

Inventario de deslizamientos y modelado de la susceptibilidad mediante regresión logística múltiple en la cuenca del río La Carbonera, flanco SE del volcán Pico de Orizaba, México

Gabriel Legorreta Paulín*
Fernando Aceves Quesada**

Recibido el 21 de marzo de 2017; aceptado el 23 de mayo de 2017

Abstract

The Río La Carbonera watershed (71.9 km²), located on the southeastern flank of Pico de Orizaba volcano (5675 masl), has been selected as a case study to characterize areas that are prone to slope instability in volcanic and sedimentary terrains. The occurrence of landslides was determined through a landslide inventory map created from multi-temporal aerial photographs, field work, and with an adaptation of the Landslide Hazard Zonation Protocol of the Washington State, USA, Department of Natural Resources. Two hundred and thirty-five gravitational processes of 6 types were recognized: shallow, debris-avalanche, deep seated, debris and earth flows, meander cutting, and rock fall. The spatial analysis of the relationship between landslide distribution and geology revealed that gravitational processes are more abundant in the mid-upper part of the watershed, where deposits and volcanic rocks are the predominant. In this work the landslide susceptibility was modeled by using the statistical model of Multiple Logistic Regression (RLM) through the use of LOGISNET system and SPSS statistical program. The RLM was used to examine the relationship between landslides and cartographic variables (altimetry, slope, terrain curvature, contributing area, flow direction, geology, land use, geology, and edaphology) in order to create the susceptibility map. With four of eight independent cartographic variables, a resolution of 10m per pixel, the susceptibility model tends to over-predict landslides. However, the model is statistically valid and capable of predicting 72.63%

* Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México, correo electrónico: legorretag@igg.unam.mx

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, UNAM, México, correo electrónico: jofaceq@igg.unam.mx

of the existing landslides. The implementation of the landslide inventory and the susceptibility modeling show the feasibility of the method to be used in other areas of Mexico.

Key words: *landslides, GIS, modeling, Volcano Pico de Orizaba.*

Resumo

A bacia do rio “La Carbonera”, com uma superfície 71.9 km², localizada no flanco sudeste do vulcão Pico de Orizaba (5675 msnm /18618 pés), foi selecionado para um estudo de caso para caracterizar as áreas que são propensas à instabilidade das encostas em terrenos vulcânicos e sedimentares. A ocorrência dos deslizamentos foi determinada através de um mapeamento de inventário criado a partir de fotografias aéreas de diferentes anos e trabalho de campo, com uma adaptação do Protocolo de Zonagem de Perigo de Deslizamento de Terra, do Departamento de Recursos naturais, do Estado de Washington, EUA. Foram reconhecidos 235 processos gravitacionais de seis tipos: de superfície, de detritos-avalanche, de assentamento profundo, de fluxo de detritos e de terra, por escorregamentos rotacionais e queda de rochas. A análise da relação entre a distribuição espacial, deslizamentos e geologia revelou que os processos gravitacionais são mais abundantes na parte média alta da bacia, onde predominam depósitos e rochas vulcânicas.

Neste documento, a susceptibilidade de deslizamentos é modelada utilizando o modelo estatístico de Regressão Linear Múltipla (RLM), através do uso do sistema de LOGISNET e o programa estatístico SPSS. O RLM é usado para examinar a relação entre deslizamentos de terra e as variáveis de mapeamento (altitude, inclinação, curvatura do terreno, área de contribuição, fluxo de direção de escurrimiento, geologia, uso do solo, e edafologia) para criar o mapa de suscetibilidade. Com quatro de oito variáveis independentes de mapeamento e uma resolução de 10 metros por pixel, o modelo de susceptibilidade parece sobre-prever deslizamentos. No entanto, o modelo é estatisticamente válido e capaz de prever 72.63% dos deslizamentos existentes. A implementação do inventário de deslizamento e a modelagem da susceptibilidade mostram a viabilidade do método para ser utilizado em outras áreas do México.

Palavras chave: *Deslizamentos, SIG, modelador, volcan Pico de Orizaba.*

Resumen

La cuenca del río La Carbonera, de 71.9 km² de superficie, ubicada en el flanco sur-oriental del volcán Pico de Orizaba (5,675 msnm), se ha seleccionado como caso de estudio para caracterizar las áreas que son propensas a la inestabilidad de las laderas en terrenos volcánicos y sedimentarios. La ocurrencia de deslizamientos se determinó a través de un mapa de inventario de deslizamientos creado a partir de fotografías aéreas de diversos años y trabajo de campo, con una adaptación del Protocolo de

zonificación del peligro de remoción en masa del Departamento de Recursos Naturales, del Estado de Washington, Estados Unidos. Se reconocieron 235 procesos gravitacionales de seis tipos: superficial, de escombros-avalancha, de asentamiento profundo, flujos de escombros y de tierra, por corte en meandro y caída de rocas. El análisis de la relación de distribución espacial entre los deslizamientos y la geología reveló que los procesos gravitacionales son más abundantes en la parte media-alta de la cuenca, donde predominan depósitos y rocas volcánicas. En este trabajo se modela la susceptibilidad por deslizamientos usando el modelo estadístico de Regresión Logística Múltiple (RLM) a través del uso del sistema LOGISNET y del programa estadístico SPSS. La RLM se utiliza para examinar la relación entre los deslizamientos y variables cartográficas (altimetría, ángulo de la pendiente, curvatura del terreno, área de contribución de escurrimiento superficial, flujo de dirección de escurrimiento, geología, uso del suelo y edafología) a fin de crear el mapa de susceptibilidad. Con cuatro de ocho variables cartográficas independientes, una resolución de 10 m por pixel, el modelo de susceptibilidad tiende a sobrepredecir deslizamientos. Sin embargo, el modelo es estadísticamente válido y capaz de predecir el 72.63% de los deslizamientos existentes. La implementación del inventario de deslizamiento y el modelado de la susceptibilidad muestran la viabilidad del método a ser utilizado en otras áreas de México.

