond to the total area of landslides and the number of landslides within each landform; and they are normalized for the total period of time spanned between sets of aerial orthophotographs (fourteen years period). These normalized variables are referred to as the landslide area rate and the landslide frequency rate, respectively.

Finally, for the third stage, the volume of material delivered by landslides to the main river is estimated by using an empirical area-volume relationship. The results allow us to understand the long-term evolution of the fluvial system in southwestern flank of Pico de Orizaba volcano. They also show a useful mapping methodology for developing inventories, assessing susceptibility, and estimated volumes associated with landslides in volcanic terrains.

Keywords: Landslides, GIS, modeling, Pico de Orizaba volcano.

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos que se producen a lo largo de los sistemas fluviales son muy comunes y tienen el potencial de causar daño a los humanos, a su infraestructura o afectar su actividad socio-económica. Esta dinámica se magnifica en territorios donde los contrastes morfológicos son muy marcados, como ocurre en la frontera entre las montañas y los terrenos subhorizontales.

El Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) es el territorio con mayor actividad volcánica del país. Se extiende 1 000 kilómetros en dirección este-oeste (desde el Pacífico hasta el Atlántico). Está formada por numerosos volcanes compuestos y varios campos monogenéticos drenados por sistemas fluviales que han desarrollado valles profundos, con laderas inclinadas constituidas en su mayor parte por detritos poco consolidados, condiciones que favorecen el desarrollo de procesos gravitacionales (Ferrari *et al.*, 2012). Por otro lado, las características naturales de la zona de estudio suman otros factores que magnifican la remoción en masa; entre ellas se considera la actividad volcánica, los sismos, la precipitación intensa (estacional y ciclónica), el alto grado de meteorización del sustrato así como la tala inmoderada y el cambio de uso del suelo (de bosque a agrícola). Sin embargo, y a pesar de la importancia que tienen estos fenómenos en territorios volcánicos, los inventarios cartográficos son escasos, y aun más cuando se evalúan los materiales aportados por los deslizamientos a los sistemas fluviales. Tal es el caso del Pico de Orizaba, la montaña más alta de México (5 675 msnm) en el sector oriental del CVM. Las condiciones naturales de este sector favorecen la presencia de flujos de escombros, todos ellos vinculados a lluvias intensas. Los detritos que integran estos los flujos turbulentos provienen de las laderas de los valles y es material que llega al fondo del valle a través de deslizamientos superficiales y de asentamiento profundo.

El riesgo asociado con los flujos de escombros se incrementa en la medida que crecen los asentamientos humanos en las laderas del edificio y se incorporan terrenos boscosos a la actividad agrícola. Esta situación se ve favorecida por una calma vol-

cánica que ha durado 147 años, aproximadamente (De la Cruz-Reyna y Carrasco-Núñez, 2002). Estas condiciones crean una situación de peligro para más de 360 000 personas que viven en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba, donde los deslizamientos a lo largo de las laderas de su sistema fluvial amenazan poblaciones como Córdoba, Orizaba, Río Blanco, Nogales y Ciudad Mendoza (INEGI, 2010).

En este trabajo se estudia la cuenca del río El Estado, localizada sobre la ladera SW del Pico de Orizaba en donde el relieve es de montaña, de laderas muy inclinadas, constituidas de rocas volcánicas afectadas por un intenso intemperismo (humedad e hidrotermalismo). Estas condiciones favorecen el desarrollo de pequeños pero numerosos procesos gravitacionales que al incorporarse el depósito al flujo de escombros incrementan su poder destructivo.

En este estudio se realiza un reconocimiento, clasificación, análisis y representación cartográfica de las formas de relieve y en particular de los deslizamientos a partir de métodos morfométricos, conocimiento heurístico-geomorfológico del área de estudio y la verificación-validación de los datos obtenidos en campo (Dikau *et al.*, 1995; Evans, 2012). Esta información se organizó y se adaptó a la metodología que utiliza la División de Prácticas Forestales del Departamento de Recursos Naturales del Estado de Washington, EE.UU. (Washington State Department of Natural Resources: Forest Practices Division: WS-DNR:FPD, 2006). Bajo este criterio se inventariaron 121 deslizamientos y se dividió la cuenca en 7 formas de relieve. A cada una de ellas se le asignaron índices de susceptibilidad a deslizamientos, de bajo a muy alto, utilizando la frecuencia y el área de los mismos. La estimación de volúmenes se calculó en campo, a través de un GPS diferencial y SIG, en 19 eventos gravitacionales. Con la información obtenida fue posible establecer una relación empírica que tomó la forma de una ley de potencias, con un exponente de $\alpha = 1.4095$. Con base en el índice obtenido se estimó que los deslizamientos tienen un potencial de aportar 0.028 km^3 de sedimentos a la corriente principal del río El Estado.

ANTECEDENTES

La distribución de los deslizamientos, la susceptibilidad y la producción de sedimentos aportados por este tipo de procesos, ha sido abordada con varios enfoques y a diferentes escalas cartográficas. A nivel mundial, la compilación de inventarios históricos o multi-temporales mediante el uso de un SIG se ha utilizado en proyectos de zonificación de susceptibilidad y de peligro a deslizamientos, así como la estimación de volúmenes de materiales aportados (WS-DNR:PFD, 2006; Hervás y Bobrowsky, 2009; Blahut *et al.*, 2010). A la par, se compila la distribución, la frecuencia, densidad, tipos y volúmenes en el inventario de deslizamientos, además de clasificar la superficie en formas del relieve específicas con el fin de establecer una relación (Iwashasi *et al.*, 2001; WS-DNR:PFD, 2006; Evans, 2012; Jasiewicz y Stepinski, 2013).

