

Modelo SIG para la zonificación de peligro por inestabilidad de laderas - Caso de estudio: área metropolitana de Monterrey, México

Fabiola Doracely YÉPEZ-RINCÓN¹, Nelly Lucero RAMÍREZ-SERRATO¹, Juan José AGUILAR DURÁN¹, Víctor Hugo CABALLERO-RAMÍREZ², Diego Fabián LOZANO-GARCÍA³, Víctor Hugo GUEARRA-COBIÁN¹ y Fernando JIMENEZ-MIGUEL¹

Abstract: *SIG MODEL FOR ZONATION OF SLOPE INSTABILITY HAZARD - CASE STUDY: METROPOLITAN AREA OF MONTERREY, MEXICO.* The number of landslide events and rockfalls have been increasing during the last decades in the Metropolitan Area of Monterrey (AMM) that had been considered as a vulnerable area to mass removal processes due to the accelerated urbanization process. The population, that has now 4 million inhabitants, continues to increase, as well as the pressure for new developments that modify the topography, changes the land use and therefore, interfere with the flows and course of runoff, decreasing the levels of infiltration and representing the detonating factors for the generation of mass removal. For this project, slope instability was modeled using a GIS that incorporated the topographic factors (obtained from the digital elevation model, with a scale at 1 m, obtained from the classification of a LIDAR flight) as well as geotechnical and environmental factors. In addition, other official environmental factors available on-line were obtained such as soil use, surface hydrological currents, lithology, structural geological data and roads provided in vector format. The model was made through a linear sum of the reclassification of the layers, zonification the levels of danger by instability of slopes. The result is a mass-scale hazard map on the middle scale of the City of Monterrey, which serves as the basis for identifying areas where specific studies are required. The result is a map of (1: 10.000 - 1: 50.000) mass movement hazard of the City of Monterrey, which serves as the basis for identifying areas where specific studies are required.

Resumen: El número de eventos por deslizamientos y caídos ha aumentado durante las últimas décadas dentro del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), considerada un área vulnerable a los fenómenos de remoción de masas que se ha interpretado como una consecuencia del acelerado proceso de urbanización. La población de más de 4 millones de habitantes continúa aumentando, así también la presión por nuevos desarrollos que modifican la topografía, cambian el uso de suelo y por lo tanto interfieren en los flujos y rumbo de los escurrimientos, disminuyendo los niveles de infiltración y representando los factores detonantes para la generación de remoción en masa. Para este proyecto, se modeló la inestabilidad de laderas utilizando un SIG que incorporó los factores topográficos (se obtuvieron a partir del modelo de elevación digital, con escala a 1 m, obtenido a partir de la clasificación de un vuelo LIDAR) así como factores geotécnicos y ambientales. Adicionalmente, se obtuvieron otros factores ambientales disponibles on-line de calidad oficial como uso de suelo, corrientes superficiales hidrológicas, litología, datos geológicos estructurales y carreteras proporcionados en formato vectorial. El modelo fue realizado, a través de una suma lineal de las reclasificación de las capas, se zonificaron los niveles de peligro por inestabilidad de laderas. El resultado es un mapa de peligro por movimientos de masa a escala mediana (1:10.000 - 1:50.000) de la Ciudad de Monterrey, el cual sirve de base para identificar zonas en donde se requieran estudios específicos.

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Calle Pedro de Alba s/n, Centro, 64000 San Nicolás de los Garza, N.L., México.

e-mail: fabiolayopez@gmail.com, e-mail: nellymzserrato@gmail.com, e-mail: juanoad9@hotmail.com, e-mail: cobian64@hotmail.com
e-mail: ingenieria_fer@hotmail.com

² TEEB-CON Servicios, Ingenierías y Proyectos S.A. de C.V. Calle Vía Vizcaya 2901. Col. Más Palomas C.P. 64780. Monterrey, Nuevo León. Calle Aarón Sáenz 457, Col. Peña Guerra C.P. 66490. San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

e-mail: viktor.caballero@gmail.com

³ Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Monterrey, Nuevo León, México.

e-mail: dfozano@itesm.mx

Palabras clave: Modelos digitales. Riesgos. Gestión de recursos. Sensores remotos.

Key words: Digital models. Risks. Resources management. Remote sensing.

Introducción

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM), con una población de más de 4 millones de habitantes continúa aumentando su densidad y expansión, así también la presión por nuevos desarrollos que modifican la topografía, cambian el uso de suelo y por lo tanto interfieren en los flujos y rumbo de los escurrimientos, disminuyendo los niveles de infiltración, incrementando la vulnerabilidad del sistema ante la aparición de los factores detonantes que generan la remoción en masa. En el año 2015, con el apoyo por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para la ejecución del proyecto, se realizó un modelo en donde se proyecta el peligro por inestabilidad de laderas del AMM en un ambiente de Sistemas de Información Geográfica, SIG, que incorporara los distintos factores topográficos (provenientes de un escaneo realizado con LIDAR aéreo del 2010), geotécnicos, ambientales y de infraestructura. Este modelo representa un análisis multicriterio de aditivas ponderadas, que incluye como factor detonante la precipitación que fue utilizada para zonificar los niveles de peligro por inestabilidad de laderas en los cerros.

La geología, relieve topográfico, clima y vegetación convierten al Área Metropolitana de Monterrey (AMM) en un área vulnerable a los fenómenos de remoción de masa. El número de eventos por deslizamientos y caídos ha aumentado durante las últimas décadas, lo cual se ha interpretado como una consecuencia del acelerado proceso de urbanización (Chapa *et al.*, 2010; Knapen *et al.*, 2006), la densificación de su población, que es mayor a los 4 millones de habitantes y con densidades de 580 hab/km² (INEGI, 2010). Las modificaciones topográficas y de uso de suelo cambian el flujo y rumbo de los escurrimientos (Doyle *et al.*, 2000), disminuyen los niveles de infiltración y son detonantes para la generación de remoción en masa

(Lepore *et al.*, 2011), aumentándose las probabilidades de ocurrencia, especialmente durante huracanes cuando se multiplica la intensidad y duración de precipitación (Murillo, 2002).