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

Introducción

Los deslizamientos son fenómenos que ocurren en el relieve terrestre todo el tiempo y que son provocados por factores intrínsecos (como la litología y los parámetros geotécnicos de la zona) y extrínsecos (como el clima, los sismos, y las actividades antrópicas) (Mikoš *et al.*, 2006; Clerici *et al.*, 2009; Guthrie *et al.*, 2010). En México, las regiones volcánicas que cortan o intersectan cadenas montañosas sedimentarias o metamórficas son muy comunes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009). En estas regiones, las laderas con fuertes pendientes y los sistemas fluviales son muy propensos a procesos gravitacionales. Es por ello que es importante estudiarlos a fin de evaluar el daño potencial a los asentamientos y actividades humanas. Este es el caso del volcán Pico de Orizaba, la montaña más alta de México (5,675 msnm) el cual corta e intersecta depósitos sedimentarios del Cretácico pertenecientes a la Sierra Madre Oriental. Esta zona montañosa tiene un gran potencial para producir deslizamientos y flujos de escombros debido a la existencia de depósitos piroclásticos, de caída y rocas volcánicas altamente intemperizados, y de rocas sedimentarias fuertemente plegadas y fracturas que están sujetos a condiciones de alta precipitación estacional. Esto crea una situación potencialmente peligrosa para más de 500,000 personas que viven en un radio de 27 km alrededor del volcán Pico de Orizaba (Instituto Nacional de Estadística y Geografía —INEGI, 2010). Sin embargo, y a pesar de

la importancia de evaluar los deslizamientos, hay poca cartografía de inventarios y de modelado de deslizamientos. Con base en lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología para la elaboración de un inventario histórico, y el mapa de susceptibilidad a deslizamientos del área de estudio que apoyen en la planeación, prevención y mitigación de riesgos por procesos gravitacionales a las autoridades gubernamentales y al público en general. El inventario fue elaborado a partir de dos series de fotos aéreas digitales y trabajo de campo. Los procesos de remoción en masa fueron digitalizados en el SIG, y se elaboró una base de datos geoespacial para una mejor descripción. El trabajo de campo y la fotointerpretación permitió cartografiar 235 eventos. Con este catálogo se pudo establecer que casi dos terceras partes de los deslizamientos se encuentran en rocas volcánicas, y el resto en rocas sedimentarias. Asimismo, se modeló la susceptibilidad por deslizamientos de tierra mediante un modelo estadístico (Regresión Logística Múltiple —RLM). El modelo está implementado en la aplicación de LOGISNET (desarrollado mediante el uso de macros (AML)) del Programa de Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcInfo Workstation (Legorreta Paulín y Bursik, 2008, 2009). El modelo de susceptibilidad es evaluado y comparado usando una tabla de contingencia y el área bajo la curva de la característica operativa del receptor (COR) que muestra la cantidad de sobreposición entre el inventario y los modelos. Los resultados ilustran que el modelo de RLM tiende a sobrepredicir y que es capaz de acertar a los deslizamientos existentes en un 72.63%. La técnica y la ejecución de cada etapa basadas en los Sistemas de Información Geográfica es presentada y discutida.

Antecedentes

A nivel mundial, la cartografía de susceptibilidad de deslizamientos se ha abordado mediante la compilación de inventarios históricos o multitemporales de deslizamientos y de la modelación de los mismos a través de los SIG (Washington State Department of Natural Resources —DNR, Forest Practices Division, 2006; Hervás y Bobrowsky, 2009; Blahut *et al.*, 2010). El modelado de la susceptibilidad a escala local o regional, se lleva a cabo usando la integración de diversos métodos heurísticos, estadísticos y determinísticos en un SIG (Dai *et al.*, 2002, Lee *et al.*, 2005, Guzzetti *et al.*, 2012). Así mismo, su validación se realiza mediante la compilación y comparación con inventarios detallados utilizando diversos métodos estadísticos, cada uno de los cuales tiene sus propias ventajas y limitaciones (Lan *et al.*, 2004, Metternicht *et al.*, 2005, Frattini *et al.*, 2010, Guzzetti *et al.*, 2012, De Sy *et al.*, 2013). Para la predicción de la susceptibilidad en cuencas con escasa información geotécnica, se ha venido usando el enfoque estadístico. Dentro de los distintos métodos estadísticos la RLM es uno de los más usados ya que en base a variables cartográficas se logra definir bien las zonas que intuitivamente parecen ser susceptibles a deslizamientos (Ohlmacher y Davis, 2003; Yesilnacar Topal, 2005; Ayelew y Yamagishi,

2005; Van Den Eeckhaut *et al.*, 2005; Meisina y Scarabelli, 2007; Deb y ElKadi, 2009; Bai *et al.*, 2010).

En México, aplicaciones basadas en SIG se han utilizado para representar y evaluar la estabilidad de taludes (Capra y Lugo Hubp, 2006; Pérez Gutiérrez, 2007, Secretaría de Protección Civil, 2010; Oliva *et al.*, 2014). A nivel estatal y municipal, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), ha creado un marco general y guías para la preparación de atlas de riesgos de deslizamientos. CENAPRED define en este marco general los conceptos básicos y las explicaciones de los tipos de deslizamientos, los mecanismos de activación, los criterios de evaluación, consideraciones y análisis para el reconocimiento del riesgo a deslizamientos, etc. (CENAPRED, 2004). Por su parte en el área de estudio, la mayor parte de la investigación del volcán Pico de Orizaba durante los últimos treinta años se ha centrado en la historia volcánica para establecer los tipos y mecanismos eruptivos que definen su estructura actual. Así mismo estas investigaciones han permitido la zonificación del peligro potencial de los eventos volcánicos y de colapso de sus flancos (De la Cruz-Reyna y Carrasco Núñez, 2002; Macías, 2005). Así por ejemplo, mediante el uso de Percepción Remota (PR) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han venido evaluando y cartografiando a escala regional o local los riesgos de catastróficos deslizamientos y flujos de escombros (Sheridan *et al.*, 2001; Zimbelman *et al.*, 2004; Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2004; Concha-Dimas *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2006; Hubbard *et al.*, 2007; Secretaría de Protección Civil, 2010). A escala regional, en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba, se realizó un análisis general de las condiciones climatológicas y geológicas que dispararon un flujo de baja concentración en el valle inferior del Río Chiquito Muerto-Barranca (Rodríguez *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2011). Esta cuenca es aledaña a la zona de estudio, en ella también se creó un inventario y mapas de susceptibilidad a deslizamientos (Legorreta *et al.*, 2013). El estudio utilizó la Regresión Logística Múltiple (RML) y SINMAP. El modelo RML predijo un 72.33% de las áreas de deslizamiento, mientras que el SINMAP con valores derivados de la literatura y el trabajo de campo fue capaz de predecir sólo el 45.39% (Legorreta *et al.*, 2013).

