



Didáctica en ingeniería, ciencias básicas y avanzadas (ICBA) para procesos de remoción en masa: el papel de la Geografía

Didactics in engineering, basic and advances sciences (ICBA)
for mass removal processes: the role of Geography

Eduardo Teófilo-Salvador¹

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Resumen

Desde siempre, el hombre ha utilizado dos principales materiales: el suelo y el agua. Sin embargo, estos materiales pueden manifestar procesos activos y pasivos. El objetivo de esta investigación consistió en delimitar los alcances técnicos y metodológicos para el estudio de los procesos de remoción en masa en la enseñanza de la ingeniería, ciencias básicas y avanzadas, así como las relaciones interdisciplinarias con la geografía. Para ello, se realizó una revisión histórica de procesos geológicos. Se caracterizaron los métodos y técnicas, se aplicaron los tipos de muestreos de suelo, también se evaluó la modelación e interpretación con mapas y finalmente, la eficiencia de los modelos. La geografía, ingeniería y ciencias de la tierra juegan un rol primordial en el estudio de estos fenómenos. Sin embargo, la economía es afectada y se refleja en la sociedad. Es difícil controlar la dinámica del clima en la generación de procesos geológicos superficiales. No obstante, es conveniente conocer varias metodologías que permitan conceptualizar el proceso de remoción de masas para generar más de una solución a un problema particular.

Palabras clave: clima, desastres, métodos, mapas, economía.

Abstract

Humans have always used two main materials: soil and water. However, these materials can produce active and passive processes. The objective was to delimit the technical and methodological scopes for the study of mass removal processes in engineering education, basic and advanced

1 Doctor en Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México. Correo electrónico: mca.ts.eduardo2015@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-8794-2938>

sciences, and interdisciplinary relations with geography. A historical review of geological processes was performed. Methods and techniques were characterized, soil sampling types were applied, and modeling and interpretation with maps were evaluated for model efficiency. Geography, engineering, and earth sciences play a primary role in the study of these phenomena, but the economy is also affected and is reflected in society. It is difficult to control the dynamics of the climate in the generation of surface geological processes, but it is critical to understand several methodologies that allow conceptualizing the process of mass removal to generate more than one solution to a particular problem.

Keywords: climate, disasters, methods, maps, economy.

Introducción

Actualmente es importante la enseñanza multi e interdisciplinaria de los procesos geológicos de transferencia e intercambio de materia y energía, ya que estos son sistemas naturales y antropogénicos, y altamente complejos. Según [Suárez \(1998\)](#), las zonas montañosas tropicales son más susceptibles a procesos de remoción en masas, debido al relieve, la sismicidad, la meteorización y las lluvias intensas. Los procesos pueden ocurrir debido a diferentes mecanismos, además el crecimiento demográfico combinado con la necesidad de obras de infraestructura ([Fay et al., 2003](#)), ya que las construcciones urbanas sobre suelos inclinados generan una componente vertical debida al peso, y una lateral que incrementa la fuerza lateral de la masa geológica ([El Kechebour, 2015](#)).

Otra causa de estos procesos geológicos superficiales es la alta degradación ambiental, como la deforestación y la expansión de actividades agropecuarias ([Rosete et al., 2009](#)), las cuales generan áreas con escasa o nula vegetación siendo más susceptibles a remoción en masas. Así, la evolución extrema del relieve, puede deberse a derrumbes, deslizamientos y la expansión lateral debido a efectos gravitacionales ([Fraustro, 1999](#)), y estos a su vez son producto de una manifestación extraordinaria como son las lluvias intensas, donde se involucran fuerzas de filtración, trayectorias de infiltración y resistencia al cortante en el suelo de régimen no saturado a saturado ([Collins y Znidarcic, 2004](#)).

Desde épocas antiguas estos procesos se han manifestado en diversas partes del mundo, como en Mesopotamia por actividades agrícolas que generaron erosión y sedimentación, estos cambios en el uso de suelos dieron pie a una evolución a los relieves ([Cendrero et al., 2006](#)). A partir de la concepción del cambio climático se les ha prestado mayor atención para su estudio, tal

como los 2700 eventos acontecidos de 1945 a 1997 en Hong Kong (Ng *et al.*, 2002), el deslizamiento en Tangjiashan en China (Luo *et al.*, 2012), La Conchita en Estados Unidos de América (Jibson, 2005), los 405 deslizamientos georreferenciados de 1929 a 1999 en Colombia (Moreno *et al.*, 2006).

En México se han diversificado los procesos, pero en esencia debido a la presencia de agua lo que ha generado en su mayoría deslizamientos de suelo, tal como lo muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Casos de estudio de los procesos de remoción de masas en México.

Sitio	Factores	Consecuencias	Referencia
Oaxaca y Guerrero, 1997 200 municipios (Puebla, Veracruz, Hidalgo) 1999. Península de Baja California, 2001.	Huracán Paulina, zonas de montaña, flujo subterráneo y meteorización de materiales. Depresión tropical.	Deslizamientos rotacionales y traslacionales, flujos de suelo, derrumbes y erosión.	Alcántara-Ayala (2004).
Tlalnepantla, Tultitlan, Ecatepec y Coacalco (Estado de México) y Gustavo A. Madero (Ciudad de México). Acambay Estado de México, 2007.	Ciclón Tropical Juliette, precipitación acumulada, la geología y vegetación. Época de lluvias, topografía, geología, geomorfología y clima, asentamientos humanos, deforestación, tránsito pesado y explotación de minas.	Movimientos superficiales y de detritos. Deslizamientos de suelo y rocas.	Antinao y Farfán (2013). García-Palomo <i>et al.</i> (2006).
San Juan de Grijalva, Ostuacán, Chiapas, 2007.	Tectónica de placas, condiciones de los materiales, nivel freático y lluvias. Acumulación de 4 días de intensas lluvias (300 - 400 mm) en noviembre, estratos de lutitas y areniscas.	Movilización de suelo y fallas en taludes. Deslizamientos de suelo, rocas y árboles, destrucción de viviendas y obstrucción del Río.	Norini <i>et al.</i> (2010). Mora-Ortiz y Rojas-González (2012); Jaime <i>et al.</i> (2010).
Teziutlán, Puebla, 1999. Anganguero, Michoacán, 2010.	Intensas lluvias de 300 y 360 mm en suelo de arcilla. Lluvias continuas mayores a 200 mm en febrero, morfología y dirección de flujo; cambios de uso de suelo y deforestación.	Deslizamiento de suelo. Flujo de conglomerados, afectaciones a la reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca.	Jaime <i>et al.</i> (2010). Parrot y Ochoa-Tejeda (2013); Alcántara-Ayala <i>et al.</i> (2012).
La Pintada, Guerrero, 2013.	Intensas lluvias por el Huracán Ingrid y Tormenta Manual.	Deslizamiento de suelo.	Ramos-Bernal <i>et al.</i> (2015).