El AMM tiene un promedio de 35 mm anuales de lluvia, sin embargo, durante el huracán Alex alcanzó hasta 70 mm en 3 días. La duración de las lluvias en la zona es otra variable que se ve afectada, los huracanes y sus remanentes prolongan los períodos de lluvias debido a fenómenos relacionados al cambio climático (p.e. el fenómeno El Niño). Aunque en el AMM se han identificado algunas zonas riesgosas para la población por presentar derrumbes de laderas, la ciudad continúa creciendo dentro de ellas. Algunos ejemplos de éstas zonas son: Cerro de las Mitras, Cerro del Topo Chico, Cerro de la Silla, Cerro de la Loma Larga, Cañón del Hualjuco, Cerro del Mirador, Meseta de Chipinque (Cantú Silva, 2012) o Cerro de La Corona. Durante el inicio del proyecto, en el año 2015, se presentaron dos eventos (el último en Febrero del 2015) en el Cerro de la Corona, los cuales sucedieron en áreas de pendientes mayores a 40° y que presentan edificación, infraestructura y equipamiento dañados. Solo dos familias han sido desalojadas de la colonia Cerro de la Corona por Protección Civil, pero se desconoce si se están realizando evaluación de daños. Es por lo anterior que, el mapeo y delimitación de áreas susceptibles a derrumbes es esencial para las actividades de uso de suelo, manejo y toma de decisiones en áreas montañosas (Dai y Lee, 2002). El enfoque geoespacial, para el modelado SIG, superpone parámetros físicos con base en la influencia que estos tienen en el incremento de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos y los proyecta a distintas escalas (Van Westen, 2000).

Las técnicas implementadas para modelar la probabilidad de ocurrencia de eventos de remoción en masa tienen 4 décadas asociándose a métodos que involucran sensores remotos a diferentes escalas (Goetz *et al.*, 2011). Los avances

en la tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging*) permiten llegar a un nivel de resolución de datos que recientemente se ha incorporado a los estudios de remoción en masa, especialmente por su gran potencial para la evaluación de factores topográficos y geotécnicos. El uso de datos LIDAR y su fusión con otros sensores de alta resolución por medio de un SIG representan el mejor método de evaluación de las características morfológicas de la superficie real, a escala regional y brindan la precisión necesaria para la determinación de movimientos de rocas de distintos tamaños en laderas (Rosser *et al.*, 2010). Al ser una tecnología activa de alta resolución, LIDAR es capaz de proporcionar mediciones topográficas tridimensionales precisas que permiten reconstruir la geometría de la pendiente, para localizar el área fuente de caída de rocas, lo cual permite disminuir los sesgos de la modelación, que anteriormente sólo utilizaba la experiencia de los geocientíficos involucrados en los estudios (Anbalagan, 1992; Sarkar *et al.*, 1995).

Zonificar el problema consiste en categorizar la zona asignándole un grado o porcentaje de probabilidad de ocurrencia del fenómeno (Varnes, 1984). Los mapas creados por estos métodos de categorización sirven como una vista rápida del grado de peligro que presenta una zona, ahorrando tiempo en la toma de decisiones sobre planeación urbana, apoyo para la elección de puntos específicos en donde se requiera un estudio técnico de mayor detalle y apoyo para conseguir fondos en caso de desastre. Esta información también puede ser comparada con información de vulnerabilidad social y económica para determinar zonas prioritarias. Este tipo de trabajo representa una herramienta útil para la planificación urbana, delimitando zonas estables para construcción, como edificios, casas habitación, caminos y zonas en donde se requiere una reubicación de lo ya establecido y medidas de mitigación ante este tipo de peligro.

La idea de este trabajo es utilizar la información que ya se encuentra disponible, tomando en cuenta el trabajo realizado por las mismas

dependencias gubernamentales, apegándose a leyes de transparencia impuestas dentro del País, con esto se toma la misma información del gobierno para realizar un mapa que pueda ser útil para ellos mismos. Es necesario definir con mayor detalle las zonas en riesgo, para establecer donde se encuentra el mayor grado de riesgo de acuerdo a la población y la infraestructura vulnerable. Es por ello, que el impacto social de la propuesta se define por el interés cada vez mayor en mejorar la información, que permita elevar la precisión y definir donde y cuanta población, o su patrimonio, se encuentra en riesgo. Principalmente, debido a los efectos de fenómenos meteorológicos y a las perturbaciones por actividades humanas en las serranías del AMM, los desarrollos habitacionales (unifamiliares o multifamiliares) en zonas con pendientes mayores. La determinación espacial de zonas vulnerables al fenómeno de inestabilidad de laderas y la cuantificación de características topográficas, geomorfológicas y ambientales permitirá desde la óptica de responsabilidad social el planteamiento de estrategias de prevención, planeación y mitigación del área urbanizada dentro del área de estudio, así como de la planeación urbana futura.

El proyecto vincula los sistemas tecnológicos y la sociedad, los cuales son temas prioritarios de los programas políticos y de desarrollo de los municipios colindantes con áreas montañosas del AMM. El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), publica el mapa nacional de inestabilidad de laderas (2014) escala 1:50.000 al igual que el estudio del Atlas de Riesgo de Nuevo León (2012), en la Gaceta Municipal de Monterrey; que publica y establece zonas en peligro por inestabilidad de laderas a una escala 1:50.000. Ambos muestran la afectación de los fenómenos de remoción en masa en municipios como: San Nicolás de los Garza, donde se exhiben problemas por volteo y deslizamientos en el flanco sureste del Cerro del Topochico; General Escobedo que presenta zonas de derrumbes por volteos y deslizamientos en la porción flanco sureste de Los Potreros y al noreste de Sierra de las Mitras donde exis-

ten desarrollos habitacionales cercanos a Sierra El Fraile y Sierra de las Mitras y donde las corrientes provenientes de cañadas de la sierra y el arrastre de rocas ponen en peligro a la población. Santa Catarina presenta volteos y deslizamientos frecuentes en el flanco suroeste de Las Mitras y al sur en la Autopista Monterrey-Salttillo; así también San Pedro Garza García presenta deslaves en áreas residenciales en el Cerro de la Corona; Guadalupe, Monterrey y Santiago donde se observan deslizamientos y caídos en el Cerro de la Silla y Cañón del Huajuco.

Antecedentes del modelo

Anteriormente se han presentado trabajos en los que se demuestra la eficiencia de la suma lineal ponderada de los parámetros que intervienen en el proceso de inestabilidad de una ladera, como en lo presentado por Westen (2006), haciendo hincapié en la dificultad para determinar una probabilidad temporal. Los resultados del modelo dependen directamente de lo que se está ingresando, una falta de información o detalle en los insumos de entrada representan una desventaja en el mapa resultante, además de falta de información puntual sobre eventos históricos no solo de derrumbes que hayan ocurrido con anterioridad, sino también una falta de información para determinar los factores desencadenantes como lo son los eventos de lluvias extremas y eventos sísmicos, otros trabajos incluso más recientes proponen una estandarización de la metodología así como una categorización de los diferentes tipos de modelos, dependiendo de los parámetros utilizados se definen en mapas de riesgo, peligro, susceptibilidad e históricos (Kumar *et al.*, 2013; Corominas *et al.*, 2014). Este tipo de modelos finalmente se aplican en zonas específicas como lo presentado por Pourghasemi *et al.* (2014), a nivel de susceptibilidad para una región de Irán, también en Bui *et al.* (2013) sobre una porción de Vietnam pero añadiendo el parámetro de lluvia intensa, al igual que Althuwaynee (2014), incluyendo la lluvia con periodo de retorno. Por otro lado, Xu *et al.* (2011) utilizan el modelo para obtener un

mapeo de una zona en China, tomando como factor desencadenante los registros sísmicos históricos. Recientemente, este método de zonificación se aplican a zonas incluso más grandes, utilizando datos cualitativos, como en lo propuesto por Gaprindashvili *et al.* (2016).