Área de estudio

La cuenca del río La Carbonera se encuentra en el estado de Veracruz, a los 18° 58' 45.78"-18° 49' 26.83" N y 97° 15' 34.62"-97° 08' 7.44" O. La cuenca se localiza en el flanco sureste del volcán Pico de Orizaba, en la parte oriental de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico-Trans-Mexico (CVTM) (Figura 1). Desde el punto de vista administrativo, el área de estudio pertenece al municipio de Ixhuatlancillo, La Perla, Maltrata, Mariano Escobedo, Nogales y Río Blanco. El río La Carbonera es afluente del Río Blanco, que desemboca en el Golfo de México. La cuenca se

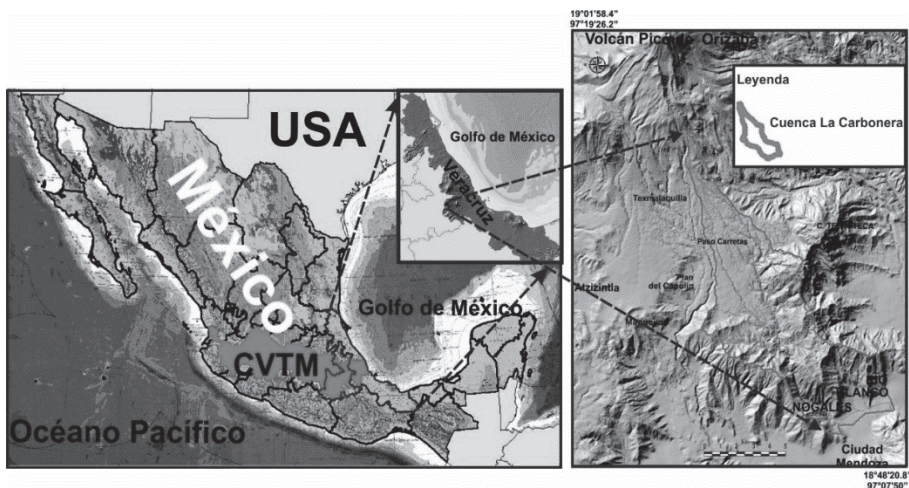


Figura 1. Localización del área de estudio.

encuentra cubre un área de 71.9 km² con un rango de elevación de 1,224 a 1,345 msnm. El área es afectada de manera importante por procesos gravitacionales, flujos de escombros y lodo debido a la combinación de varios factores, tales como la alta precipitación, cambio en el uso del suelo causados por la tala intensiva, el alto grado de meteorización de las rocas localizadas a gran elevación y en laderas de fuerte pendiente.

En la cuenca, las pendientes de las laderas están controladas por los tipos de rocas volcánicas o sedimentarias existentes, así, por ejemplo, los escarpes de más de 45° consisten en coladas de lava. Laderas con pendiente fuerte, de entre 32 y 45° presentan intercalaciones de conglomerados cementados, aglomerados y depósitos de lahares. En las partes bajas de la cuenca, depósitos sedimentarios calizas y lutitas, constituyen laderas de hasta 32°.

La lluvia en el área de estudio se concentra principalmente en el verano boreal (de mayo a noviembre) y se debe principalmente a su ubicación al norte de la Zona de Convergencia Intertropical, a la influencia de los vientos del oeste y a la formación de sistemas de baja presión en el Golfo de México. La máxima precipitación media anual es de 1,000-1,100 mm/año a > 4,000 msnm y 927 mm/año a <1,500 msnm, y la mayoría caen como lluvia durante tormentas estacionales entre mayo y noviembre. La contribución de la lluvia por los huracanes es importante porque algunos de estos eventos impactan en las colinas del volcán Pico de Orizaba (Jauregui, 1995; García, 2004). El clima es semifrío subtropical (Cb '(w)) a 3,000-4,400 msnm y subtropical templado, subhúmedo (C (w1), C (w2)) y C (m) (f) y tropical semicálido, húmedo (A) C (m) (f) a <3,000 msnm (García, 2004). De esta manera, el área de estudio es

propensa al deslizamiento debido tanto al material volcánico intemperizado y no consolidado, como al sedimentario plegado y fracturado que se encuentra bajo precipitaciones estacionales altas.

Metodología

La metodología comprende dos etapas principales de análisis para la elaboración del inventario y la modelación de la susceptibilidad a deslizamientos. Etapa 1 es la elaboración de un inventario de deslizamientos históricos (pasos 1 a 6 en la Figura 2) y, etapa 2 calcular la susceptibilidad para la cuenca y evaluación del modelo (paso 7 en la Figura 2). Las técnicas y su aplicación basada en el SIG es la siguiente (Figura 2).

Una vez seleccionada el área de estudio, se recopila en la primera etapa la información preexistente para proporcionar contexto y establecer una caracterización generalizada de los procesos de deslizamiento dentro de la cuenca. Esto permite no solo evitar la duplicidad de trabajos, pero también el poder definir los alcances y limitaciones del trabajo en cuanto a la escala y resolución del pixel a trabajar, el tamaño máximo de deslizamiento a cartografiar y el tipo de generalización cartográfica a realizar para el mapa final.