El análisis de los deslizamientos y su relación con las formas del relieve es fundamental en la calibración y evaluación de modelos relacionados con procesos gravitacionales (Dietrich *et al.*, 2003; Legorreta y Bursik, 2009). En este sentido, las formas del relieve son definidas y cartografiadas mediante el uso de diversos enfoques geomorfológicos, todos ellos basados en el conocimiento del investigador, de la evidencia empírica y en el análisis matemático-estadístico (Pennock *et al.*, 1987; Pike y Dikau, 1995; WS-DNR:PFD, 2006; Iwashasi y Pike, 2007; Minar y Evans, 2008; Evans, 2012).

Por otro lado, el estudio de los deslizamientos como fuente importante de sedimentos a los ríos se basa en la distribución y cuantificación de las zonas de acarreo y deposición de los materiales; de esta manera se estima su comportamiento actual y futuro. Para los elementos del relieve, las técnicas para calcular el volumen varían tanto por la forma física y real de la geoforma a estudiar (cono volcánico, derrame, llano, ladera, etc.), por la geometría del elemento a calcular (cónica, elíptica, circular, irregular, etc.) y, por último, por los métodos analíticos empleados para su resolución (geométricos, por cálculo, etc.) (Froggat, 1982).

Determinar el volumen de deslizamientos es una tarea difícil debido a que se requiere información de la superficie y del sustrato sub-superficial

del deslizamiento, por lo que para el cálculo de volúmenes en grandes áreas de afectación se han adoptado relaciones empíricas, mediante el uso de la ley de potencias, la cual enlaza las medidas geométricas del área afectada, con el fin de extrapolar los volúmenes al resto de las zonas de deslizamientos (Peart *et al.*, 2005; Kalderon-Asael *et al.*, 2008; Guzzetti *et al.*, 2009; Wenkey *et al.*, 2011).

En México, numerosas aplicaciones y evaluaciones geomorfológicas a escala local o regional se han venido realizando mediante el uso de métodos heurísticos, estadísticos o determinísticos. Todos ellos se llevaron a cabo con la ayuda de percepción remota y SIG; este último para cartografiar y evaluar la estabilidad de laderas (Capar *et al.*, 2006; García-Palomo *et al.*, 2006; Pérez-Gutiérrez, 2007; Secretaría de Protección Civil, 2010; Sánchez-Núñez *et al.*, 2012). Estos estudios incluyen conceptos, descripciones y explicaciones de los tipos de deslizamientos, los mecanismos de activación y criterios a considerar en la evaluación y el reconocimiento de la susceptibilidad en un área determinada (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2004). Sin embargo, pocos trabajos hacen referencia a la estimación de los volúmenes aportados (Capar *et al.*, 2003; Capra y Lugo-Hubp, 2006). En el volcán Pico de Orizaba, varios modelos y simulaciones usando SIG y PR han sido utilizados para cartografiar, explicar y evaluar los riesgos de lahares (Sheridan *et al.*, 2001; Hubbard, 2001; Hubbard *et al.*, 2007). En el flanco suroeste del volcán Pico de Orizaba se realizó un análisis general de las condiciones climatológicas y geológicas que favorecieron la presencia de un flujo de baja concentración que se desplazó por el valle del río Chiquito Muerto-Barranca, siendo el río de El Estado el principal afluente de este sistema (Rodríguez *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2011). En esta misma cuenca, en 2013 se elaboraron un inventario multi-temporal y un mapa de susceptibilidad de deslizamientos a escala regional a partir de una regresión múltiple logística (RLM) y SINMAP (Legorreta *et al.*, 2013). En 2014 se publica un inventario de deslizamientos y un mapa de susceptibilidad usando RLM (Legorreta *et al.*, 2014) y en 2015, a escala local y para la cuenca del río El Estado, una zonificación de deslizamientos vinculando formas del relieve

(Legorreta *et al.*, 2015). A pesar de este esfuerzo las investigaciones son insuficientes.

ÁREA DE ESTUDIO

En este trabajo se estudia la cuenca de El Estado, localizada en el flanco suroeste del volcán Pico de Orizaba, entre Veracruz y Puebla, México, con el fin de modelar el volumen de materiales aportados al sistema fluvial por deslizamientos, presentes en las distintas formas del relieve que integran este territorio. El área de estudio se localiza entre los $18^{\circ}55'23''$ - $18^{\circ}59'36''$ de latitud norte y los $97^{\circ}16'17''$ - $97^{\circ}14'56''$ de longitud oeste; este territorio es parte del sector oriental del Cinturón Volcánico Mexicano.

El río El Estado es una subcuenca de 5.2 km², forma parte del Río Chiquito-Barranca del Muerto

y desemboca en el Golfo de México (Figura 1a). La altitud que ocupa varía entre los 2 677 y los 4 248 msnm; por consiguiente la morfología es de montaña, en donde la inclinación del terreno es $> 56^{\circ}$, dato que contrasta con el declive $< 5^{\circ}$ característico del fondo de los valles intermontanos, en donde las angostas pero muy dinámicas llanuras aluviales definen superficies subhorizontales.

El sustrato por el cual dreña el río El Estado es de andesitas y dacitas del Terciario así como piroclastos (flujos y caídas) del Cuaternario (Carrasco-Núñez y Ban, 2009; Rodríguez *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2011). La existencia y acomodo de estos materiales a lo largo de las laderas abruptas favorece el desarrollo de deslizamientos, flujos de escombros y lodo. Estos fenómenos también responden a cambios de uso del suelo (de bosque a cultivos, explotación forestal o ganadería) y a la existencia de una alta precipitación.