El modelo aquí presentado para obtener el mapa de peligro por inestabilidad de laderas, se basa en el procedimiento planteado por Saha *et al.* (2002) y anteriormente en Gupta *et al.* (1999), en donde los parámetros con mayor influencia son rasterizados y re-categorizados para resolverse en una suma lineal ponderada. En ambos procedimientos se toman en cuenta factores ambientales como lo son la litología, la forma del relieve, su inclinación y orientación, así como los arroyos y cárcavas. En este proyecto se realizan variantes a los modelos propuestos, uno de ellos es que en los casos antes mencionados, el Modelo de Elevación Digital (MDE) se obtiene al interpolar las curvas de nivel de la zona, digitalizadas desde las cartas físicas y después procesadas en formato rasterizado. En el caso de estudio aquí planteado, se propone utilizar un modelo de elevación de 1m de precisión obtenido a través de un vuelo LIDAR realizado sobre la zona, además de agregar la probabilidad de lluvia en un periodo de retorno de 10 años como factor determinante.

Área de estudio

La zona de estudio queda ubicada dentro del Área Metropolitana de Monterrey (AMM) perteneciente al estado de Nuevo León en México, el cual comprende el municipio de Monterrey y los municipios aledaños correspondientes a su área conurbada, como San Nicolás de los Garza, Guadalupe, Santa Catarina, etc. (figura 1). La AMM se encuentra localizada sobre el sistema Montañoso de la Sierra Madre Oriental, el cual está conformado por rocas sedimentarias de origen mesozoico y cenozoico que fueron plegados y arrastrados durante la orogenia Laramide ocurrida entre el Cretácico

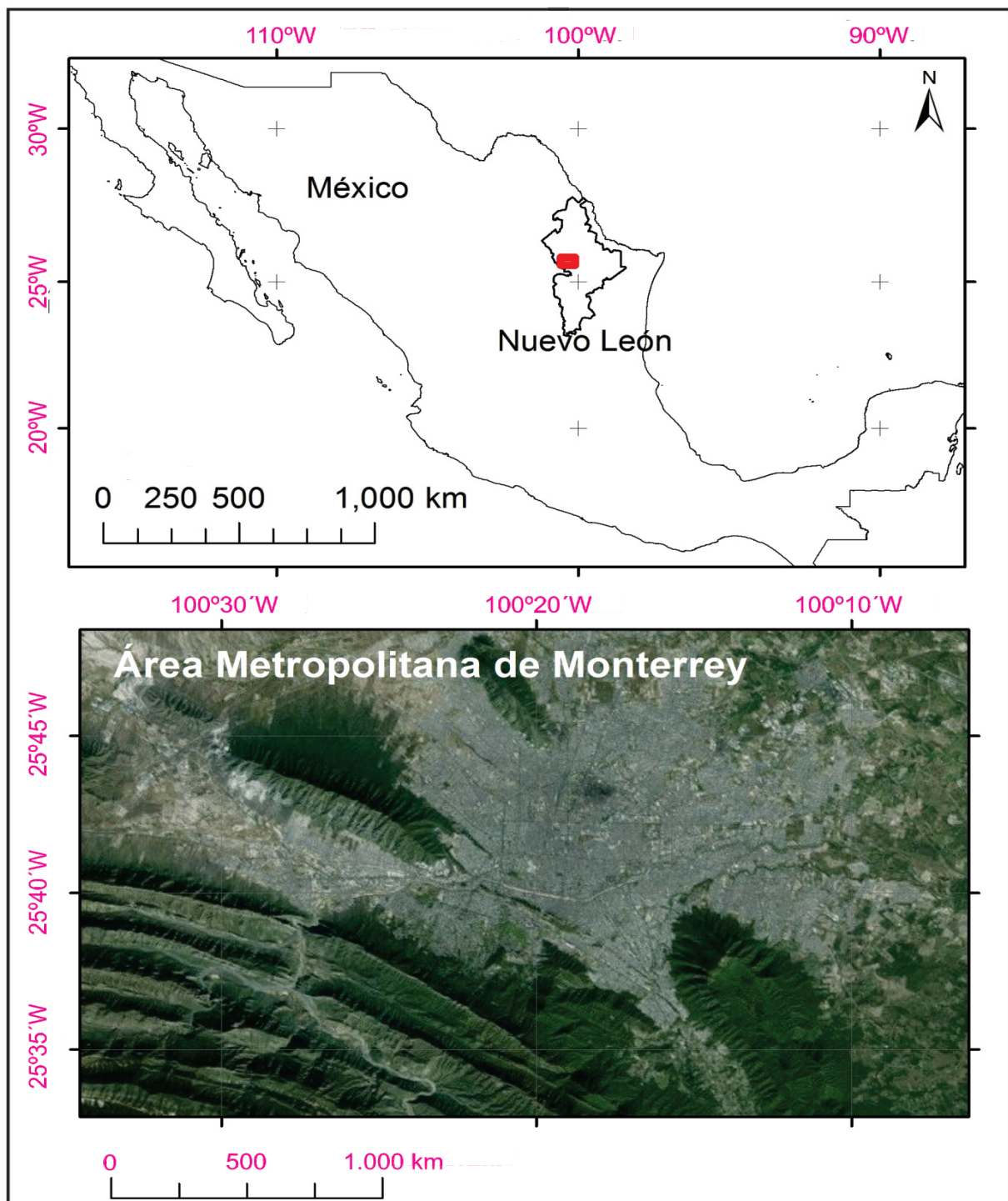


Figura 1. Ubicación del área de estudio./ **Figure 1.** Location of study area.

tardío y el Terciario Temprano (Eguiluz *et al.*, 2000). La formación conocida como la curvatura de Monterrey, se compone de pliegues con orientación NW-SE que cambian su orientación a E-W en la parte norte del municipio.