Estos procesos han ocasionado pérdidas económicas, cambios en los cursos de ríos y miles de muertos (González *et al.*, 2002; Garnica *et al.*, 2010), afectando a la vivienda, educación, salud, agua, energía eléctrica, transporte, comunicaciones, agropecuaria y forestal (Cuanalo *et al.*, 2006). En el siglo pasado a nivel mundial hubo más de 50,000 víctimas, 10 millones de damnificados y pérdidas económicas de 3500 millones de dólares (Alcántara-Ayala *et al.*, 2006), en México de 92375 millones de pesos para el 2010 (García *et al.*, 2016), 70 personas desaparecidas en La Pintada (Guerrero) según Ramos-Bernal *et al.* (2015), en Minatitlán y Oaxaca 800 muertos y en Zacoalpan (Colima) 1000 muertos (Fraustro, 1999), y los daños en las cercanías del Río de Zempoala (Zapotitlán en Puebla), en 4.5 millones de USD (Alcántara-Ayala *et al.*, 2006). En este contexto los montos presupuestados para el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) varían año con año y se ejerce en función de los fenómenos presentados para el año presupuestado (Jiménez *et al.*, 2014; García *et al.*, 2009).

Organismos como la Comisión Nacional del Agua, el Centro Nacional de Prevención de Desastres, el Sistema Nacional de Protección Civil e institutos de investigación se han dado a la tarea de estudiar y reducir los riesgos ante estos desastres, aunque, estos procesos de remoción en masa ocurren generalmente en época de lluvias, no se han logrado mitigar ni predecir con mayor aproximación a pesar de disponer de mapas y atlas de riesgo, los cuales incluyen escalas según la probabilidad de vulnerabilidad o riesgo. Por lo anterior el objetivo de la investigación fue delimitar lo alcances técnicos y metodológicos para el estudio de los procesos de remoción en masa en la enseñanza de la ingeniería, ciencias básicas y avanzadas, y las relaciones interdisciplinarias tal como la Geografía.

Metodología

La metodología para el estudio y delimitación de los procesos de remoción en masa fue:

a) Revisión histórica. Se recurrió a una revisión de procesos geológicos relevantes de zonas áridas y húmedas, mediante cartografías digitales, Google Earth Pro e imágenes Landsat 8, estudios históricos y registros de datos, que permitieran identificar e interpretar alteraciones del relieve y en su caso con esto poder inferir futuros procesos como replicas o en zonas con características similares. La delimitación de zonas se inició a

partir eventos reportados considerando el relieve, la tectónica, la litología y los climas, ya que pueden existir diversas zonas susceptibles a presentar procesos de remoción en masa de gran magnitud y potencial destructivo se acuerdo con [Jaimes et al. \(2010\)](#).

Adicionalmente se buscaron datos climatológicos de precipitaciones, velocidad de viento, humedad, etc., para asociar los eventos con los intervalos de lluvia en los sitios donde se han presentado procesos superficiales, lo anterior debido a que hoy en día, la variación de temperaturas en el mundo ha dado lugar a un creciente desencadenamiento de fenómenos anormales, como lo es El Niño y La Niña ([Pinilla y Pinzón, 2016](#)), y con ello cambios en los patrones de las precipitaciones.

A partir de una macroregionalización se derivaron microregiones o microcuencas, por las peculiaridades geográficas, geomorfológicas y meteorológicas. Con lo anterior, para los sitios con escasa documentación (notas periodísticas) se realizaron recorridos virtuales para reconocimiento del lugar y posteriores visitas de campo, para con ello caracterizar los procesos además de identificar la presencia de estaciones climatológicas cercanas, debido a que la verificación visual y de campo permiten obtener datos reales, ya que los métodos predictivos a largo plazo generan más incertidumbre por los cambios en la presencia de agua en el suelo y a la degradación de los materiales ([Fernández-Merodo et al., 2013](#)).

b) Caracterización de los procesos. Se identificaron el mayor número de parámetros involucrados en los procesos de remoción en masa, a partir de la geografía, geología, edafología, hidrogeología y mecánica, esto para clasificar el tipo de proceso según la ocurrencia, dimensiones y distribución, lo cual también permitió predecir subjetivamente la vulnerabilidad o el riesgo en diversos sitios dentro de un marco regional.

A partir de la caracterización de los deslizamientos fue posible seleccionar, analizar, evaluar y definir el riesgo, y con ello revisar las técnicas de mitigación y planes de control, considerando además los sistemas de monitoreo ([Fell et al., 2005](#)). Por tal, fue necesario identificar los apoyos brindados, ya que la parte social y política juega un rol según la importancia, de acuerdo con el documento de las Políticas Públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales ([Vargas, 2002](#)).

c) Evaluación de métodos y técnicas. Se recurrió a evaluar estudios en geografía, geotecnia, geología, ecología, litología, climatología, agrología, ingeniería de sistemas e ingeniería civil, investigaciones de desastres naturales, fenómenos físicos y sistemas complejos asociados a suelo-agua, desde el enfoque estadístico, conceptual, empírico, geográfico y analítico, así como modelos acoplados a modelos no lineales (Dietrich *et al.*, 2008), sistemas basados en precipitaciones empíricas y zonificaciones a pequeña escala con riesgo de deslizamiento (Brunetti *et al.*, 2009). Se tomaron en cuenta modelos hidrológicos acoplados a modelos de estabilidad del talud infinito (Lanni *et al.*, 2012), ya que esté escala una relación frecuencia-duración de la precipitación, y asume la humedad inicial, y no consideran la resistencia radicular y la sobrecarga de la vegetación.

Se evaluaron los modelos que utilizan el método del elemento finito utilizados en ingeniería geotécnica, ya que incorporan condiciones iniciales y de frontera (Wu *et al.*, 2015), aunque de uso limitado en la solución de problemas prácticos de estabilidad de taludes (Griffiths and Lane, 1999), debido a que los análisis son más costosos y requieren considerable esfuerzo y gastos en el desarrollo de parámetros para los modelos (Duncan, 1996), entre estos modelos se analizaron el modelo viscoplastico unidimensional, el modelo elastoplastico 2D y el viscoplastico 2D (Fernández-Merodo *et al.*, 2013).

También se revisaron los modelos mecánicos por la propiedad de fluencia y relajación, (Michalowski, 1995), que permite modelar la deformación conforme a la regla asociativa de flujo, además de la condición de fluencia no lineal Mohr-Coulomb (Drescher y Christopoulos, 1988). Para métodos de análisis cinemáticos y cargas límite, determinada por la ecuación de la tasa de trabajo hecho por fuerzas externas, como el modelo de Liang *et al.* (1994) que describe la energía del flujo de agua mediante columnas de suelo en laboratorio con datos climatológicos. Así como las formulaciones con la fase sólida, líquida y gaseosa (Gens y Olivella, 2001). Se evaluaron equipos desarrollados para el estudio del comportamiento y distribución de flujo de agua en masas de suelo (Teófilo y Morales, 2018), formulaciones acopladas que utilizan soluciones ajustadas a geometrías simplificadas para validar equipos como el trabajo friccional del movimiento del suelo (Serri *et al.*, 2013).