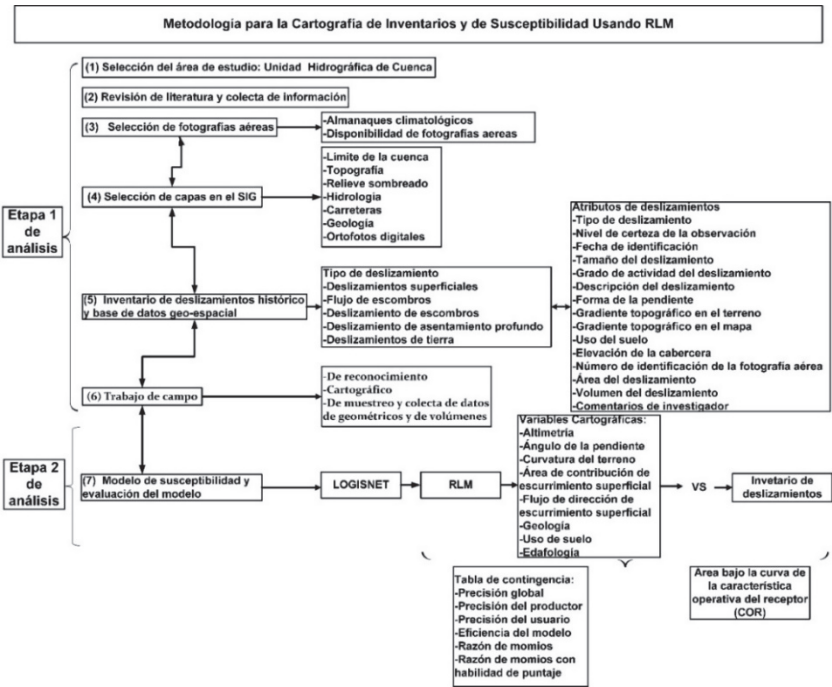


Figura 2. Procedimiento general para la realización de la cartografía del inventario, y de la susceptibilidad de deslizamientos.

La información preexistente incluye geología, uso de la tierra, clima, edafología e hidrología (incluyendo datos sobre eventos de grandes tormentas), mapas e informes de deslizamientos previos, etc. La información fue georreferenciada e incorporada al SIG ArcMap. Las ocho variables independientes utilizadas para el análisis se obtuvieron de la siguiente manera: del INEGI se obtuvo el mapa altimétrico (con resolución de 10 m) a partir del mapa topográfico del área a una escala de 1:50,000. Derivados del mapa altimétrico, también se obtuvieron los mapas temáticos de pendientes, de curvatura del terreno, y de flujo y de contribución de escurrimiento superficial. Los mapas en papel de geología a escala 1:50,000; de uso del suelo, y edafología a escala 1:250,000 se convirtieron a un formato 'raster' de 10 m de resolución. Estos mapas fueron georreferenciados e incorporados como una capa de información más dentro del SIG. Estas capas digitales sirvieron para producir un mapa base inicial como apoyo en la fotointerpretación de deslizamientos.

Los deslizamientos en el área de estudio fueron identificados mediante fotointerpretación de dos series de fotos aéreas y trabajo de campo para crear un solo mapa histórico de inventario de deslizamientos. Las fotos aéreas cubren un período de 14 años. La primera serie es del año 1994 a escala 1:20,000 y la otra serie es del año 2008 a escala de 1:10,000. Durante la fotointerpretación, los deslizamientos fueron clasificados y cartografiados en deslizamientos superficiales, flujos de escombros-avalancha, deslizamientos de asentamiento profundo, flujos de escombros y tierra, por corte en meandro y caída de rocas, de acuerdo con los criterios del Washington State Department of Natural Resources (DNR), Forest Practices Division (2006), Cruden y Varnes (1996), y Wieczorek (1984). Todos los deslizamientos de tierra fueron digitalizados en el SIG. La fotointerpretación estuvo apoyada con el trabajo de campo al realizarse un 25% de verificación de deslizamientos interpretados en las fotos aéreas. Esto permitió aumentar la confianza en la evaluación de deslizamientos.

Para la segunda etapa, la susceptibilidad a deslizamientos en las laderas fue cartografiada usando RLM. En el análisis de RLM, se utilizaron ocho variables independientes en el análisis (altimetría, pendientes, curvatura del terreno, área de contribución de escurrimiento superficial, flujo de dirección de escurrimiento, geología, uso del suelo y edafología). Estas variables fueron examinadas a través del Factor de Inflación de la Varianza (VIF) para diagnosticar su posible multicolinealidad y codificadas para ser usadas en el análisis (Tabla 1).

La RLM fue calculada utilizando el método *backward* (retrospectivo). El método retrospectivo se refiere a examinar las variables dentro del modelo para ver si alguna ella(s) debe ser eliminada(s) del análisis. El método retrospectivo comienza el modelo con todas las variables independientes y las va probando una a una para ver cuál de éstas puede ser removida del modelo sin tener un efecto sustancial sobre lo bien que el modelo se ajusta a los datos observados (Field, 2005). Una vez anali-

Tabla 1
VARIABLES Y LA CODIFICACIÓN USADA EN LA RLM

<i>Índice</i>	<i>Variable</i>
	<i>Altimetría</i>
No codificada	Datos en crudo
	<i>Ángulo de la pendiente</i>
No codificada	Datos en crudo
	<i>Curvatura de la pendiente</i>
-1	Relieve cóncavo
0	Relieve plano
1	Relieve Convexo
	<i>Área de contribución de escurrimiento superficial</i>
No codificada	Datos en crudo
	<i>Flujo de dirección del escurrimiento superficial</i>
No codificada	Datos en crudo
	<i>Geología</i>
1	Cuaternario (Aluvión) (Q(al))
2	Cuaternario (Brecha sedimentaria) (Q(bs))
3	Cuaternario (Toba volcánica ácida) (Q(Ta))
4	Terciario Superior (Andesita) (Ts(A))
5	Terciario Superior (Toba volcánica intermedia) (Ts(Ti))
6	Terciario Superior (Brecha volcánica intermedia) (Ts(Bvi))
7	Cretácico Superior (Caliza) (Ks(cz))
	<i>Uso del suelo</i>
1	Agricultura de subsistencia
2	Pastoreo
3	Pastizal alpino
4	Bosque de oyamel (<i>Abies religiosa</i>)
5	Bosque de pino
6	Bosque de pino-encino
7	Bosque de encino
	<i>Edafología</i>
1	Andosol
2	Camisol
3	Feozem
4	Litosol
5	Luvisol
6	Regosol
7	Rendzina
8	Vertisol

zada, la probabilidad de deslizamientos fue asignada píxel por píxel al mapa de susceptibilidad con base en la función logística. La función logística estima la probabilidad de que ocurra un evento (como lo son los deslizamientos) (Ecuación 1) (Kleinbaum y Klein, 2002; Dai y Lee, 2002).