La zona estudiada en este proyecto tiene una cobertura total de 115.35 km², comprende

la región al SW de la Sierra Cerro de la Silla, y en el límite SW de la zona se ubica el eje del anticlinal Jonuco. La morfología comprende una serie de anticlinales que fueron erosionados de su centro, dando como resultado valles centrales, delimitados por estratos casi verticales que corresponden a los flancos de los altos topográficos aledaños.

El límite NE de la zona de estudio se encuentra invadida por la sobrepoblación urbana.

El AMM se encuentra rodeada por el frente de la Curvatura de Monterrey hacia el sur-sureste y comprende el Cerro de la Corona y el Cañón del Huajuco así como el Cerro de la Silla al sureste, el Cerro de las Mitras al oeste y Cerro del Topochico al norte y, aunque de menores dimensiones, pero igualmente presionados por el desarrollo urbano, los lomeríos del Cerro de las Águilas, la Loma Larga y algunas crestas menores en el área sur. La zona montañosa que representa el área de estudio cubre 481.13 Km² los cuales indican además la disponibilidad de datos LIDAR aéreo.

En la zona de estudio, se encuentran sitios inestables en las que ya se han manifestado situaciones críticas. Algunas de las cuales fueron los desprendimientos a finales del 2002, donde bloques provenientes de la parte sur del Cerro de La Corona se desprendieron ocasionando daños materiales en una de las casas-habitación que se encuentran localizadas en el Fraccionamiento Residencial Chipinque, ubicado al poniente del

cerro (IMPLAN-San Pedro Garza García, 2012).

En el año 2005, se reportaron deslizamientos en el Club Alpino Chipinque, ocasionados por la desestabilización del talud por el corte de pista del Deportivo Alpino. Por otro lado, el 18 de Febrero del 2015, se reportó un derrumbe ocurrido en la calle “Cerro de Pichos” ubicada en el Cerro de La Corona, donde el deslave destruyó el muro de contención afectando a los vecinos del lugar. Un mes después (11 de Marzo del 2015), producto de lluvias prolongadas, sucedió otro deslave en esa zona, ocasionando la caída del talud junto con postes de luz y de telefonía. En el año 2012, el Departamento de Geohidrología y Geofísica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), realizó un estudio con técnicas de Georadar (SIR-3000), con la finalidad de determinar e identificar zonas cársticas en predios en el Cerro de La Corona, aconsejando el control de estas cavidades mediante la aplicación de técnicas de construcción a base de pilotes.

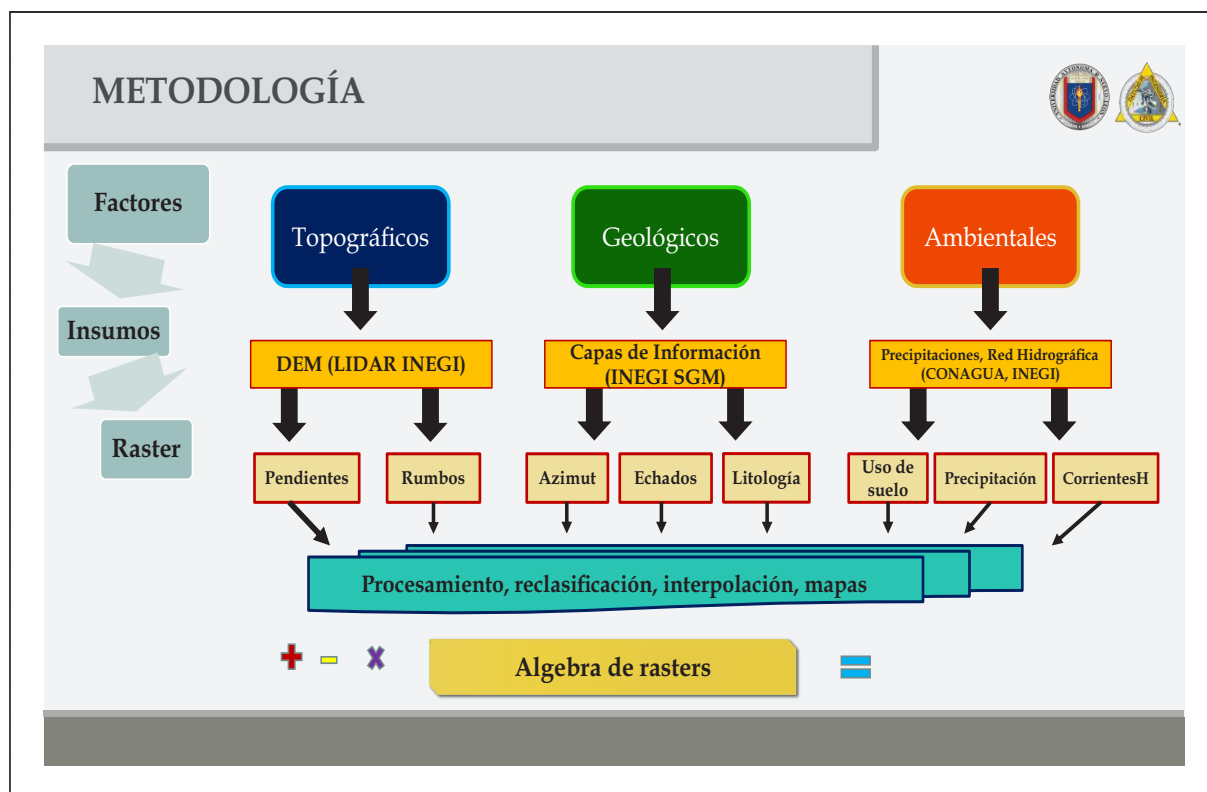


Figura 2. Diagrama metodológico. / Figure 2. Methodological diagram.

Materiales

El Modelo de Elevación Digital fue generado a partir de un vuelo LIDAR realizado por la Comisión Nacional del Agua (CNA), como parte de un estudio para monitorear el comportamiento del Río Santa Catarina después del Huracán Alex en 2010. El resto de los insumos utilizados se enumeran a continuación.

1- Mapa Geológico proveniente del Servicio Geológico Mexicano, escala 1:50.000, el cual contiene información de litología, fallas, fracturas, datos estructurales de la roca.

2- Mapa hidrológico, tomado del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) proveniente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el cual contiene las líneas de los arroyos.

3- Mapa de uso de suelo y vegetación obtenido de INEGI, escala 1:50.000.

4- Los datos de precipitación serán obtenidos a partir de las isoyetas a nivel nacional con períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 (CENAPRED, 2013).