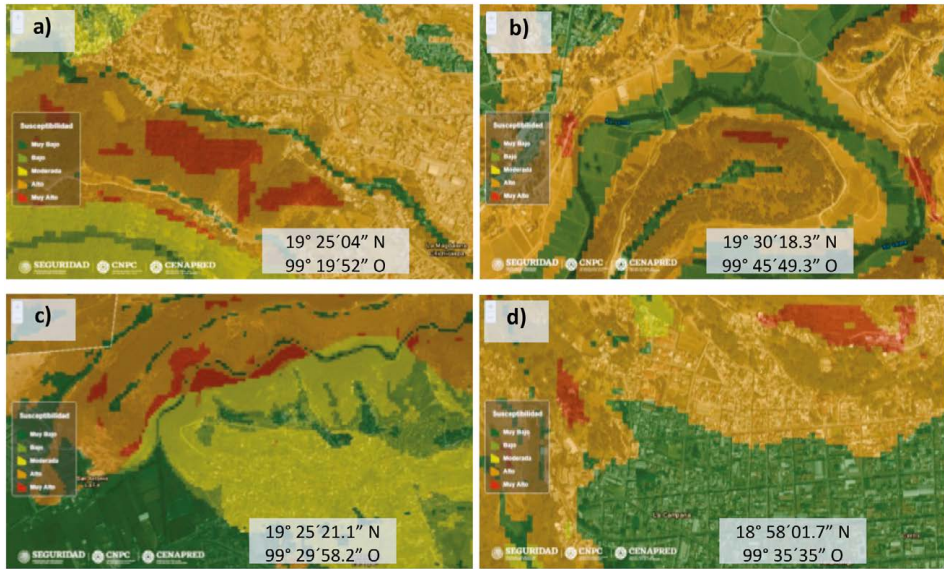
De esta forma los paquetes programables que permiten la simulación, cuyos resultados son plasmados en mapas, es decir de la matemática a lenguajes de programación como slope, 3DSlopeGIS, Shalstab, flow3d, Geoflow, Gslope, TRIGRS, Green-Ampt entre otros (Peña, 2014; Tranco *et al.*, 2013). Así como el TRIBS-VEGGIE que incluyen la evolución de la humedad a través de columnas de suelo acoplado con el modelo de talud infinito (Lepore *et al.*, 2013). El code_bright que resuelve de forma acoplada el flujo y la deformación para presiones de agua mediante elementos finitos (Pinyol *et al.*, 2008).

Se consideró que estos softwares tienen como limitante la validación de los datos de entrada, inclusive la percepción remota e imágenes satelitales son limitadas (Velázquez *et al.*, 2002), por los cambios dinámicos si no existe verificación de campo, tal como el drenaje superficial, la variabilidad espacial de las precipitaciones, resistencia de materiales, propiedades hidráulicas y profundidad del perfil del suelo (Godt *et al.*, 2008). Además, las simulaciones suelen ser inversas o hacia atrás, y en casos se asume que el suelo debe estar a capacidad de campo antes de un movimiento de masa (Dhakal y Sidle, 2004).

La importancia de evaluar los modelos o métodos existentes se debe a que todos se comportan de forma distinta, presentan diferente incertidumbre y el grado de complejidad con el que atienden un problema geográfico particular, y esto es primordial para una adecuada caracterización, discretización y elección. Además de que, siempre antes de modelar es necesario conocer la estructura de cualquier paquete programable, las condiciones iniciales y de frontera, adicionalmente conceptualizar el sistema o proceso a representar.

d) Muestras de campo. La jerarquización de zonas geográficas sirvió para definir y delimitar sitios posibles que pueden generar los movimientos de masas, considerando daños sociales, económicos y ambientales, para lo cual fue necesario del apoyo del Atlas Nacional de Riesgos de México de 2019, de acuerdo a una regionalización por el alcance económico se seleccionaron sitios alta susceptibilidad en: Carretera Huixquilucan – Naucalpan (Magdalena Chichicarpa), San Lorenzo Toxico (Ixtlahuaca), Santa María Zolotepec (Xonacatlán) y Tenancingo dentro del Estado de México (Figura 1).

Figura 1. Muestreros de suelo alterado: a) Magdalena Chichicapa en Naucalpan, b) San Lorenzo Toxico en Ixtlahuaca, c) Santa María Zolotepec en Xonacatlán y d) Tenancingo (mapa de apoyo <http://www.atlasmacionalderiesgos.gob.mx/>, 2019)



En abril de 2019, en campo se realizó el muestreo alterado de 0.15 m a 1.2 m de profundidad, en laboratorio se pesaron las muestras en estado húmedo y se disgregaron en charolas metálicas para secarlas a la intemperie y con ello evitar desintegrar la materia orgánica tal como raíces y microfaunas (Teófilo, 2010; 2015; 2019), para acelerar el proceso fue necesario el uso de láminas de fibra de vidrio. Las muestras secas se pesaron nuevamente y se fraccionaron de 600 g a 1000 g para tamizar, finalmente se pesaron las cantidades de acuerdo al tamaño de grano del suelo. Con lo anterior se determinó la clase textural de suelo con ayuda del triángulo de texturas (USDA, 2004).

Para complementar los trabajos de campo en los cuatro sitios fue necesario realizar muestreos inalterados de suelo, extrayendo núcleos con dimensiones de 0.25 m x 0.25 m x 0.25 m hasta una profundidad de 1.2 m y a 3.0 m, los cuales se impermeabilizaron. Estos bloques se trasladaron al laboratorio de materiales para determinar el estado de esfuerzos mediante la prueba triaxial, límites líquido y plástico (Holtz y Kovacs, 1981),

además de la granulometría de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Así mismo, se instalaron de bancos de nivel mediante el uso de equipo topográfico para monitorear temporalmente las posibles remociones en masa bajo la acción de factores detonantes como lo es la presencia de flujos superficiales o subsuperficiales de agua. Lo anterior debido a que muchas veces los datos meteorológicos para estudios no están actualizados, no verificados y son incompletos, y la tecnología de estaciones es adquirida en países desarrollados, tal que al dañarse no pueden ser fácilmente reparadas por los costos y falta de conocimiento (Velasco *et al.*, 2015).

e) Modelación de los PRM. Para esto se utilizaron las técnicas más apropiadas según la disponibilidad de datos como: infiltración, conductividad hidráulica, contenido de humedad, cohesión y presión de poro, y los factores involucrados como la intensidad, frecuencia, duración distribución de la lluvia, lluvia acumulada, lluvia antecedente, la topografía y la cobertura vegetal. Adicionalmente con AutoCAD 2019 y Global Mapper se evaluaron las curvas de nivel triangulando puntos dentro de las regiones seleccionadas.

Con base en Strokova (2019), se realizó la modelación geográfica a partir de la topografía, geología y su relación con los mecanismos vegetativos y de uso de suelo, utilizando Modelos Digitales de Elevación como Sistemas de Información Geográfica (GIS) e IDRISI. De esta manera se evaluaron las condiciones geomecánicas e hidrogeológicas, cuyos datos se revisaron y verificaron con las mediciones en campo (ángulo de inclinación, espesor de capas de suelo, presencia de flujos) y resultados de pruebas de laboratorio (esfuerzo normal a diferentes presiones de confinamiento, ángulo de fricción del suelo, contenido de humedad, porosidad y textura), así como de los cambios dinámicos que se obtuvieron al explorar Google Earth desde el 2002 al 2018 e imágenes Landsat 8.