$$p(Y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \dots \beta_k X_k)}} \quad (1)$$

Donde $p(Y = 1)$ es la probabilidad de deslizamientos, e es la base de los logaritmos naturales, $(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots \beta_k X_k)$ representa un índice que combina la contribución de varios factores de riesgo, X_k son las variables independientes (uso del suelo, geología, pendiente, etc.) y α y β son coeficientes que representan la intersección y las pendientes de la línea de regresión, respectivamente, para cada parámetro de entrada.

De las ocho variables cartográficas, sólo cuatro fueron seleccionadas a través del análisis VIF y de la selección hecha por el modelo, quedando la función logística como:

$$1/[1 + \text{Exp}(-2.071975 + \text{Mapa de escurrimiento superficial } (-0.008804) + \text{Mapa de pendientes } (0.097746) + \text{Mapa de curvatura } (-0.857686) + \text{Mapa de geología } (-0.865195))]$$

Esta función fue cartografiada a través del uso de sistema LOGISNET (Legorreta Paulín y Bursik, 2009). Un esquema subjetivo de diez clases se utilizó para clasificar y mostrar la probabilidad de deslizamientos a intervalos de 0.1 (Figura 3b).

Para evaluar el desempeño de los modelos, se realizó un análisis cuantitativo por medio de una tabla de contingencia entre el mapa resultante del modelo de RLM y el mapa del inventario de deslizamientos. De la tabla de contingencia se extrajeron las siguientes estadísticas: Precisión del productor (*Produce's accuracy*), que representa la razón entre el número de píxeles clasificados correctamente en cada categoría y el número total de píxeles verdaderos para esa categoría). Precisión del usuario (*User's accuracy*), calculada como la razón entre el número de píxeles correctamente clasificados en cada categoría y el número total de píxeles que están clasificados por el modelo en esa categoría. Razón de momios (*Odd ratio*) que representa la razón entre el producto del número de píxeles clasificados correctamente en cada categoría y el producto del número de píxeles clasificados incorrectamente en cada categoría y la eficiencia del modelo (*Model efficiency*), calculado como la razón del número de píxeles indicados correctamente como píxeles de deslizamiento, menos el número de píxeles indicados incorrectamente como píxeles de deslizamiento, entre el número total de los píxeles que representan verdaderos deslizamientos en el mapa del inventario correspondiente (Stephenson, 2000; Van Den Eeckhaut *et al.*, 2005). También se usó el área bajo la curva de la característica operativa del receptor (COR) calculado con el programa SPSS. El área bajo la curva se define trazando en un gráfico bidimensional de pares de sensibilidad (razón de píxeles positivos verdaderos) y especificidad (razón de píxeles falsos positivos) (Fawcett, 2006; Namdi y Shakoore, 2009; Günther *et al.*, 2014).

Resultados

El estudio muestra que las condiciones geológicas controlan la abundancia de deslizamientos en la cuenca. De los 235 deslizamientos cartografiados que cubren 0.094 km², el 82.2% de los procesos gravitacionales se encuentran en roca volcánica o depósitos, y el resto están en rocas sedimentarias y depósitos (Figura 3).

El inventario de deslizamientos muestra que, en la cuenca, los deslizamientos superficiales (incluyendo flujos, y deslizamientos de escombros) son el tipo de proceso predominante por número (94.5%), seguidos de los deslizamientos rotacionales de asentamiento profundo (3%) y, caídas de roca (2.51%).

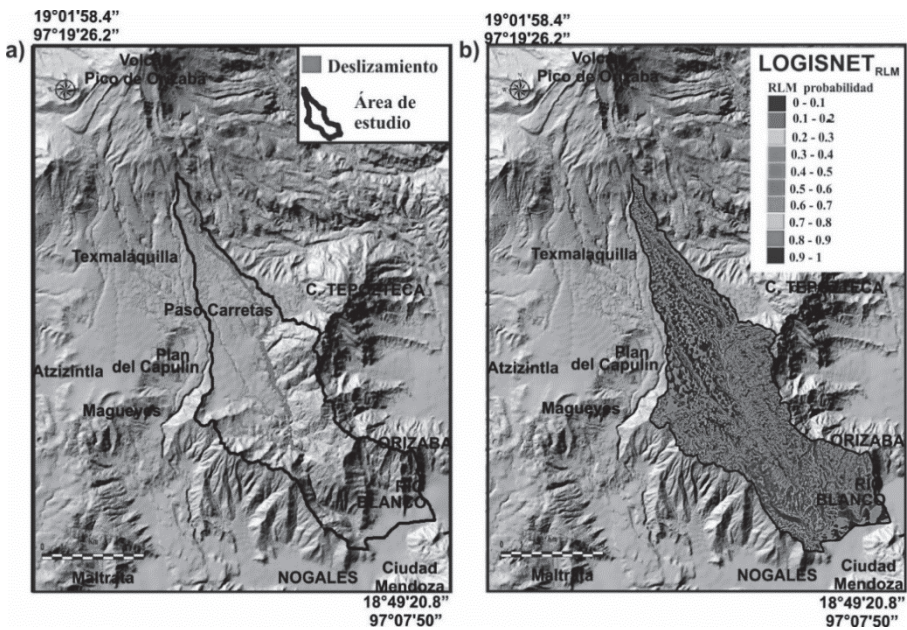


Figura 3. a) Inventario de deslizamientos, b) Modelo de susceptibilidad de RLM.