Métodos

Para generar el proyecto se realizó una investigación sobre los factores involucrados en las dependencias correspondientes, una vez obtenidos se realizó un preproceso en cada capa para estandarizarlas y poder realizar una suma entre sus componentes. La suma ponderada se realizó utilizando álgebra de rasters, para lo cual todas las capas debieron convertirse a formato ráster y ser reclasificadas respetando una ponderación final en una escala del 1 al 5, donde 5 representa el peor escenario del factor en cuestión de inestabilidad, y 1 representa una forma estable del factor. A continuación, se observa el diagrama metodológico (figura 2) seguido de una explicación detallada del preprocesado utilizado para las capas.

A- Modelo de Elevación Digital (MDE), slope y aspect:

Después de que el Huracán Alex causara estragos en el AMM, se realizó un vuelo LIDAR con una avioneta, tomando puntos a un 1 m de distancia. La tecnología LIDAR crea la información 3D (Doytsher, 2003; Larsson, 1991) al proyectar un haz de luz láser que incide sobre un objeto y entonces es regresado por reflectancia hacia el aparato donde se registra el tiempo que tardó en regresar. Con este tipo de tecnología se dibuja y caracteriza el relieve de la superficie y se clasifica la información para generar mapas de cobertura del suelo (Dubayah, 2000) con una nube de millones de puntos con información en XYZ. Este sensor ha demostrado una amplia gama de aplicaciones y utilidad en diversos campos de la ingeniería (Stoter, 2000; Stoter y Goter, 2003; Bitelli *et al.*, 2004). Los logros de LIDAR en topografía y geodesia se basan en su alta resolución, precisión y alcance de la nube de puntos que difícilmente pueden lograrse con otro tipo de sensor remoto y que además, tiene la posibilidad de manejarse geoespacialmente.

Esta nube de puntos fue clasificada y filtrada para eliminar ruido y objetos antropogénicos como edificios, vegetación urbana, automóviles, etc. De tal manera que solo quedaron los puntos correspondientes al suelo. Esta nube de información fue interpolada para crear una cubierta superficial que fue utilizada como MDE, el cual sirvió como insumo de información para el factor topográfico. Se creó un mapa de pendientes del terreno en grados, así como un ráster de orientación de los cortes de laderas en formato azimutal con categorías cada 45° aproximadamente, el cual fue reclasificado para asignar un valor fijo a cada categoría para poder ser comparado con los datos de echado y pendiente de las discontinuidades tomadas en campo.

B- Vectores (líneas de drenaje, carreteras, estructuras geológicas como lineamientos y fallas):

En el caso de vectores lineales como el drenaje, fallas, fracturas y carreteras se calculó un área de influencia alrededor de las estructu-

ras, después de eso se calculó un buffer alrededor de éstas que fue posteriormente poligonizado asignándole un valor dependiendo de su influencia. Se realizó una intersección de esta capa con un polígono de la cobertura total del municipio, de tal manera que todo lo que no estuviera dentro del área de influencia recibiera un valor de cero. Así, al rasterizar la capa y sumarla a las demás, se conserva el espacio ocupado por el valor cero, de lo contrario, solamente se conserva el espacio ocupado por la zona de influencia después de realizar la suma.

C- Datos estructurales (echados y rumbos azimutales de la roca):

Uno de los parámetros importantes en cuestión de inestabilidad de laderas es la relación que existe entre el echado y rumbo de la capa con respecto al buzamiento y rumbo del corte de la ladera. Para realizar esta comparación, primero se digitalizaron los puntos en donde se habían tomado datos geológicos y se interpolaron utilizando el método Inverse Distance Weighted (IDW), el cual asigna un mayor peso a la variable que se está utilizando de referencia que se encuentra más cerca (Watson, 1985). La interpolación se realizó utilizando como barrera los ejes de los pliegues, asumiendo que el rumbo y buzamiento de la capa geológica es directamente influenciada por este aspecto. De este procedimiento se obtuvieron dos rasters, uno para los echados al cual se le restó el raster resultante de aplicar el slope, y una capa de rumbos azimutales a la cual se le restó la capa resultante de aplicar el aspecto. Los resultados se clasificaron en base a la siguiente tabla 1.

D- Probabilidad de lluvia y períodos de retorno:

Los datos de precipitación serán obtenidos a partir de las isoyetas a nivel nacional con períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 (CENAPRED, 2013), reclasificando de acuerdo a los rangos señalados en la tabla 4. La información puntual fue interpolada por el

método IDW. Para este caso se utilizó Interpolación IDW (Distancia Inversa Ponderada), método que presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. Su visualización con respecto a otras interpolaciones resultó mejor para este análisis. Una vez que se hizo la interpolación, se reclasificó el raster obtenido para la suma en el modelo final.

E- Clasificación del relieve:

El relieve se obtuvo a partir de la herramienta "landform classification" desarrollada por Jeff Jenness. Esta extensión consiste en un método "simple y repetible" para calcular un Índice de Posición Topográfica (TPI) utilizando como insumo el MDE (Jenness, 2006).

F- Tipo de suelo y tipo de roca:

En el caso de la capa en la que se define el tipo de suelo, se obtuvo a partir de la digitalización de las cartas físicas de INEGI, se cartografiaron los polígonos correspondientes a la capa de suelos, asignando datos adicionales como: textura, fases físicas y químicas. Los datos vectoriales se convirtieron posteriormente a formato de celdas (para facilitar los procesos de superposición en el SIG), codificando únicamente los datos de textura. Para la capa de información geológica, se tomaron en cuenta tres variables: la litología (tipos de roca), los lineamientos (fallas y fracturas a gran escala) y datos estructurales sobre el echado rumbo y buzamiento de las capas litológicas (Tabla 1). Para esto, se realizó una fusión entre la digitalización de las cartas físicas de INEGI y se complementó con la información obtenida de las cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano (SGM).

Diferencial	Tipo de falla		N
	Plana (-)	Volteo (+)	
Echados			
Discontinuidad	60-90	60-90	5
- ladera	45-60	45-60	4
	30-45	30-45	3
	16-30	16-30	2
	15-30	15-30	1
Rumbos	Plana (+)	volteo (-)	
Discontinuidad	0-45	0-45	1
- ladera	45-90	45-90	2
	135-180	135-180	2
	90-135	90-135	3
	180-225	180-225	1
	225-360	225-360	3

Tabla 1. Reclasificación de ángulo diferencial. Ángulo diferencial entre el echado de la discontinuidad y la inclinación de la pendiente. / **Table 1.** *Reclassification of differential angle. Differential angle between the casting of the discontinuity and the inclination of the slope.*

Analizando desde el punto de vista litológico, se integró en el modelo una capa en la que se categoriza el tipo de roca presente en el sitio con base en su reacción con respecto a la inestabilidad de una ladera. Para ésto, se tabuló el grado de afectación en las siguientes categorías: a) rocas metamórficas, b) rocas ígneas, c) rocas sedimentarias, d) intercalaciones, e) rocas cársticas y f) suelos no consolidados. Desde un punto de vista geotécnico se determinó el ángulo diferencial de pendientes, que es la relación angular existente entre la pendiente natural del terreno o en su caso la inclinación del talud, con respecto a la inclinación de la discontinuidad principal. Así como del ángulo entre el rumbo de la estratificación y el talud (tabla 1). Con ésto, se cubre el análisis del arreglo geométrico de la ladera.