Cabe mencionar que, para asociar la simulación computacional y la representación geográfica con las condiciones físicas de campo, y con ello generar una mayor aproximación a posibles casos de remoción en masas, se ha tomado en cuenta que los sistemas modelados matemáticamente requieren forzosamente identificar variables y/o factores, experimentar iterativamente el fenómeno y realizar suposiciones, para finalmente recalibrar y ajustar el modelo, lo que llevó nuevamente a la definición del sistema físico (Preston, 2006).

Es importante resaltar que se está evaluando y verificando como los paquetes programables y su vinculación con los modelos de elevación digital, el procesamiento de datos y monitoreo continuo para los escenarios, pueden ser adecuados para la detección temprana de movimientos de suelo (Tarchi *et al.*, 2005). Aunque esto es una poderosa herramienta para la rápida evaluación de riesgos y zonificación de desastres, (Formetta *et al.*, 2014; Sassa *et al.*, 2005), este tipo de simulación aun requiere de mediciones geotécnicas e hidrogeológicas in situ en una escala de tiempo, ya que sin estas existe un alto grado de incertidumbre. Por lo anterior, sigue siendo necesario revisar las propiedades mecánicas, físicas, geológicas e hidrológicas del suelo, propiedades de la lluvia y pixeles geográficos menores a 10 m, donde generalmente es difícil adquirir datos para un sitio específico (Iida, 2004), sin embargo, con la caracterización de las muestras de suelo, datos históricos de eventos reportados, huellas geomorfológicas y el Atlas Nacional de Riesgos ha sido posible obtener una adecuada interpretación conceptual del estado físico actual de los sitios.

f) Eficiencia de modelos. Actualmente aunque existen diversos modelos para el estudio de los procesos de remoción en masas, para la adecuada discretización y con ello la elección, se consideró que algunos son idealizados matemáticamente porque parten de bases físicas y conceptos mecánicos (Chien *et al.*, 2015), otros se basan en la experimentación y ensayos de laboratorio, y otros más son probabilísticos, ya que parten de ajustes de datos históricos, pero todos presentan ciertos alcances y limitaciones dependiendo del problema, con ello la aplicación a casos geográficos particulares.

Así en la estimación de la eficiencia se inicializó con los métodos convencionales como el factor de seguridad por ser los más utilizados para deslizamientos, y esto debido a que determinan la masa que tiende a moverse bajo la influencia de la gravedad gobernada por una relación lineal (USACE, 2003), y son representados en el círculo de esfuerzos de Mohr, consecutivamente los transitorios, los cinemáticos, los mecánicos y los de energía.

Esta evaluación de eficiencia permitió cuantificar la reconstrucción de procesos geológicos desde una forma lineal hasta enfoques muy complejos. Además, se realizó una combinación de datos de entrada, para identificar la sensibilidad de cada parámetro o factor involucrado en los procesos, ya que según Schmidt *et al.* (2010) para refinar los avances y el

desarrollo eficiente de modelos predictivos es necesario el uso de la combinación de datos.

Lo anterior también ayudó a comparar el método o técnica revisada con los datos históricos y datos de campo de zonas observadas, con ello el grado de amenaza, susceptibilidad, vulnerabilidad y riesgo desde el punto de vista de los desastres naturales de acuerdo con Peña (2014). Además, de verificar con los bancos de nivel instalados en los sitios de mayor incertidumbre para con ello comparar las mediciones físicas con los modelos utilizados. De esta forma se continúa elaborando y superponiendo mapas asociadas a la aplicación de cada modelo en cada sitio y, con ello la interpretación de cómo cambian los datos de entrada según las características propias de cada punto de estudio debido a la geografía, geología, mecánica y física del suelo, para con ello obtener una mayor aproximación de ocurrencia de procesos de remoción de masas, la cual permita reducir una amplia área de estudio a un punto, tal como se presentan estos procesos.

Resultados y discusión

Para que se produzcan procesos geológicos de remoción en masas, es necesario de agentes: i) externos que pueden ser pasivos (temperatura del perfil, contenido de humedad del suelo) y activos (flujos de agua superficial o subsuperficiales, actividad humana y el viento), para producir erosión eólica o hídrica, transporte y sedimentación, e ii) internos, con la composición asociada al tamaño y distribución de partículas, que en combinación con el tiempo se produce desgaste o microreacomodos y la mineralización, y con la dinámica del clima el efecto de expansión-contracción. Geográficamente a grandes escalas los agentes pueden no ser importantes, pero a microescala tienen un peso considerable para generar inestabilidades en masas de suelo. Además de que el tipo de material, influye para que se manifiesten a diversas escalas de velocidades que varían desde casi ser imperceptibles hasta ser extremadamente rápidos (Hung *et al.*, 2013).

Para revisar los peligros relacionados a la inestabilidad se requiere de especialistas interdisciplinarios que analicen no solo el proceso sino los efectos socioeconómicos, de esta forma es posible reducir los efectos dañinos, así como difundir el conocimiento y fomentar una cultura sobre el riesgo y evacuación (CENAPRED, 2001). Por tal manera, es importante considerar incluir en la agenda de protección civil no solo mapas,

estrategias y programas para mitigar y reducir riesgos (Chávez, 2008), sino focalizar recursos para el estudio e interpretación temprana de puntos vulnerables en el ámbito comunitario, municipal o estatal, tanto de fondos del sector público como del privado, pero a partir de una adecuada selección y aplicación de métodos y técnicas según los datos y el sitio de interés.

La caracterización fue importante debido a que en la revisión de imágenes satelitales se detectó un incremento de zonas urbanas no aptas para infraestructura como lo es en laderas y cerca de cauces de ríos, tal situación aumenta los riesgos de poblaciones ante la incidencia de peligros naturales (Rosete *et al.*, 2009). Además de actividades de expansión urbana, construcción de infraestructuras y extracción de materiales (Cendrero *et al.*, 2006). En este contexto, los problemas socioeconómicos asociados a la geometría económica; laborales, industria, comercio y desarrollo regional (Soberón-Mora *et al.*, 2015), además los desastres naturales originan problemas de migración interna, damnificados, desaparecidos y muertos, con ello millonarias pérdidas económicas en regiones dispersas.