Cualitativamente, el modelo muestra una alta inestabilidad a lo largo de las zonas montañosas volcánicas y sedimentarias y a lo largo de las paredes del valle donde existen fuertes pendientes. La sobreposición y grado de similitud entre el inventario de deslizamientos y la predicción de los modelos no es perfecta, y existe claramente una sobre-predicción en el modelo. Sin embargo, la sobrepredicción se da en áreas que tienen las condiciones necesarias para deslizarse a futuro, como se pudo observar durante el trabajo de campo. Cuantitativamente, la eficiencia de la RLM, se evaluó en términos de precisión del productor, la precisión del usuario, la razón de momios y la eficiencia del modelo, así como por el área bajo la curva COR. El COR indica

una buena capacidad predictiva para RLM pues el área bajo la curva es del 80.9% (Figura 4). Esto también se ve corroborado con las estadísticas obtenidas de la tabla de contingencia (Tabla 2). El modelo tiene una alta presión global (72.69%) a pesar de que esta estadística global pondera más la categoría más predominante, en este caso la clase de sin-deslizamientos.

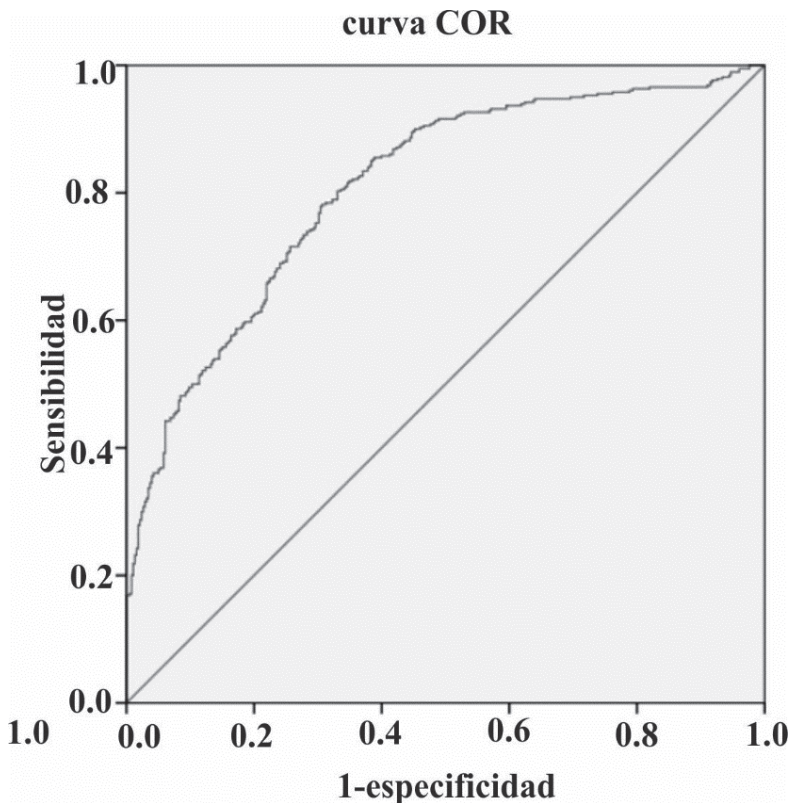


Figura 4. a) Área bajo la curva de la característica operativa del receptor (COR) para el modelo de RLM.

La precisión del productor muestra que la predicción de la RLM tiene buena coincidencia (72.63%) con el mapa del inventario de deslizamientos. Esto indicaría que si supiéramos que un área en particular está afectada por deslizamientos (y se ha verificado en campo), la probabilidad de que el modelo identifique correctamente ese píxel como deslizamientos sería del 72.63%. Por su parte la precisión del usuario indica que, si el investigador seleccionara cualquier píxel que representase un deslizamiento en el mapa del modelo de RLM, tendría el 72.82% de probabilidad de que el investigador se ubique en un deslizamiento cuando visite esa ubicación del píxel

en campo. El modelo también tiene valores positivos en la razón de momios y en la prueba de eficiencia del modelo, lo que indica que el modelo ha predicho correctamente. Esta “buena concordancia” de la RLM con el inventario se debe a una sobre-predicción. El modelo sobre-predice como se muestra por su bajo porcentaje en la eficiencia del modelo. La eficiencia del modelo tiene un valor máximo de uno cuando el modelo ha indicado todos los deslizamientos de tierra correctamente, y tiene un valor negativo cuando el número de deslizamientos incorrectamente indicados por el modelo, es mayor que el número de deslizamientos correctamente predicho (Van Den Eeckhaunt *et al.*, 2005).

Tabla 2
Estadísticas de comparación del modelo

<i>LOGISNET_{RLM} (Método “backward”)</i>	
Área bajo la curva COR	80.9%
Precisión Global	72.69%
	Landslide área
Precisión del Producto	72.63%
Precisión del Usuario	72.82%
Eficiencia del Modelo	0.46
Razón de momios	7.08

Conclusiones

Este trabajo presentó y examinó brevemente la implementación de un método cartográfico para la creación de un inventario de deslizamientos mediante trabajo de campo, la interpretación series de fotos aéreas e información temática dentro de un SIG. Asimismo se abordó el método estadístico de la regresión logística múltiple para la obtención de cartografía de susceptibilidad a deslizamientos. Al plantear directamente la metodología para la cartografía de deslizamientos, las autoridades locales, tales como protección civil del estado de Veracruz y otras organizaciones gubernamentales se beneficiarán con respecto a la mitigación y a la planificación de la susceptibilidad de deslizamientos. Se hace énfasis en el hecho de que el estudio es el primer prototipo en el área de interés para desarrollar una metodología SIG más robusta y sistemática en la creación de inventarios, y de modelado de susceptibilidad. Por lo tanto, está sujeta a adaptación, modificación y mejora usando validación de campo adicional y cartografía temática más a detalle. Estamos conscientes de la li-

mitación técnica del inventario de deslizamientos, cuya calidad depende de la complejidad del área de estudio, y de la confiabilidad de la información disponible para identificar los deslizamientos. Así por ejemplo, el uso de los mapas temáticos con 10 m en resolución para el análisis de la RLM es una limitante, ya que a esta resolución pequeños deslizamientos de tierra pueden llegar a perder su representación cartográfica y por lo tanto es difícil entrenar el modelo para separar áreas con deslizamiento de las áreas sin deslizamientos. A pesar de sus limitaciones, el inventario de deslizamientos y el modelado del río La Carbonera tienen el potencial de ser la base de una metodología integral para gestionar y apoyar los estudios de pronóstico de inestabilidad de laderas.