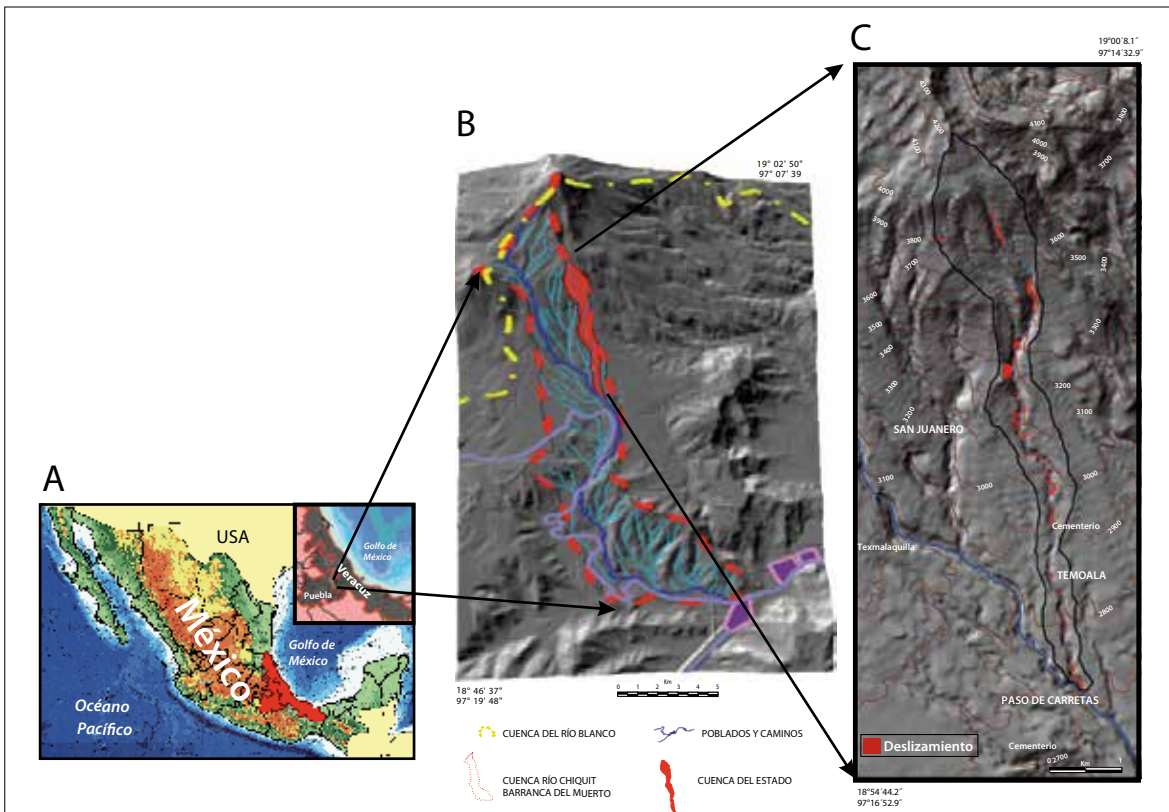


Figura 1. A) Localización de la zona de estudio; B) cuenca del río Blanco y localización de la zona de estudio y C) deslizamientos (en rojo) en la subcuenca del río El Estado.

Los deslizamientos registrados en el inventario son 121 (0.099 km²) y en su cartografía se usaron fotografías aéreas multi-temporales y trabajo de campo. De esta manera se pudieron establecer las zonas donde existen caída de rocas, laderas constituidas por lavas y lahares.

Los deslizamientos superficiales son característicos de las vertientes escarpadas, con importantes cubiertas de piroclastos. La fuerte inclinación de las laderas favorecen la pronta salida de flujos turbulentos, para después continuar con un lento azolvamiento o recubrimiento de detritos (aluvión).

Por otro lado, los deslizamientos de asentamiento profundo, activos y latentes se presentan en laderas constituidas por piroclastos con cubiertas superficiales de ceniza. Estas condiciones son características de la cuenca media y alta de la zona de estudio.

METODOLOGÍA

La metodología comprende tres etapas principales de desarrollo (Figura 2). En la primera se verificó y se sumaron más elementos al inventario de deslizamientos multi-temporal elaborado por Legorreta *et al.* (2014), su cartografía y la de formas del relieve (pasos 1 a 7 en la Figura 2); en la segunda se recalculó las susceptibilidad de procesos asociados a formas del relieve elaborado por Legorreta *et al.* (2015) (paso 8 en la Figura 2), y en la tercera se realizó el cálculo del volumen aportado por los deslizamientos al cauce principal y por forma de relieve, y en general, de toda la cuenca (paso 9 en la Figura 2). Las técnicas y su aplicación basada en el SIG se describen a continuación.

Para la primera etapa se seleccionó la cuenca hidrográfica (paso 1 en Figura 2), como área piloto por contar con las condiciones fisiográficas y antrópicas que favorecen la existencia de deslizamientos. A la par se compiló, se seleccionó y analizó la información antecedente con el fin de caracterizar los deslizamientos y formas del relieve (paso 1 a 4 en Figura 2). En este proceso también se usó el mapa base elaborado en una plataforma SIG por Legorreta *et al.* (2014). Este mapa base se realizó a partir de la recopilación de ortofotos

(1:10 000 y 1:20 000) con una cobertura temporal de 14 años; mapas topográficos (1:50 000), geológicos (1:50 000 y 1:40 000), mapas de uso del suelo, clima e hidrología (1:250 000) y un conjunto de mapas (pendientes, curvatura del terreno y de área de contribución de escurrimiento superficial) derivados de un modelo digital de elevación (MDE) de 10 m de resolución. Este documento se utilizó en la identificación y cartografía de nuevos deslizamientos y la verificación de formas del relieve.

Los deslizamientos fueron cartografiados y clasificados en deslizamientos superficiales, flujos de escombros, deslizamientos de escombros, deslizamientos de asentamiento profundo, flujos de tierra y caída de rocas, de acuerdo con los criterios de WS-DNR:PFD (2006), Cruden y Varnes (1996) y Wieczorek (1984). Este inventario multi-temporal y su base de datos geoespacial, con los atributos de los procesos, fue elaborado por Legorreta *et al.* (2014).