G- Uso de suelo:

La vegetación actúa como un buffer en

el proceso de retención de agua, por lo que su presencia y condición puede determinar en cierta medida el proceso de caída o deslizamientos. Con imágenes SPOT se generará la capa de cobertura vegetal a partir de la clasificación de las imágenes, y las clases utilizadas se generalizaron de la clasificación conforme a los criterios descritos en la tabla 2.

Clase	Tipo de vegetación de la clasificación	N
Otro	Sombras y agua	0
Vegetación intensa	Bosque de coníferas	1
Vegetación moderada	Matorral desértico rosetófilo, pastizales y vegetación halófito	2
Cultivos anuales	Agricultura de temporal y de riego	3
Zona urbana	Zona urbana, caminos y pavimentos	4
Áreas deforestadas	Suelo desnudo, agrícola y sin vegetación aparente	5

Tabla 2. Valores de reclasificación de uso de suelo. Valores usados para reclasificar la capa de uso de suelo. / **Table 2.** *Values of reclassification of land use. Values used to reclassify the land use layer.*

^aN= Nuevo valor de reclasificación.

Resultados

Los resultados arrojaron distintos mapas que fueron acumulados durante el proceso para cada elemento, como se observa en el mapa de pendientes del Cerro de la Silla en la figura 3. Por otro lado, los resultados preliminares del modelo SIG, indican un mapa de peligro por inestabilidad de laderas que cubre el Cerro del Topochico (figura 4) y de la Sierra Madre Oriental (figura 5) a un período de retorno de 5 años, el cual toma en consideración los factores de cobertura de uso de suelo, tipo de roca, lineamientos de roca, fallas, datos de estratificación de la roca, lineamiento de arroyos y carreteras. Cada pixel dentro de la imagen resultante representa la suma del estado de estabilidad o susceptibilidad que aporta al modelo cada uno de los factores, entre mayor sea la cantidad de factores

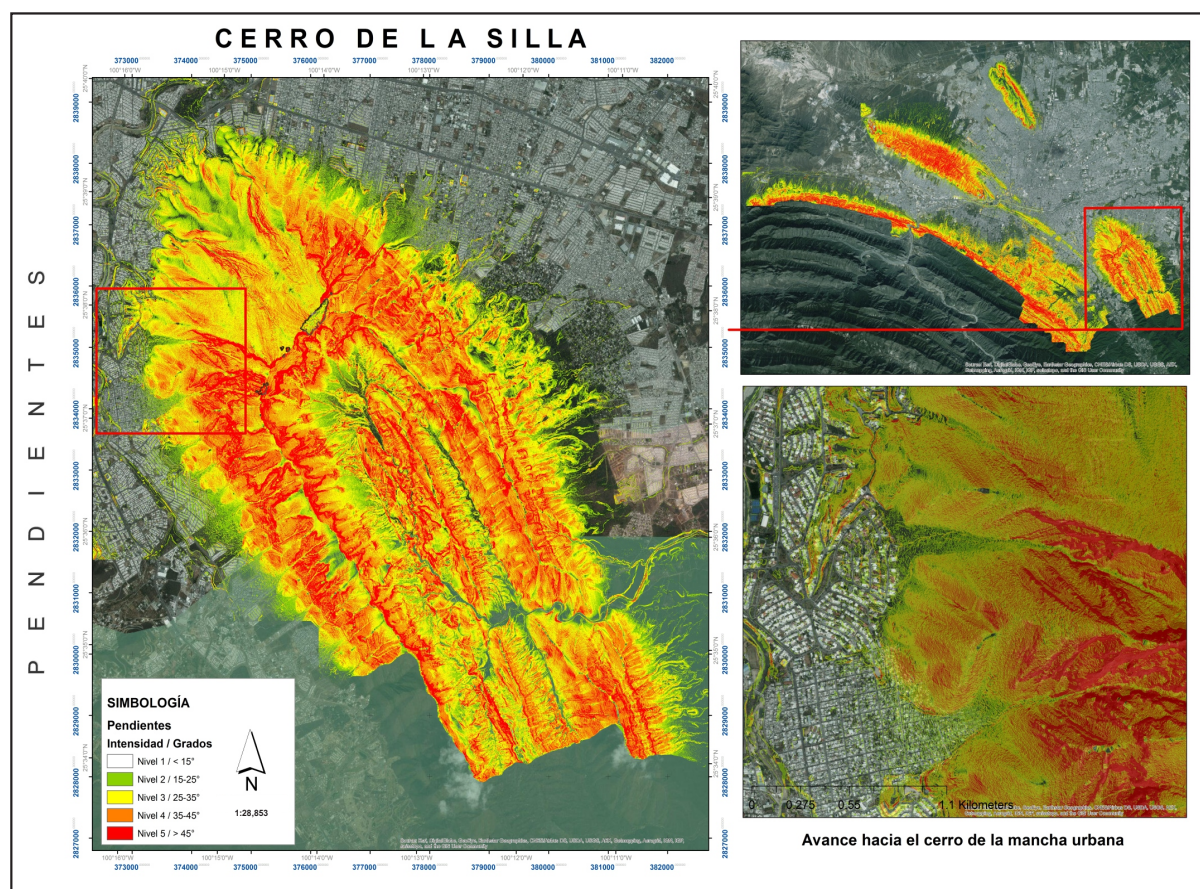


Figura 3. Mapa de pendientes del Cerro de la Silla con alta resolución de datos./ **Figure 3.** Map of slopes of Cerro de la Silla with high data resolution.

con un alto grado de susceptibilidad dentro de un mismo pixel, más probable se vuelve la posibilidad de un deslizamiento de la ladera.

La probabilidad de peligro por inestabilidad de laderas quedó categorizada dentro de 5 divisiones, de las cuales se obtuvieron datos de cobertura, que cubren por tipo y en porcentaje las siguientes cantidades del área clasificada: Muy baja o nulo (21.90%), Baja (25.71%), Media (22.96%), Alta (23.82%) y Muy Alta (5.59%).