El análisis de la RLM ha mostrado en el área de estudio una correlación de la ocurrencia de deslizamientos con cuatro de ocho variables cartográficas: escurrimiento superficial, las pendientes, la curvatura del terreno y la geología. Entre ellas la curvatura, la geología es de las más decisivas en la detección de deslizamientos de tierra. La evaluación del desempeño del modelo de RLM muestra que el modelo es estadísticamente válido, pero tiende a la sobre-predicción. La sobre-predicción podría explicarse por las diferentes escalas de mapas temáticos; precisión del mapeo de los deslizamientos en función a la experiencia del investigador, y el grado de actualización de la cartografía existente. Por ejemplo, el mapa topográfico es de 2006, por lo tanto, el mapa altimétrico y sus derivados no tiene expresión de deslizamientos superficiales recientes. Pese a ello, el mapa de susceptibilidad alcanza la exactitud científica requerida y la accesibilidad técnica para abordar temas de mitigación de amenazas y planificación en áreas con escasa información.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades del Departamento de Geología de la Universidad de Buffalo, el Consorcio Internacional sobre Deslizamientos (ICL), a las Divisiones de Prácticas Forestales y de Geología y Recursos Naturales del Departamento de Recursos Naturales (DNR) del Estado de Washington por su ayuda. Esta investigación fue financiada por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), UNAM, no. IN10215.

Bibliografía

- Ayelew, L. and Yamagishi, H., "The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan", *Geomorphology*, no. 65, 2005, pp. 15-31.
- Bai, S.B.; Wang, J.; Lü, G.N.; Zhou, P.G.; Hou, S.S.; Xu, S.N., "GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China", *Geomorphology*, no. 115, 2010, pp. 23-31.

- Blahut, J.; Van Westen, C.J.; Sterlacchini, S., “Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas”, *Geomorphology*, vol. 119, nos. 1-2, 2010, pp. 36-51.
- Capra, L.; Lugo-Hubp, J.; Zamorano, J.J., “La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México”, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, núm. 58, vol. 2, 2006, pp. 205-214.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), *Guía básica para la elaboración de mapas estatales y municipales de peligros de riesgos*, Secretaría de Gobernación, México, 2004, 389 pp.
- Clerici, A.; Perego, S.; Tellini, C.; Vescovi, P., “Landslide failure and runout susceptibility in the upper T. Ceno valley (Northern Apennines, Italy)”, *Nat Hazards*, no. 52, 2009, pp. 1-29.
- Concha-Dimas, A.; Cerca, M.; Rodríguez-Elizarrarás, S.; Watters, R.J., “Geomorphological evidence of the influence of pre-existing basement structure on emplacement and deformation of volcanic edifices at the Cofre de Perote-Pico de Orizaba chain and implications for avalanche generation”, *Geomorphology*, no. 72, 2005, pp. 19-39.
- Cruden, D.M.; Varnes D., “Landslide types and processes”, in Turner A.K.; Shuster R.L. (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*, *Transp. Res. Board, Spec. Rep.*, no. 247, 1996, pp 36-75.
- Dai, F.C.; Lee, C.F.; Ngai, Y.Y., “Landslide risk assessment and management: an overview”, *Engineering Geology*, no. 64, 2002, pp. 65-87.
- Deb, S.K. and El-Kadi, A.I., “Susceptibility assessment of shallow landslides on Oahu, Hawaii, under extreme-rainfall events”, *J. of Geomorphology*, no. 108, 2009, pp. 219-233, Online Copy: doi: 10.1016/j.geomorph.2009.01.009.
- De la Cruz-Reyna, S. y Carrasco-Núñez, G., “Probabilistic hazard analysis of Citlaltépetl (Pico de Orizaba) Volcano, eastern Mexican Volcanic Belt”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 113, 2002, pp. 307-318.
- De Sy, V.; Schoorl, J.M.; Keesstra, S.D.; Jones, K.E.; Claessens, L.F.G., “Landslide model performance in a high resolution small-scale landscape”, *Geomorphology*, núm. 190, 2013, pp. 73-81.
- Fawcett, T., “An introduction to ROC analysis”, *Pattern Recognit. Lett.*, no. 27, 2006, pp. 861-874.
- Frattini, P.; Crosta, G.B. y Carrara, A., “Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models”, *Engineering Geology*, vol. 111, nos. 1-4, 2010, pp. 62-72, doi:10.1016/j.enggeo.2009.12.004.
- Field, A., *Discovering Statistics Using SPSS for Windows: Advanced Techniques for Beginners (Introducing Statistical Methods)*, second ed. Sage Publications, Thousand Oaks, CA, 2005, 816 pp.