El inventario fue verificado y complementado con trabajos de campo llevados a cabo tres veces al año, desde 2014 hasta 2015. En cada uno de ellos se realizaron mediciones, se enriqueció la cartografía y se realizó un seguimiento de los cambios morfológicos de estos fenómenos, además de comprobar el 25% de las siete formas del relieve (depósitos de origen gravitacional: conos y mantos; acumulativo-intermontano: superficies subhorizontales; laderas de andesita con inclinación moderada y cubiertas por mantos de piroclastos (3 810-3 190 msnm); laderas constituidas por secuencias de flujos piroclásticos y lahares (3 270-2 690 msnm); laderas dacíticas con fuerte inclinación y cubierta de piroclastos de caída (3 990-3 310 msnm); laderas dacíticas cubiertas por piroclastos de caída de potente espesor (4 250-3 960) y valles fluviales, la representación cartográfica de estos últimos es de Legorreta *et al.* (2015) (Figura 4).

Las formas de relieve mencionadas se identificaron con base en los atributos físicos y geomorfológicos del relieve y del vínculo con los deslizamientos, como la densidad de los mismos, la inclinación del terreno, la altitud, la hidrología, la litología y la forma geometría de las vertientes (plana, cóncava, convexa). El método usado en la identificación de formas del relieve (paso 7 en Figura 2) es similar al

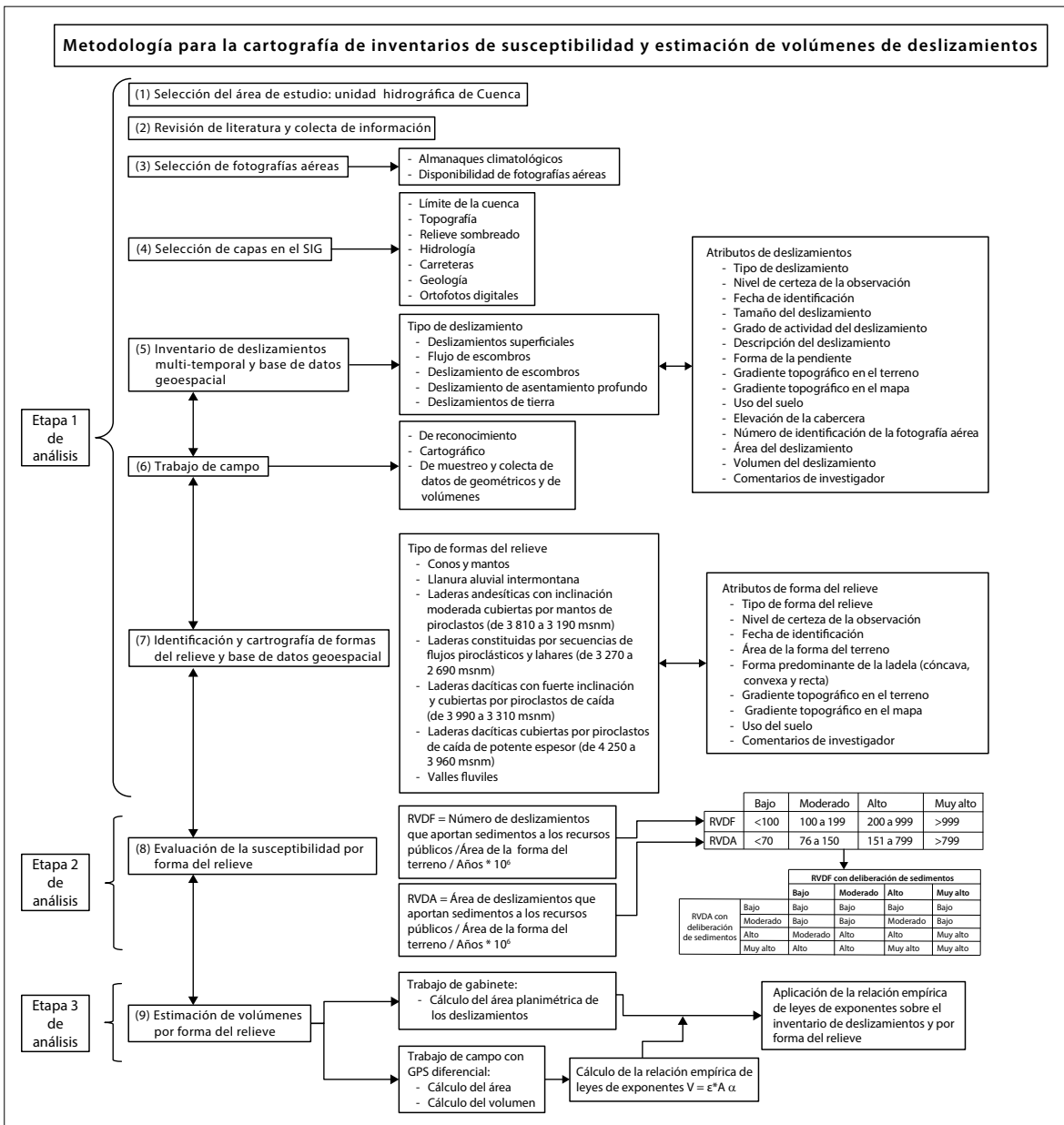


Figura 2. Procedimiento general para la realización de la cartografía del inventario, de la susceptibilidad y la estimación de volúmenes de deslizamientos.

utilizado en el Protocolo de Prácticas Forestales del Estado de Washington, EE.UU., para abordar la cartografía de formas del relieve (WS-DNR:PFD, 2006), pero fue adaptada para satisfacer las necesidades específicas de la asignación de formas del relieve en terrenos volcánicos (Legorreta *et al.*, 2015).