Discusión

Es muy importante conocer la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno que puede causar severos daños en el entorno como lo es la inestabilidad de laderas. Aunque en relación con el resto de los resultados, el riesgo muy alto tiene una extensión que podría considerarse pe-

queña, el problema es que gran parte de esa extensión cubre la zona urbana. Con el mapa pueden proponerse zonas de observación en las que más adelante se puedan realizar estudios específicos.

Conclusiones

Los sistemas de modelación vía remota son una herramienta útil de gestión, los modelos basados en SIG ofrecen una respuesta rápida del problema abarcando grandes escalas. El mapa de peligro por inestabilidad de laderas resultante de la modelación puede usarse como una guía para planeación y desarrollo urbano. El resultado funciona como un mapa base para identificar zonas en donde se requiere reforzar la atención con estudios técnicos específicos.

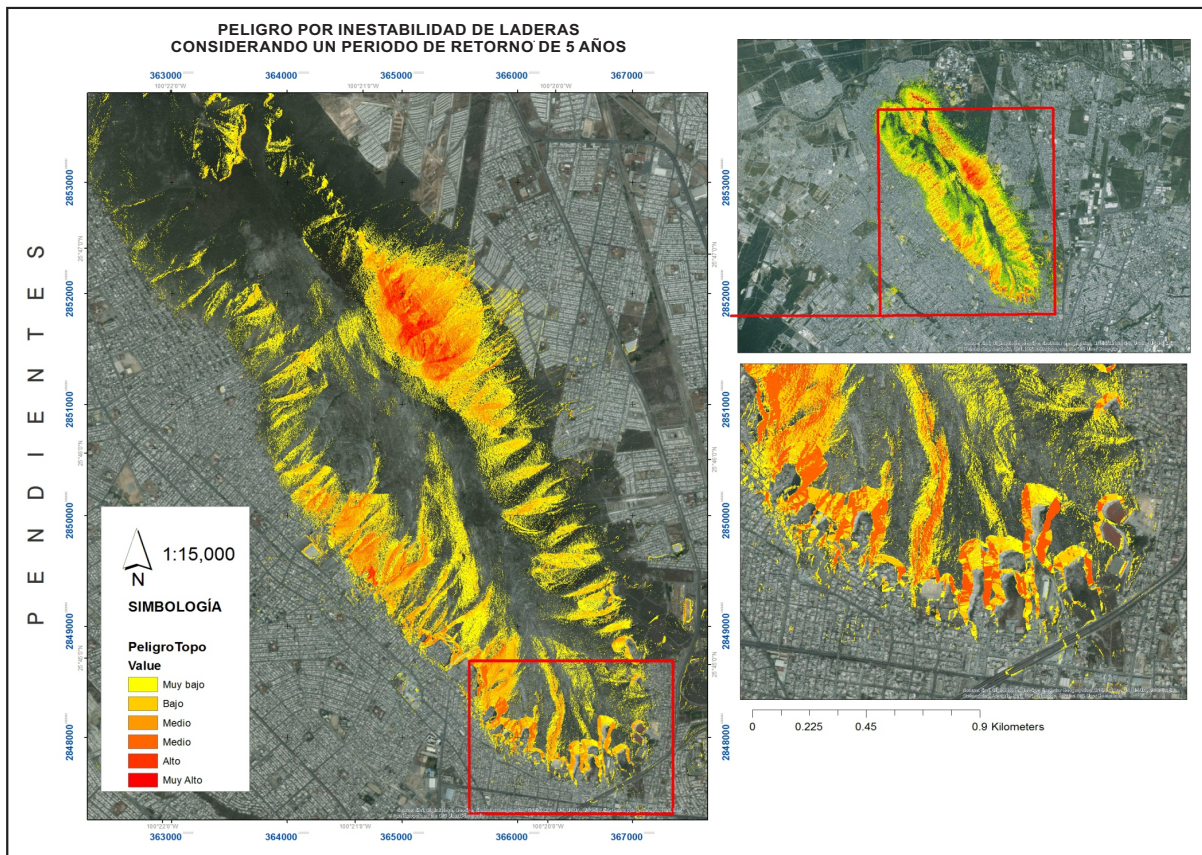


Figura 4. Zonificación del peligro del Cerro del Topochico./ Figure 4. Zoning of the Danger of the Topochico Hill.

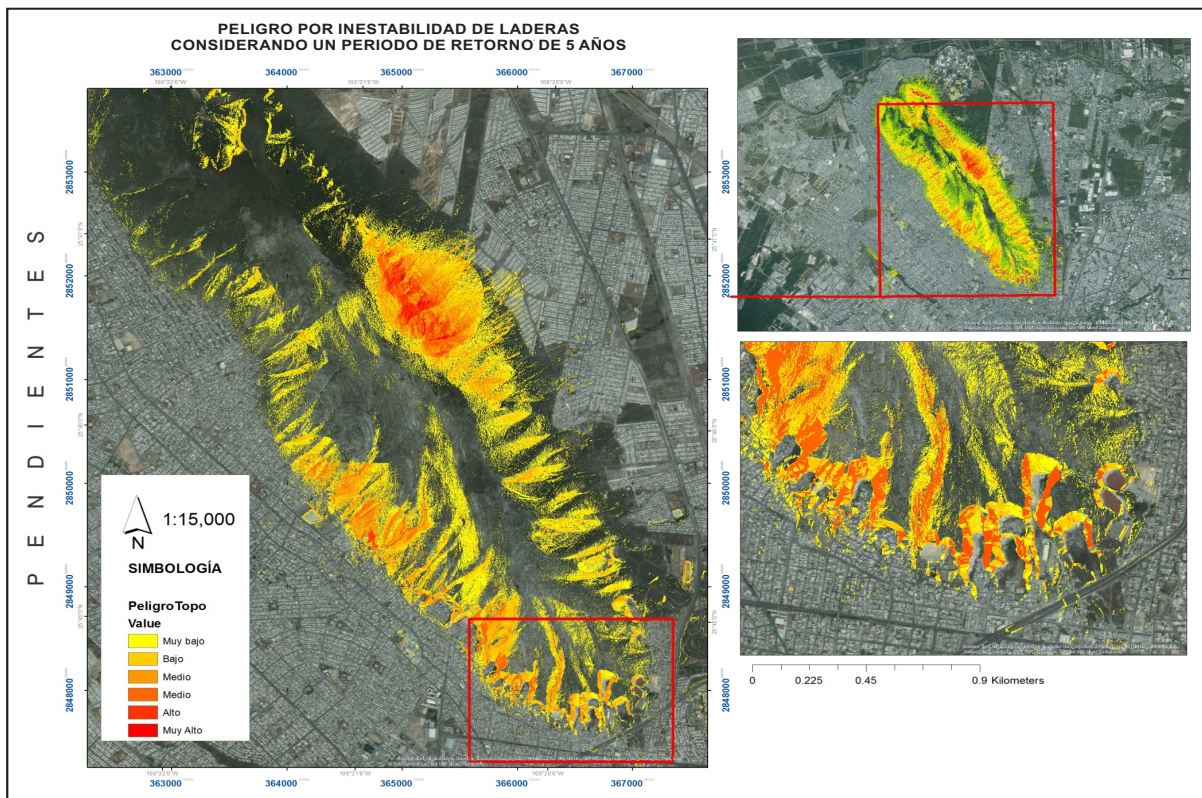


Figura 5. Zonificación del peligro de la Sierra Madre Oriental./ Figure 5. Zoning of the danger of the Sierra Madre Oriental.