- García, E., *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, Instituto de Geografía, UNAM, Serie Libros 6, 2004.
- Guthrie, R.H.; Hockin, A.; Colquhoun, L.; Nagy, T.; Evans, S.G. y Ayles, C., “An examination of controls on debris flow mobility: Evidence from coastal British Columbia”, *Geomorphology*, vol. 114, no. 4, 2010, pp. 601-613.
- Günther, A.; Van Den Eeckhaut, M.; Malet, J.P.; Reichenbach P. y Hervás, J., “Climate-physiographically differentiated Pan-European landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation and transnational landslide information”, *Geomorphology*, no. 224, 2014, pp. 69-85.
- Guzzetti, F.; Mondini A.C.; Cardinali M.; Fiorucci F.; Santangelo M. and Chang K.T., “Landslide inventory maps: new tools for an old problem”, *Earth Science Review*, no. 112, 2012, pp. 42-66.
- Hervás, J. and Bobrowsky, P., “Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk”, in Sassa, K. and Canuti, P. (Eds.), *Landslides - Disaster Risk Reduction*, Springer, Berlin, 2009, pp. 321-349.
- Hubbard, B.E.; Sheridan, M.F.; Carrasco-Nunez, G.; Díaz-Castellon, R. y Rodriguez, S., “Comparative lahar hazard mapping at Volcan Citlaltépetl, Mexico using SRTM, ASTER and DTED-1 Digital Topography”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 160, no. 1, 2007, pp. 99-124.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Geología Serie I. Escala 1:250 000, 2009, CD.
- , Censo de población y vivienda 2010, <<http://www.inegi.org.mx/Sistemas/temasV2/Default.aspx?s=est&c=17484>>.
- Jauregui, E., “Rainfall fluctuations and tropical storm activity in Mexico”, *Erkundung*, no. 49, 1995, pp. 39-48.
- Kleinbaum, D.G., Klein, M., *Logistic Regression: A Self-learning Text* (Second edition), New York, Springer, 2002, 513 pp.
- Lan, H.X., Zhou, C.H., Wang, L.J., Zhang, H.Y., Li, R.H., “Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China”, *Engineering Geology*, 76, 2004, pp. 109-128.
- Lee, S., “Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26, no. 7, 2005, pp. 1477-1491.
- Legorreta Paulín, G., Bursik, M., Ramírez-Herrera, M.T., Contreras, T., Polenz, M., Lugo H.J., Paredes-Mejía L.M., Arana-Salinas, L., “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, no. 3, 2013, pp. 371-385.

- Legorreta Paulín G., Bursik, M., *Assessment of landslides susceptibility: LOGISNET: a tool for multimethod, multilayer slope stability analysis*, ISBN: 9783639154771, Editor, VDM Verlag Dr. Müller, USA, 2009, 360 pp.
- , *Logisnet: a tool for multimethod, multiple soil layers slope stability analysis*, 2008, Comput Geosci. doi:10.1016/j.cageo.2008.04.003
- Macías, J.L., “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. LVII, no. 3, 2005, pp. 379-424.
- Meisina, C., Scarabelli, S., “A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils”, *Geomorphology*, no. 87, 2007, pp. 207-223.
- Metternicht, G., Hurni, L., Gogu, R., “Remote sensing of landslides: an analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments”, *Remote Sensing of Environment*, no. 98, 2005, pp. 284-303.
- Mikoš, M., Fazarinc, R., Ribičič, M., “Sediment production and delivery from recent large landslides and earthquake-induced rock falls in the Upper Soča River Valley, Slovenia”, *Engineering Geology*, no. 86, 2006, pp. 198-210.
- Mora González Ignacio; Wendy Morales Barrera, Sergio Rodríguez Elizarrarás (comp.), *Atlas de peligros geológicos e hidrometeorológicos del estado de Veracruz*, , Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, Xalapa, UNAM, 2010.
- Namdi, A. and Shakoor, A., “A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses”, *Engineering Geology*, no. 10, 2009, pp. 11-20.
- Ohlmacher, G.C. y Davis, J.C., “Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA”, *Engineering Geology*, no. 69, 2003, pp. 331-343.
- Oliva González, A.O.; Jiménez, D.M.; Alvarez Garcia, I.N.; Nicieza, C.G.; Álvarez Vigil, A.E., “Hillside instability in the tijuana metropolitan area. Analysis of landslide-provoked building collapse”, *Engineering Failure Analysis*, no. 46, 2014, pp. 166-178.
- Pérez-Gutiérrez, R., “Análisis de la vulnerabilidad por los deslizamientos en masa, caso: Tlacuitlapa, Guerrero”, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 59, no. 2, 2007, pp. 171-181.
- Rodríguez, S.; Mora, I. y Murrieta, J., “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, no. 2, 2006, pp. 223-236.

- Rodríguez, S.; Mora, I.; Murrieta, J. y Morales, B.W.V., *Peligros geológicos más frecuentes en el estado de Veracruz*, Universidad Veracruzana Xalapa, Veracruz, México, 2011, 85 pp.
- Sheridan, M.F.; Carrasco-Núñez, G.; Hubbard, B.; Siebe, C. y Rodríguez, S., *Mapa de Peligros del volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba)*. Esc: 1:250,000, Ciudad Universitaria, México, diciembre, 2001.
- Stephenson, D.B., "Use of the "odds ratio" for diagnosing forecast skill", *Weather Forecasting*, no. 15, 2000, pp. 221-232.
- Van Den Eeckhaunt, M.; Poesen, J.; Verstraeten, G.; Vanacker, V.; Moeyersons, J.; Nyssen, J. and Van Beek, L.P.H., "The effectiveness of hillshade maps and expert knowledge in mapping old deep-seated landslides", *Geomorphology*, no. 67, 2005, pp. 351-363.
- Washington State Department of Natural Resources (DNR), Forest Practices Division, 2006, Landslide Hazard Zonation (LHZ) Mapping Protocol, version 2.0, accessed at: <http://www.dnr.wa.gov/BusinessPermits/Topics/LandslideHazardZonation/Pages/fp_lhz_review.aspx>.
- Wieczorek, G.F., "Preparing a detailed landslide inventory map for hazard evaluation and reduction", *Bulletin of the Association of Engineering Geology*, no. 21, 1984, pp. 337-342.
- Yesilnacar, E. y Topal, T., "Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey)", *Engineering Geology*, no. 79, 2005, pp. 251-266.
- Zimelman, D.R.; Watters, R.J.; Firth, I.R.; Breit, G.N. and Carrasco-Nunez, G., "Stratovolcano stability assessment methods and results from Citlaltépetl, Mexico", *Bull Volc*, no. 66, 2004, pp. 66-79.