Para la segunda etapa, y con el nuevo inventario de deslizamientos del 2015, la susceptibilidad a deslizamientos en las laderas por formas del relieve (paso 8 en Figura 2) fue revisado y re-calculado con base en el trabajo realizado por Legorreta *et al.* (2015), así como la susceptibilidad global de la cuenca.

La susceptibilidad a deslizamientos por formas del relieve se deriva de los valores que se corresponden con el número y área de estos procesos en cada forma de relieve, normalizado por el período analizado. Estos valores son llamados rangos de valoración de procesos gravitacionales por área (RVDA) y por frecuencia (RVDF).

Después de que ambas categorías (RVDF y RVDA) fueran re-determinadas, los valores son analizados en una matriz con el fin de asignar un índice de susceptibilidad general de la cuenca: baja, moderada, alta o de muy alta susceptibilidad.

Para la tercera etapa, y durante el trabajo de campo, se midió el área y volumen de 19 deslizamientos a fin de desarrollar una relación teórica volumen-área-deslizamientos en la cuenca. Para ello se utilizaron tanto eventos superficiales (se incluyeron flujos de escombros) como de asentamiento profundo con edad relativa diferente. Los deslizamientos que se observaron con una cubierta vegetal desarrollada, estimada en más de 14 años de regeneración, fueron incluidos en el análisis. Del mismo modo fueron excluidos los eventos cuyas áreas resultaron ser menor a 0.005 km² (tamaño mínimo a cartografiar).

La geometría del deslizamiento se midió con cinta, estatal y GPS diferencial, mientras que su profundidad en la cabecera y en las paredes laterales se realizó a través de transectos; lo mismo se hizo con la distancia horizontal. De esta manera fue posible generar modelos digitales de elevación con 2 m de resolución y con ellos estimar el volumen de los deslizamientos en ArcMap (Figura 3). En este mismo sistema se crearon los MDE de la

superficie actual y de la previa al deslizamiento; esta última se creó de manera heurística y por medio de interpolaciones. La diferencia algebraica entre ambas superficies, multiplicada por el área del pixel permitió obtener el volumen. Las medidas del área (A) y el volumen (V) se utilizó para establecer y alimentar una relación empírica que tomó la forma de una ley de potencia $V = \varepsilon * A^\alpha$. En gabinete y con ayuda del SIG se obtuvo el área planimétrica de los 107 eventos restantes. La relación teórica obtenida de área-volumen de los 19 deslizamientos, aplicada al área de los eventos cartografiados en el inventario, se utilizó para estimar el volumen total de material potencial que pueden aportar al cauce en cada una de las formas del relieve.

RESULTADOS

En este estudio, 19 eventos, que representan 15.7% del total (121) se utilizaron para derivar la relación teórica área-volumen. De los 19 deslizamientos, 79% son de tipo superficial (incluyendo flujos y deslizamientos de escombros) y el 21% restante son de asentamiento profundo. El nuevo inventario contempla los siguientes tipos de procesos de remoción en masa: deslizamientos superficiales, 9.09%; flujos de escombros, 30.58%; deslizamientos de escombros 39.67%; deslizamientos de asentamiento profundo 9.09% y caída de rocas 11.57%. Solo uno de todo el conjunto (de asentamiento profundo) fue considerado como probable y hay que mencionar que los procesos gravitacionales son más abundantes en la cuenca alta y media, sector

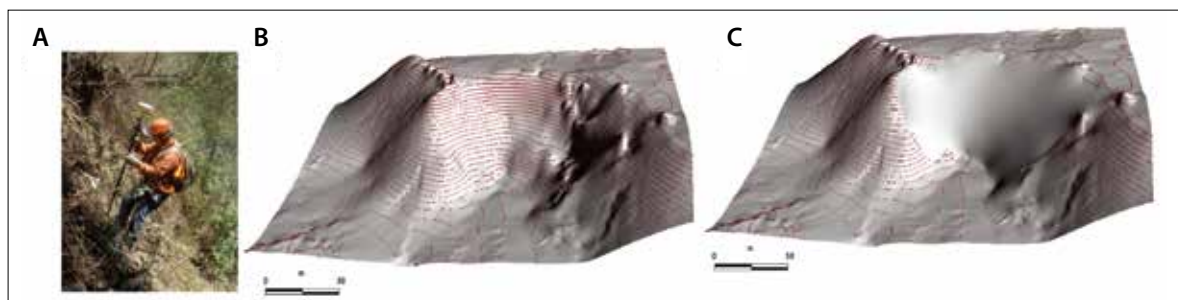


Figura 3. Procedimiento general para crear los MDE y calcular el volumen. A) Levantamiento topográfico con GPS diferencial; B) MDE generado con el levantamiento topográfico de un deslizamiento; C) MDE con la reconstrucción de la superficie anterior al deslizamiento. La comparación algebraica entre ambos MDE permite el cálculo del volumen en el SIG.

en donde predominan depósitos piroclásticos y de caída.

En el área de estudio se utilizaron los 7 tipos de formas del relieve y su grado de susceptibilidad por procesos gravitacionales (Legorreta *et al.*, 2015) (Figura 4). Este índice fue re-calculado en función al nuevo inventario y el resultando fue similar al

ya existente. En cada forma del relieve se calculó el volumen aportado por los deslizamientos al cauce principal.