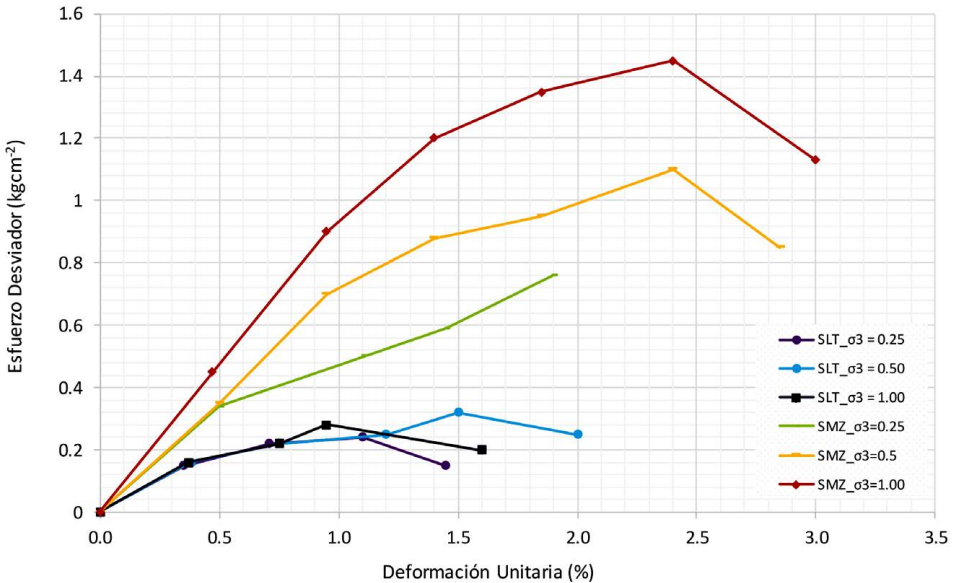
En relación a los métodos y técnicas, fue evidente la existencia de varios métodos para el estudio de los procesos geológicos superficiales, algunos con mayor precisión, pero con cierto grado de dificultad que se ve reflejado en la escasa aplicación, y otros con mayor aplicación, pero arrastrando mayor incertidumbre. Pese a lo anterior, el principal problema en los PRM es la influencia del flujo de agua (Lanni *et al.*, 2012), y a pesar de ello los actuales modelos no incluyen una componente de conectividad para flujo subsuperficial de agua e interpretación geográfica. Y la presencia de agua constante o variable proveniente de alguna fuente de suministro (sea la precipitación, riego o fugas subterráneas) aplicada en un punto determinado, es la principal causa que genera inestabilidad del suelo (Jiang *et al.*, 2016).

Así mismo se ha obtenido que la mayoría de los estudios asociados a inestabilidades de masas de suelo son tratados en un 60 % con el método de factor de seguridad, en un 30 % son utilizados los modelos transitorios y el restante hace uso de metodologías poco comunes como los cinemáticos, los mecánicos y de energía los cuales aún carecen de un software sofisticado para el análisis y procesamiento de datos. Además de que un 70 % de todos estos métodos o técnicas aplica la representación gráfica mediante mapas según el grado de vulnerabilidad o riesgo de nulo a alto, con

la limitante de que regionalizan de forma global las características para cubrir grandes extensiones de tierra durante las simulaciones.

Con respecto al muestreo de campo se obtuvo que el sitio con mayor susceptibilidad a remoción de masas fue San Lorenzo Toxico (Ixtlahuaca), ya que los valores de las muestras inalterada sometidas a presiones de confinamiento de 0.25, 0.5 y 1 kg_fcm⁻² arrojaron esfuerzos desviadores muy bajos del orden de 0.20 a 0.32 kgcm⁻² como valores mínimos (Figura 2), además de las condiciones topográficas del orden de 60 a 70° de inclinación, la presencia de una falla geológica y aunado a ello la actividad física del hombre por las construcciones en los bordes de las laderas, así como las detonaciones con explosivos de juegos pirotécnicos. El valor más alto del orden de 1.44 kgcm⁻² se obtuvo para Santa María Zolotepec (Xonacatlán), y para los sitios Magdalena Chichicarpa y Tenancingo se obtuvieron valores mayores, además las condiciones físicas, biológicas y sociales existentes, y las medidas de prevención, influyeron para no incluirlas como resultados críticos de estudio.

Figura 2. Curvas esfuerzo-deformación para diferentes presiones de confinamiento de San Lorenzo Toxico (SLT) y Santa María Zolotepec (SMZ) en el Estado de México.

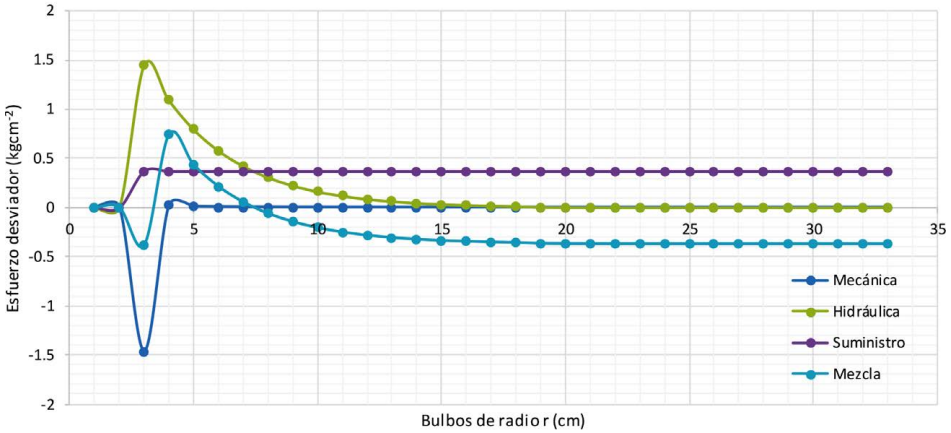


Al evaluar el factor de seguridad, se obtuvo un valor de $FS = 2.03$ para Magdalena Chichicaspa, $FS = 1.25$ para Santa María Zolotepec y de $FS = 0.80$ para San Lorenzo Toxico para, lo cual reafirma porque se excluyen los resultados con valores altos, de esta forma las mismas técnicas y métodos permiten caracterizar y priorizar según la disponibilidad de datos.

Además, en la modelación de los procesos de remoción en masa los resultados fueron muy sensibles al grado de importancia del factor desencadenante, tal como las tormentas que a su vez dependen de la combinación de la intensidad horaria máxima y promedio, de la duración y cantidad de precipitación registrada, así como del patrón de distribución temporal en el suelo, lo que justifica el uso adecuado de cada modelo según las características de cada sitio de estudio, es decir un modelo puede predecir eficientemente el comportamiento en un sitio y en otro no, según la disponibilidad de datos de entrada.

Por lo anterior, en la Figura 3 se muestra el comportamiento del proceso aplicando el modelo Hidrogeomecánico propuesto por Teófilo (2019) con los mismos datos de entrada para el caso de Santa María Zolotepec. Gráficamente se observa que la energía mecánica del suelo opone resistencia y se equilibra con la energía hidráulica manteniendo una carga constante de suministro, tal que la mezcla suelo+agua genera que la energía se manifieste constante a partir de los 15 cm de profundidad, lo cual es consistente con la aparición de grietas de tensión superficial de 0 a 15 cm, esto es un indicativo del vencimiento de la energía del suelo y con ello la inestabilidad por factores adicionales.

Figura 3. Curvas de energía aplicando el modelo Hidrogeomecánico para Santa María Zolotepec



En este sentido, es conocido que la presión de poro tiene fuerte influencia en los mecanismos de movimientos de masa denotados por lluvia, pero puede ser conveniente aplicar de forma paralela el efecto de la fuerza de filtración, ya que la presión de poros presenta una distribución en todos puntos dentro de un sistema y la fuerza de filtración tiene una dirección, magnitud y sentido, es decir en el sentido del flujo prioritariamente sub-superficial y sobre un plano de falla asociado al desplazamiento de la masa que tiende a moverse (Teófilo, 2019).