Referencias

- Anbalagan, R. 1992. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology*, 32(4): 269-277.
- Althuwaynee, O. F., Pradhan, B. y Ahmad, N. 2014. Estimation of rainfall threshold and its use in landslide hazard mapping of Kuala Lumpur metropolitan and surrounding areas. *Landslides*, 12(5): 861-875.
- Benhamu, M. y Doytsher, Y. 2003. Toward a Spatial 3D Cadastral in Israel. *Computers, Environment and Urban Systems*, pp. 27: 359-374.
- Bitelli, G., Dubbini, M. y Zanutta, A. 2004. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *Proceedings of Commission V, XXth ISPRS Congress*, pp. 246-251.
- Bui, D. T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I. y Dick, Ø. B. 2013. Regional prediction of landslide hazard using probability analysis of intense rainfall in the Hoa Binh province, Vietnam. *Natural Hazards*, 66(2): 707-730.
- Cantú Silva, I. 2012. Buscan prevenir desastres en las laderas de la Sierra Madre Oriental. http://www1.uanl.mx/noticias/investigacion/buscan_prevenir_desastres_en_las_laderas_de_la_sierra_madre_oriental.html. Consultado el 12 de Marzo del 2015.
- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S. y Pitolakis, K. 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 73(2): 209-263.
- Chapa Guerrero, J.R., Chapa Arce, R.I., Méndez Delgado S. y Lemus Alarcón, O.R. 2010. Los huracanes (riesgos naturales) como factor desencadenantes de los riesgos geológicos del AMM, Nuevo León, México. *Geos*, 30(1): 136.
- Dai, F.C. y Lee, C.F. 2002. Landslide characteristics and slope stability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42: 213-228.
- Doyle, M.W., Harbor, J.M., Rich, C.F. y Spacie, A. 2000. Examining the effects of urbanization on streams using indicators of geomorphic stability. *Physical Geography* 21(2): 155-181.
- Dubayah, R. y Drake, J.B. 2000. Lidar remote sensing, *Journal of Forestry*, 98: 44-46.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M. y Marrett, R. 2000. Tectónica de la Sierra Madre Oriental. México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1): 1-26.
- Gaprindashvili, G., y Van Westen, C. J. 2016. Generation of a national landslide hazard and risk map for the country of Georgia. *Natural Hazards*, 80(1): 69-101.
- Goetz, J.N., Guthrie, R.H. y Brenning, A. 2011. Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. *Geomorphology*, 129: 376-386.
- Gupta, R. P., Saha, A. K., Arora, M. K. y Kumar, A. 1999. Landslide hazard zonation in a part of the Bhagirathi valley, Garhwal Himalayas, using integrated remote sensing-GIS. *Himalayan Geology*, 20(2): 71-85.
- INEGI. 2010. Delimitación de las zonas metropolitanas de México. SEDESOL, CONAPO, INEGI.
- IMPLAN-San Pedro Garza García, 2012. Atlas de Riesgos Naturales del municipio de San Pedro Garza García. San Pedro Garza García-UANL. pp 178 .
- Jenness, J. 2006 Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a. Jenness Enterprises. Available at: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>
- Knapen, A., Kitutu, M.G, Poesen, J., Breugelmanns, W, Deckers, J. y Muwanga, A. 2006. Landslides in a densely populated county at the foot slopes of Mount Elgon (Uganda): characteristics and causal factors. *Geomorphology*, 73: 149-165.
- Kumar, R. y Anbalagan, R. 2013. Pixel based terrain analysis for landslide hazard zonation, a case study of Tehri reservoir region, Uttarakhand, India. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2013 IEEE International (pp. 2868-2871). IEEE.
- Larsson, G. 1991. Land Registration and Cadastral Systems: Tools for Land Information.
- Lepore, C., Kamal, S.A., Shanahan, P. y Bras, R.L. 2011. Rainfall-induced landslide susceptibility zonation of Puerto Rico. *Environmental Earth Sciences*, pp. 1-15.
- Murillo Sánchez, E. 2002. Estudio del efecto del cambio de uso de suelo en el escurrimiento en la subcuenca 24Bf "Monterrey", aplicando un sistema de información geográfica, M.Sc. Thesis, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, Nuevo León, 119.
- Pourghasemi, H. R., Moradi, H. R., Aghda, S. F., Gokceoglu, C. y Pradhan, B. 2014. GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 7(5): 1857-1878.
- Rosser, N.J., S.A. Dunning, M. Lim y D.N. Petley. 2010. Terrestrial laser scanning for quantitative rockfall hazard assessment.
- Saha, A., Gupta, R. y Arora, M. 2002. Gis-based Landslide Hazard Zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, 23(2): 357-369.
- Sarkar, S., D.P. Kanungo y G.S. Mehrotra. 1995. Landslide Hazard Zonation: A Case Study in Garhwal Himalaya, India. *Mountain Research and Development*, 15(4), pp 301-309.
- Stoter, J. 2000. Needs, Possibilities and Constraints to Develop a 3D Cadastral Registration System. In: *Proceedings of 22nd Urban and Regional Data Management Symposium*, Delft, The Netherlands.

- Stoter, J. y Gorte, B. 2003. Height in the Cadastre: Integrating Point Heights and Parcel Boundaries. In: Proceedings of FIG Working Week 2003. Paris, France, published on CD-ROM.
- Van Westen, C.J. 2000. The modeling of landslide hazards using GIS. *Surv Geophys*, 21(2-3): 241-255.
- Van Westen, C.J., Van Asch, T. W. y Soeters, R. 2006. Landslide hazard and risk zonation why is it still so difficult. *Bulletin of Engineering geology and the Environment*, 65(2): 167-184.
- Varnes, D.J. 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice (No. 3).
- Xu, C., Xu, X., Dai, F., Xiao, J., Tan, X. y Yuan, R. 2012. Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui river watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region. *Journal of Earth Science*, 23: 97-120.

Recibido: 07 de Noviembre del 2016

Aceptado: 26 de Abril del 2017