Con base en el análisis detallado de la relación área y volumen de 19 eventos medidos en el trabajo de campo se calculó la ley de potencias para los deslizamientos: $V = 0.3235192 * A^{1.4095}$. Esta

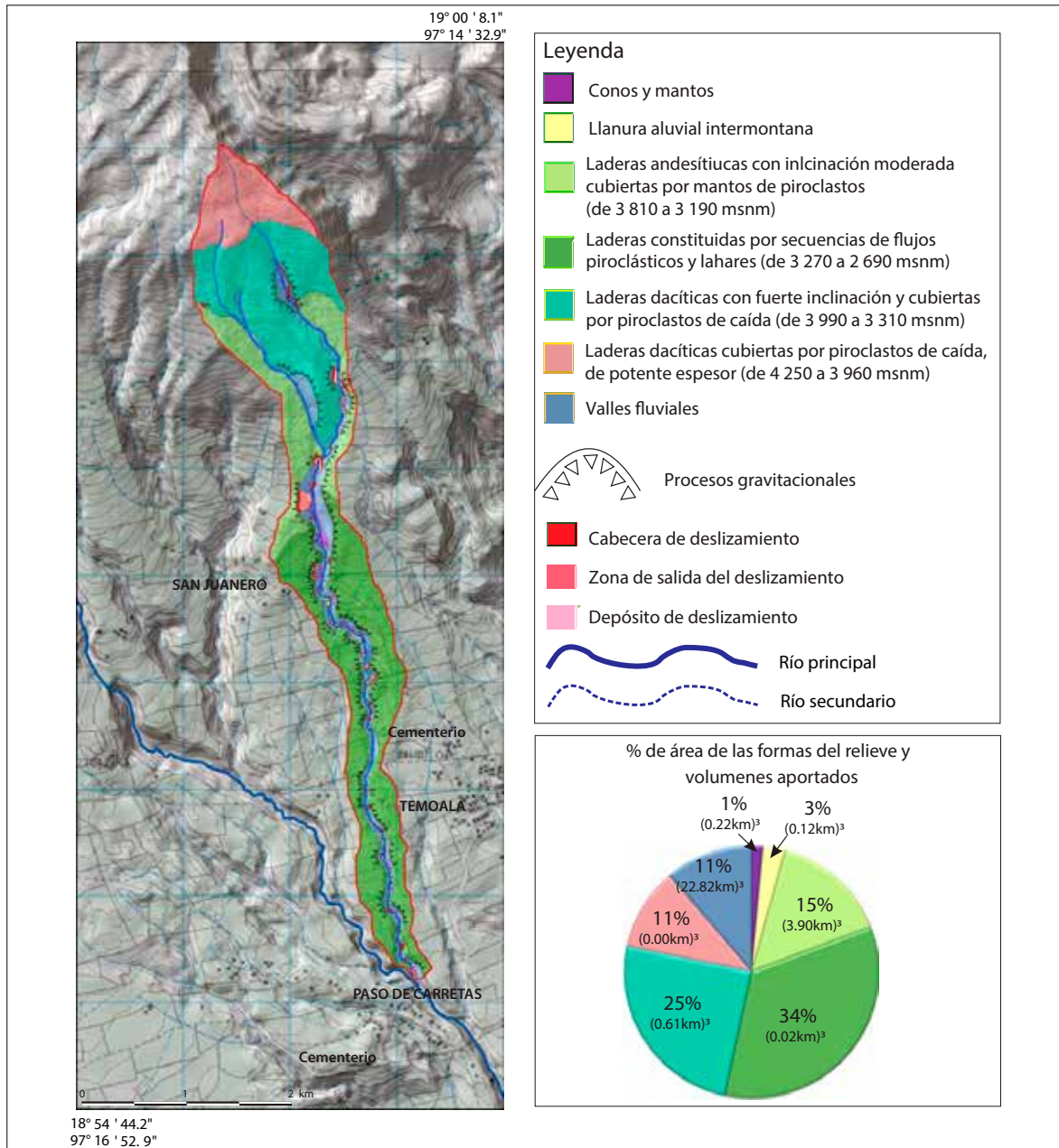


Figura 4. Formas del relieve y volúmenes aportados por los deslizamientos.

se aplicó dentro del SIG para el área remanente de la población de procesos gravitacionales que no participaron en la formulación de dicha ley de potencias. En general, el resultado muestra que los deslizamientos superficiales ubicados en el río principal tienen el potencial de aporte de 27.68 km³ de material al cauce. En particular, las formas del relieve y su aporte de materiales son:

- 1) Los depósitos de origen gravitacional (conos y mantos) tienen un potencial muy alto para producir deslizamientos ya que se producen cuando la corriente socava la base externa del mismo, a lo largo de las paredes verticales del valle o en altas terrazas de un cauce serpenteante no confinado. Cubren 0.07% del área de la cuenca y representan 14.05% de los deslizamientos quienes aportan 0.8% de sedimentos a la cuenca.
- 2) Las superficies subhorizontales (fondo plano: llanura aluvial intermontana) tienen un potencial alto para producir deslizamientos. Son terrenos bajos asociados a los cauces, llanuras fluviales y terrazas. Los deslizamientos ocurren en esta unidad debido al corte de la corriente fluvial en los bordes exteriores de las paredes del valle. Cubren 2.84% del área de la cuenca y representan 1.65% de los deslizamientos quienes aportan 0.4% de sedimentos a la cuenca.
- 3) Las laderas andesíticas con inclinación moderada cubiertas por mantos de piroclastos (3 810-3 190 msnm) tienen un potencial alto para producir deslizamientos. Son terrenos con pendientes mayores al 37%. En esta unidad se presentan deslizamiento de roca y de escombros debido al corte de la corriente fluvial en escalonamientos de derrames de lava de las paredes del valle. Cubren 14.96% del área de la cuenca y representan 2.48% de los deslizamientos, los que aportan 14% de sedimentos a la cuenca.
- 4) Las laderas constituidas por secuencias de flujos piroclásticos y lahares (3 270-2 690 msnm) tienen un potencial moderado para producir deslizamientos. Son terrenos con pendientes menores al 23%. Esta forma incluye valles y

barrancas secundarios, con laderas asimétricas y simétricas, que son los puntos de iniciación de algunos deslizamientos superficiales. Cubren 34.15% del área de la cuenca y representan 12.4% de los deslizamientos quienes aportan 0.05% de sedimentos a la cuenca.