Sin embargo, puede ser adecuado recurrir a la experimentación de campo para generar trayectorias de flujo mediante reproducción de intensidades de lluvia, con lluvias discontinuas y la identificación de patrones de flujo en el perfil del suelo (Teófilo *et al.*, 2019), así como experimentación en laboratorio (Sassa *et al.*, 2005; Towhata *et al.*, 2005).

Como se ha mostrado, la modelación puede ser tan compleja o tan simple, dependiendo del enfoque y participación de los grupos afectados e interesados, así como de las áreas del conocimiento: social, político, geográfico, económico, financiero, ingenieril y científico. Por esta razón la verificación con los mapas existentes como el Atlas Nacional de Riesgo sigue siendo una limitante, ya que hasta ahorita se han encontrado generalizaciones de zonas al no contar con registros, datos de muestreo de campo, ni datos de entrada para las simulaciones, por tal en este estudio se

muestra los alcances metodológicos según el área de interés, para que los resultados gráficos sean más próximos a la realidad y con ello se discreticen áreas y se reduzcan a puntos de interés prioritario.

Con respecto a la eficiencia de los modelos se obtuvo que, primero es importante el reconocimiento del ámbito geográfico, social y económico, con ello el reconocimiento de las características y tipos de procesos lo cual influye en la aplicación de una adecuada legislación, planificación e información previa de los riesgos para las poblaciones, y esto puede ayudar a minimizar costos.

Por lo anterior, es necesario recurrir a nuevas metodologías, tal como a la teoría híbrida hidrogeomecánica para generar una propuesta de solución acoplada, por el principio de superposición, para la problemática de los procesos de remoción de masas, debido a que poco han evolucionado los actuales métodos en el estudio de los deslizamientos, y estos procesos se manifiestan especialmente en la época de lluvias de forma imprevista, dispersa e irregular, además de que la ubicación geográfica determinara los riesgos potenciales y la variación de los impactos entre una población y otra (Schmook *et al.*, 2016), de esta forma es posible una planificación adecuada y cuidadosa para normar, prevenir y disminuir impactos negativos (Soto-Cortés, 2015), además de ahorrar miles de millones de pesos, pérdida de riqueza y salvar vidas (Highland y Schuster, 2003), ya que los desastres naturales, debilitan a las estructuras sociales y económicas, y la modelación compuesta, acoplada o híbrida puede generar herramientas que permitan revisar posibles regiones vulnerables.

Aunque el fenómeno de remoción en masas es un proceso complejo, una solución quizás efectiva es el reconocimiento territorial a escala local o en cuencas hidrográficas (Monteleone y Sabatino, 2014), y de ello microcuencas. Por lo que, si cierto porcentaje del recurso se destina a la aplicación de nuevas metodologías o aplicación de varias, en un futuro las pérdidas podrían ser reducidas debido a la existencia de herramientas de prevención y además de que dichas herramientas o métodos se puedan comparar y aplicar según los datos de entrada. Aunque existen gran cantidad de mapas geográficos los resultados deben ser interpretados y validados correctamente (Vázquez *et al.*, 2016; CENAPRED, 2016), y una forma de verificar la precisión es mediante la aplicación de diversas metodologías y técnicas con interpretación geográfica, pero teniendo en

cuenta que ningún programa de computadora reemplaza el buen juicio de un especialista.

Conclusiones

La dinámica del clima ha llevado a un incremento de fenómenos naturales en los últimos años, lo que ha generado la presencia de desastres los cuales han afectado a diversos sectores y, la vulnerabilidad no ha dejado claro las estrategias de prevención.

Es de suma importancia el estudio de los procesos geológicos superficiales, a partir de la ciencia, la ingeniería y la geografía, ya que estas permiten representar la salud de la tierra a través de conceptualización, aplicación de modelos y la representación gráfica.

La humanidad ha influido en la dinámica externa, modificando y generando nuevas geoformas para satisfacer necesidades de desarrollo, alterando la geografía, geología, ecología e hidrología natural de la tierra, inclusive en la siembra de nubes, trayendo consigo cambios en los patrones climatológicos.

La importancia primordial de estudiar los procesos que ocurren en el suelo como los de remoción de masas, se debe a que en esta capa existe microfauna, se desarrolla la fenología vegetal, se regula el ciclo del agua, se reduce el avance del efecto invernadero y los macroporos permiten la ventilación del suelo a la atmósfera, tal que esto debe ocupar a las diversas áreas de las Ciencias de la Tierra.

Es difícil controlar la dinámica del clima, pero es posible revisar, elegir y aplicar técnicas y metodologías adecuadas que permitan conceptualizar el proceso de remoción en masa a partir de la revisión del entorno geográfico, ambiental, demográfico y social, para generar más de una solución a un problema particular y con ello generar mayor aproximación para la interpretación de mapas de riesgos.

Referencias

- Alcántara, A. I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. En: *Geomorphology*, 64, 19-40.
- Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O. y Parrot, J. F. (2006). Landsliding related to land-cover change: a diachronic analysis of hillslope

- instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico. En: *Catena*, 65, 152-165.
- Alcántara-Ayala, I., López-García, J. y Garnica, R. J. (2012). On the landslide event in 2010 in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Angangueo, Michoacan, Mexico. En: *Landslide*, 9, 263-273.
- Antinao, J. L. y Farfán, L. M. (2013). Occurrence of landslides during the approach of tropical cyclone Juliette (2001) to Baja California Sur, Mexico. En: *Atmósfera*, 26(2), 183-208.
- Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Mondini, A., Salvati, P., Tonelli, G., Valigi, D. y Luciani, S. (2009). A prototype system to forecast rainfall induced landslide in Italy. En: *The first Italian Workshop on Landslides*, 1, 1-5.
- Cendrero, A., Remondo, J., Bonachea, J., Rivas, V. y Soto, J. (2006). Acción humana y procesos geológicos superficiales ¿qué le estamos haciendo a la faz de la tierra?. En: *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat.*, 100(1), 187-209.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED (2016). “Curso causas que propician deslizamientos y medidas de prevención”, *Coordinación Nacional de Protección Civil*, México, p. 278.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED (2001). “Inestabilidad de laderas. Serie Fascículos”, *Secretaría de Gobernación*, p. 39.
- Chávez, A. J. M. (2008). “Atlas multidisciplinario y de riesgo geotécnico de la zona conurbada al norponiente del valle de México”, p. 45.
- Chien, L. K., Hsu, C. F. y Yin, L. C. (2015). Warning model for shallow landslides induced by extreme rainfall. En: *Water*, 7, 4362-4384.
- Collins, B. D. y Znidarcic, D. (2004). Stability analyses of rainfall induced landslides. En: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4), 362-372.
- Cuanalo, O. A., Quezada, P., Aguilar, M. A., Olivan, R. A. M. y Barona, D. E. (2006). Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla, México. En: *e-Gnosis*, 4, 1-14.
- Dietrich, W. E., McKean, J., Bellugi, D. y Perron, T. (2008). The prediction of shallow landslide location and size using a multidimensional