- 5) Las laderas dacíticas con fuerte inclinación y cubiertas por piroclastos de caída (3 990-3 310 msnm) tienen un potencial bajo para producir deslizamientos. Son terrenos con pendientes menores al 23%. Esta forma del relieve integra una rampa piroclástica que incluye todas las morfologías asociadas a la pendiente (convergente, divergente y plana) y gradientes de > 47%. Cubren 24.83% del área de la cuenca y representan 1.65% de los deslizamientos, los cuales aportan 2.19% de sedimentos a la cuenca.
- 6) Las laderas dacíticas cubiertas por piroclastos de caída, de potente espesor (4 250-3 960 msnm), tienen un potencial bajo para producir deslizamientos. Son terrenos con pendientes promedio de 27.85%. Estas laderas forman colinas onduladas y planas con poca disección. Cubren 10.57% del área de la cuenca. Ningún deslizamiento fue observado en esta forma del relieve.
- 7) Los valles fluviales tienen un potencial muy alto para producir deslizamientos. Son formas con laderas asimétricas y simétricas, continuas en su extensión lateral. En estas formas pueden ocurrir procesos gravitacionales en laderas con paredes convexas o rectas de < 65%. Los resultados muestran que los valles fluviales (11.21% del área de estudio) presentan una muy alta susceptibilidad a deslizarse y son las que aportan 82.45% del total del volumen de sedimentos.

CONCLUSIONES

Este trabajo presentó y examinó brevemente la implementación de un método cartográfico para la creación de un inventario multi-temporal, la evaluación de susceptibilidad por formas del relieve y el volumen de sedimentos de los deslizamientos

aportados en cada una de las formas del relieve en las que se dividió el área de estudio. Tanto el inventario como el mapa de susceptibilidad y el cálculo de volúmenes a través de relaciones empíricas área-volumen, aunque con limitaciones, son la base de una metodología integral para gestionar y apoyar los estudios de pronóstico de inestabilidad de laderas. El método fue implementado utilizando y adaptando el protocolo de zonificación del peligro de procesos gravitacionales del Departamento de Recursos Naturales (DNR), División de Prácticas Forestales del Estado de Washington, EE.UU. (WS-DNR:PFD, 2006). La modificación se apoyó en el conocimiento experto geomorfológico de la zona en estudio, en la normalización y la integración de capas temáticas y en el uso de sus correspondientes bases de datos geo-espaciales dentro de los SIG.

La evaluación de las formas terrestres y el inventario de deslizamientos en el SIG muestra que las formas tienen un patrón diferente debido a su litología, uso del suelo y propiedades geomorfológicas. Se encontró que más del 67% de los procesos gravitacionales se desarrollan a lo largo de los valles (primarios y secundarios), la mayoría de ellos ubicados entre los 2 677 y 3 640 msnm donde existen laderas muy inclinadas, cubiertas por piroclastos (caídas y flujos) y depósitos volcanoclásticos donde la cobertura vegetal ha sido eliminada por tala o donde los relictos de bosque no exceden los 50 a 100 m alrededor del talweg. Estas condiciones son importantes para entender a largo plazo los volúmenes de materiales que aportan continuamente los procesos gravitacionales al sistema fluvial del volcán Pico de Orizaba. Este aspecto es de utilidad en la cuantificación, evaluación y modelado de flujos de escombros, alimentados aguas arriba por procesos gravitacionales. La ley de potencias, con un exponente de $\alpha = 1.4095$ obtenida en este estudio, es muy similar a la mostrada en otros trabajos (Guzzetti *et al.*, 2009), pero los volúmenes difieren a causa del tamaño del área revisada y del número de deslizamientos identificados. Se hace hincapié en que el volumen calculado es una estimación del material que potencialmente podría ser desplazado hacia el cauce en un evento extraordinario. En campo se observó que los depósitos asociados al

deslizamiento no fueron removidos en su totalidad aguas abajo; algunos remanentes quedaron como fuentes potenciales de materiales en espera de precipitaciones más extremas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Programa de Ciencia Básica SEP-CONACYT # 167495, PAPIITIN102115 y the International Programme on Landslides (IPL) proyecto 187.

REFERENCIAS

- Blahut, J., Van Westen, C. J. y Sterlacchini, S. (2010). Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*, 119(1-2), 36-51.
- Capra, L. y Lugo-Hubp, J. (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*, 20(2), 95-106.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J. y Borselli, L. (2003). Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlán (México). *Engineering Geology*, 69, 359-379.
- Carrasco-Núñez, G. y Ban, M. (1994). Geologic map and structure sections of the summit area of Citlaltépetl Volcano, Mexico, with summary of the geology of the Citlaltépetl volcano summit area. *Cartas geológicas y minera* (p. 9). México: Instituto de Geología.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2004). *Guía básica para la elaboración de mapas estatales y municipales de peligros de riesgos*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación.
- Cruden, D. M. y Varnes, D. (1996). Landslide types and processes. En A. K. Turner y R. L. Shuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 36-75). Transp. Res. Board, Spec. Rep. 247.
- De la Cruz-Reyna, S. y Carrasco-Núñez, G. (2002). Probabilistic hazard analysis of Citlaltépetl (Pico de Orizaba) Volcano, eastern Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 307-318.