- landslide analysis in a digital terrain model. *Proceedings of the Fourth International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, 1-12.
- Dhokal, A. S. y Sidle, R. C. (2004). Distributed simulations of landslides for different rainfall conditions. En: *Hydrol. Process*, 18, 757-776. Doi: 10.1002/hyp.1365
- Drescher, A. y Christopoulos, C. (1988). Limit analysis slope stability with nonlinear yield condition. En: *International Journal for Numerical and analytical methods in Geomechanics*, 12, 341-345.
- Duncan, J. M. (1996). State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. En: *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(7), 577 – 596.
- El Kechebour, B. (2015). Relation between stability of slope and the urban density: case study. En: *Procedia Engineering*, 114, 824-831.
- Fay, M., Ghesquiere, F. y Solo, T. (2003). *Desastres naturales y pobres urbanos*. Banco Mundial. p. 4. Recuperado de www.siteresources.worldbank.org
- Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S. y Leroi, E. (2005). A framework for landslide risk assessment and management. En O. Hungr, R. Fell, R. Couture y E. Eberhardt (Eds.), *Landslide Risk Management* (pp. 3-25). London, Taylor & Francis Group.
- Fernández-Merodo, J.A., García-Davalillo, J. C. y Herrera, G. (2013). Modelización numérica de movimientos de ladera lentos: el caso del deslizamiento del Portalet (Huesca). En E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.), *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, (pp. 1119-1130). Palma de Mallorca.
- Formetta, G., Rago, V., Capparelli, G., Rigon, R., Muto, F. y Versace, P. (2014). Integrated physically based system for modeling landslide susceptibility. En: *Procedia Earth and Planetary Science*, 9, 74-82.
- Fraustro, M. O. (1999). Derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo provocados por la sismicidad en el graben de Cuauhtepac: región sur de la Sierra de Guadalupe, en la Ciudad de México. En: *Investigaciones Geográficas*, 38, 15-29.
- García, A. N., Marín, C. R. y Méndez, E. K. (2009). “*Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la*

- república mexicana en el año 2007*”, Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. p. 619.
- García, A. N. M., Méndez, E. K. M., Nava, S. S. y Vázquez, B. F. (2016). “*Impacto socioeconómico de los desastres en México durante 2015*”, Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. p. 18.
- 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. En: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 2, 195-204.
- Garnica, P., Rojas, E. y Mora, R. S. (2010). Deslizamiento en San Juan del Grijalva, Chiapas. *XVI Reunión Nacional de Profesores de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, 75-79.
- Gens, A. y Olivella, S. (2001). Numerical analysis of radioactive waste disposal. En B. A. Schrefler (Ed), *Environmental Geomechanics* (pp. 203-234). New York, USA, Springer-Verlag Wien.
- Godt, J. W., Schulz, W. H., Baum, R. L. y Savage, W. Z. (2008). Modeling rainfall conditions for shallow landsliding in Seattle, Washington. En Baum, R. L., Godt, J. W. y Highland, L. M. (eds.), *Landslides and Engineering Geology of the Seattle, Washington: Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 20, 137-152.
- González, V. L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Person Prentice Hall. Madrid, España. p. 715.
- Griffiths, D. V. y Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. En: *Geotechnique*, 49(3), 387-403.
- Highland, L. M. y Schuster, R. L. (2003). “*Significant landslide events in the United States*”, *Geological Survey (U. S.)*. Report, pp. 21.
- Holtz, R. D. y Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. New Jersey, USA. Prentice Hall. p. 746.
- Hungr, O., Leroueil, S. y Picarelli, L. (2013). Varnes classification of landslides types, an update. En: *Landslides*, 11, 167-194.
- Iida, T. (2004). Theoretical research on the relationship between return period of rainfall and shallow landslides. En: *Hydrological Processes*, 18, 739-756.
- Jaime, P. A., Coliente, T. A. y Medrano-Rivera, V. H. (2010). Estabilidad de laderas y taludes. En: *XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, 3, 911-920. Guerrero, México.

- Jaimes, T. M. A., Niño, L. M., Reinoso, A. E. y Padilla, R.C. (2010). Base de datos de deslizamientos inducidos por sismo y lluvia en México para calibrar un modelo de análisis de talud infinito. En: *XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, 3, 895-901. Guerrero, México.
- Jiang, Y., Liao, M., Zhou, Z., Shi, X., Zhang, L. y Balz, T. (2016). Landslide deformation analysis by coupling deformation time series from SAR data with hydrological factors through data assimilation. En: *Remote sensing*, 8, 179, 1-22.
- Jibson, R. W. (2005). *Landslide hazards at La Conchita, California* (Report 2005-1067). USA: USGS. p. 12.
- Jiménez, E. M., Eslava, M. H., Salas, S. M. A., Vázquez, C. M. T., Matías, R. L. G., Camacho, Q. K. S. y Acosta, C. L. (2014). "Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república Mexicana en el año 2000". 2 Serie impacto socioeconómico de los desastres en México, Centro Nacional de Prevención de Desastres. p. 99. ISBN 970-628-592-X
- Lanni, C., Borga, M., Rigon, R. y Tarolli, P. (2012). Modelling shallow landslide susceptibility by means of a subsurface flow path connectivity index and estimates of soil depth spatial distribution. En: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3959-3971.
- Lepore, C., Arnone, E., Noto, L. V., Sivandran, G. y Bras, R. L. (2013). Physically based modeling of rainfall-triggered landslides: a case study in the Luquillo forest, Puerto Rico. En: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 3371-3387.
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F. y Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. En: *Journal of Geophysical Research*, 99(D7), 14415-14428.
- Luo, G., Hu, X., Gu, C. y Wang, Y. (2012). Numerical simulations of kinetic formation mechanism of Tangjiashan landslide. En: *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(2), 149-159.
- Michalowski, R.L. (1995). Slope stability analysis: a kinematical approach. En: *Geotechnique*, 45, 283-293.

- Monteleone, S. y Sabatino, M. (2014). Hydrogeological hazards and weather events: triggering and evolution of shallow landslide. En: *International Soil and Water Conservation Research*, 2(2), 23-29.
- Mora-Ortiz, R. S. y Rojas-González, E. (2012). Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas. En: *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 8(1), 55-68.
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D. y Rhenals, R. L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. En: *Revista EIA*, 5, 59-69.
- Ng, K. C., Parry, S., King, J. P., Franks, C. A. M. y Shaw, R. (2002). *Guidelines for natural terrain hazard studies* (Geo Report No. 138, GEO Special Project Report No. SPR 1/2002). Hong Kong. p. 138.
- Norini, G., Capra, L., Borselli, L., Zuniga, F. R. Solari, L. y Sarocchi, D. (2010). Large scale landslide triggered by quaternary tectonics in the Acambay graben, Mexico. En: *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1445-1455.
- Parrot, J. F. y Ochoa-Tejeda, V. (2013). The 2010 Muddy-debris flow of Anganguero (Mexico): modeling and simulation. En C. Margottini et al. (Eds), *Landslide Science and Practice*, 3, (pp. 61-66). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Peña. R. C. A. (2014). *Monitoreo y modelo sistémico a deslizamiento superficial de suelos para Manizales. Tesis (Doctoral)*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia. P. 80.
- Pinilla, H. M. C. y Pinzón, C. C.A. (2016). An assessment of the El Niño and La Niña impacts focused on monthly and seasonal rainfall and extreme dry/precipitation events in mountain regions of Colombia and México. En: *Adv. Geosci.*, 42, 23-33.
- Pinyol, N. M., Alonso, E. E. y Olivella, S. (2008). Rapid drawdown in slopes and embankments. En: *Water Resources Research*, 44, 22S.
- Preston, W. K. (2006). Mathematical models of dynamic physical systems. En M. Kutz (Ed), *Mechanical engineers' Handbook: instrumentation, systems, controls and mems* (pp. 300- 382). New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.
- Ramos-Bernal, R. N., Vázquez-Jiménez, R., Romero-Calcerrada, R., Novillo, C. J., Arrogante-Funes, P. y Sánchez, T. S. (2015). Identificación