- Dietrich, W. E., Bellugi, D. G., Sklar, L. S., Stock, J. D., Heimsath, A. M. y Roering, J. J. (2003). Geomorphic transport laws for predicting landscape form and dynamics. En P. R. Wilcock y R. M. Iverson (Eds.), *Prediction in Geomorphology* (pp. 103-132). Geophysical Monograph, 135. Washington DC: American Geophysical Union.
- Dikau, R., Brabb, E. E., Mark, R. K. y Pike, R. J. (1995). Morphometric landform analysis of New Mexico. *Z. Geomorphol., Suppl. Bd. 101*, 109-126.
- Evans, I. S. (2012). Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology*, 137(1), 94-106.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, M. T., Manea, V. y Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, Invited review paper. DOI:10.1016/j.tecto.2011.09.018.
- Froggatt, P. C. (1982). Review of methods estimating rhyolitic tephra volumes; applications to the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 14, 1-56.
- García-Palomo, A., Carlos-Valerio, V., López-Miguel, C., Galván-García, A. y Concha-Dimas, A. (2006). Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the Mexico Basin. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 195-204.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M. y Rossi, M. (2009). Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 279, 222-229.
- Hervás, J. y Bobrowsky, P. (2009). Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk. En K. Sassa y P. Canuti (eds.), *Landslides - Disaster Risk Reduction* (pp. 321-349). Berlín: Springer.
- Hubbard, B. E., Sheridan, M. F., Carrasco-Nunez, G., Díaz-Castellon, R. y Rodriguez, S. (2007). Comparative lahar hazard mapping at Volcan Citlaltépetl, Mexico using SRTM, ASTER and DTED-1 Digital Topography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160(1), 99-124.
- Hubbard, B. E. (2001). *Volcanic Hazard Mapping Using Aircraft, Satellite and Digital Topographic Data: Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México*, Thesis, Department of Geology, SUNY. Buffalo.
- Kalderon-Asael, B., Katz, O., Aharonov, E. y Marco, S. (2008). Modeling the relationship between area and volumen of landslides, Geological Survey of Israel, Report GSI/06/2008), pp. 1-16.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>. Consultado el: 23 de febrero del 2016.
- Iwahashi, J. y Pike, R. (2007). Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 86, 409-440.
- Iwahashi, J., Watanabe, S. y Furuya, T. (2001). Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan. *Computer & Geosciences*, 27(7), 851-865.
- Jasiewicz, J. y Stepinski, T. (2013). Geomorphons - a pattern recognition approach to classification and mapping landforms. *Geomorphology*, 182, 147-156.
- Legorreta Paulín, G., Bursik, M., Zamorano-Orózo, J. J. y Figueroa-García, E. J. (2015). Landslide Susceptibility of Volcanic Landforms in the Río El Estado Watershed, Pico de Orizaba Volcano, Mexico. *Natural Hazards Journal*, 77(2). DOI: 10.1007/s11069-015-1612-2.
- Legorreta Paulín, Bursik, G., M., Lugo, J., Paredes-Mejía, L. M. y Aceves-Quesada, J. F. (2014). A GIS method for landslide inventory and susceptibility mapping in the Río El Estado watershed, Pico de Orizaba volcano, México. *Natural Hazards Journal*, 71(1), 229-241.
- Legorreta Paulín, G., Bursik, M., Ramírez-Herrera, M. T., Contreras, T., Polenz, M., Lugo, J., Paredes-Mejía, L. M. y Arana-Salinas, L. (2013). Landslide inventory mapping and landslide susceptibility modeling assessment on the SW flank of Pico de Orizaba volcano, Puebla-Veracruz, Mexico, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57(3), 371-385.
- Legorreta Paulín, G. y Bursik, M. (2009). *Assessment of landslides susceptibility: LOGISNET: a tool for multi-method, multilayer slope stability analysis*. EE.UU.: VDM Verlag Dr. Müller.
- Minar, J., Evans, E. I. (2008). Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*, 95, 236-259.
- Mora González, I., Morales Barrera, W. y Rodríguez Elizarrarás, S. (comps.) (2010). *Atlas de peligros geológicos e hidrometeorológicos del estado de Veracruz*. Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz. Xalapa: Universidad Veracruzana, UNAM.
- Peart, M. R., Ng, K. Y. y Zhang, D. D. (2005). Landslide and sediment delivery to a drainage system: some observations from Hong Kong. *Journal of Asian Earth Science*, 25, 821-836.
- Pennock, D., Zebarth, B. y De Jong, E. (1987). Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. *Geoderma*, 40, 297-315.
- Pérez-Gutiérrez, R. (2007). Análisis de la vulnerabilidad por los deslizamientos en masa, caso: Tlacuitlapa,

- Guerrero. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(2), 171-181.
- Pike, R. J. y Dikau, R. (1995). Advances in geomorphometry. *Z. Geomorphol.*, N. F. Suppl. Bd., 101, 238.
- Rodríguez, S., Mora, I., Murrieta, J., Morales, B. W. V. (2011). *Peligros geológicos más frecuentes en el estado de Veracruz*. Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Rodríguez, S., Mora, I. y Murrieta, J. (2006). Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Número Especial de Geología Urbana, 2, 223-236.
- Sánchez-Núñez, J. M., Macías, J. L., Zamorano, J. J., Saucedo, R., Torres, J. R. y Novelo, D. (2012). Mass Movement processes at the Motozintla basin, Chiapas, Southern Mexico. *Geofísica Internacional*, 51(2), 169-186.
- Sheridan, M. F., Carrasco-Núñez, G., Hubbard, B., Siebe, C. y Rodríguez, S. (2001). Mapa de Peligros del volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba). Esc: 1:250,000. México: UNAM.
- Washington State Department of Natural Resources (DNR), Forest Practices Division (2006). Landslide Hazard Zonation (LHZ) Mapping Protocol, version 2.0, accessed at: Recuperado de http://www.dnr.wa.gov/BusinessPermits/Topics/LandslideHazard-Zonation/Pages/fp_lhz_review.aspx.
- Wenkey, D., Jen, C. H., Böse, M. y Lin, J. C. (2011). Assessment of sediment delivery from successive erosion on stream-coupled hillslopes via a time series of topographic surveys in the central high mountain range of Taiwan. *Quaternary International*, 263(14), 14-25. DOI: 10.1016/j.quaint.2011.02.018.
- Wieczorek, G. F. (1984). Preparing a detailed landslide inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 21(3), 337-342.