- de deslizamientos de laderas aplicando técnicas de detección de cambios a imágenes Landsat en la zona costera del Estado de Guerrero, México. En de la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R., Rodríguez, M. (Eds), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* (pp 827-834). Universidad de Zaragoza-AGE.
- Rosete, V. F.A., Pérez, D. J. L. y Bocco, G. (2009). Contribución al análisis del cambio de uso del suelo y vegetación (1978-2000) en la península de Baja California, México. En: *Investigación Ambiental*, 1(1), 70-82.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Ochiai, H., Wang, F. y Wang, G. (2005). Aerial prediction of earthquake and rain induced rapid and long-traveling flow phenomena (APERITIF) (M101). En K. Sassa, H. Fukuoka, F. Wang y G. Gonghui (Eds), *Landslides Risk Analysis and Sustainable Disaster Management* (pp. 99-108). Berlín, Alemania.
- Schmidt, M. A., Brugger, J., Zhao, C. y Schacht, U. (2010). Fluids in geological processes-The present state and future Outlook. En: *Journal of Geochemical Exploration*, 106, 1-7.
- Schmook, B., Álvarez-Gordillo, G., Martínez-Velasco, G. y Lopez-Ochoa, M. S. (2016). “Desastres, desplazamiento interno y migración laboral en la Sierra de Chiapas”, en Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población (Eds.), *Papeles de Población*, (pp. 201-232). Toluca, México, CIEAP-UAEM, No. 87.
- Serri, V., Romero, E., Lloret, A., Suriol, J. y Alonso, E. E. (2013). Análisis de procesos termo-hidro-mecánicos en deslizamientos rápidos en un nuevo equipo de corte anular rápido. En E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.), *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, (pp. 1157-1166). Palma de Mallorca.
- Soberón-Mora, J.A., Cadena-Vargas, E. y Orozco-Hernández, M.E. (2015). “Desarrollo económico y migración interna en las zonas metropolitanas de México 1990-2010”, en Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población (Eds.), *Papeles de Población.*, (pp. 147-170). Toluca, México, CIEAP-UAEM, No. 86.
- Soto-Cortés, J. J. (2015). “El crecimiento urbano de las ciudades: enfoques desarrollista, autoritario, neoliberal y sustentable”, en L. de Jesús A. (Eds.), *Paradigma económico*, (pp. 127-149). Toluca, México.

- Strokova, L. (2019). Recognition of geological processes in permafrost conditions. En: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. [Http://doi.org/10.1007/s10064-019-01511-4](http://doi.org/10.1007/s10064-019-01511-4)
- Suárez, D. J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda. p. 550.
- Tarchi, D., Antonello, G., Casagli, N., Farina, P., Fortuny-Guasch, J., Guerri, L. y Leva, D. (2005). On the use of ground-based SAR interferometry for slope failure early warning: the Cortenova rock slide (Italy). En K. Sassa, H. Fukuoka, F. Wang y G. Gonghui (Eds), *Landslides Risk Analysis and Sustainable Disaster Management* (pp. 336-342). Berlin, Alemania.
- Teófilo, S. E. (2019). *Modelo hidromeccánico para evaluar el deslizamiento del suelo por efecto del flujo subsuperficial de agua*. Tesis (Doctorado en Ciencias). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. p. 190.
- Teófilo, S. E. (2015). *Propuesta metodológica para la estimación de la infiltración eficaz con uso del infiltrómetro de cilindros concéntricos rediseñado*. Tesis (Maestría en Ciencias). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 142.
- Teófilo, S. E. (2010). *Aplicación del infiltrómetro de cilindros concéntricos en la determinación aproximada de la velocidad de infiltración lateral*. Tesis (Licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 121.
- Teófilo, S. E. y Morales, R. G. P. (2018). Propuesta del modelo físico del infiltrómetro de cilindros concéntricos rediseñado multifuncional (ICCRM). En: *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(5), 103-131.
- Teófilo-Salvador, E., Morales-Reyes, G. P., Muciño-Castañeda, R. y Esteller-Alberich, M. V. (2019). Experimentación reducida-controlada in situ del deslizamiento de suelo por efecto de flujo subsuperficial de agua. En: *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(3), 1-12.
- Towhata, I., Uchimura, T. y Gallage, C. (2005). On early detection and warning against rainfall-induced landslides (M129). En K. Sassa, H. Fukuoka, F. Wang y G. Gonghui (Eds), *Landslides Risk Analysis and Sustainable Disaster Management* (pp. 132-139). Berlin, Alemania.
- Trancoso, G., R. A., Fontes, G. R., de Carvalho, J. O. A., Ferreira, F. N. y do Amaral, J. E. V. (2013). Combining spatial models for

- shallow landslides and debris-flow prediction. En: *Remote Sensing*, 5, 2219-2237.
- United States Army Corps of Engineers, USACE. (2003). *Slope stability, engineer manual* (No. 1110-2-1902). Washintong, DC: Department of the Army. p. 205.
- United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, USDA. (2004). *Soil survey laboratory methods manual*. Soil Survey Laboratory Investigations Report, 42, 735 p.
- Vargas, J. E. (2002). “*Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales*”, *Serie Medio Ambiente y Desarrollo 50*. Santiago de Chile. p. 84.
- Vázquez, P., J. C., Backhoff, P. M. G., Gonzalez, M. J. O. y Morales, B. E. M. (2016). “*Establecer la vulnerabilidad y evaluar el riesgo por deslizamientos, inundaciones pluviales y socavación de puentes en la red federal de carreteras*”, *Instituto Mexicano del Transporte*. p. 75. Recuperado de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt470.pdf>
- Velasco, M. V. D., Flores, G. F. G., González, C. G., Flores, M. M. J. y Moreno, C. H. A. (2015). Desarrollo y validación de una estación meteorológica automatizada de bajo costo dirigida a agricultura. En: *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(6), 1253-1264.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Mayorga, S. R., Díaz, J. R., Alcántara, C., Castro, R., Fernández, T., Palacio, J. L., Bocco, G., Gómez, R. G., Luna, G. L., Trejo, I., López, G. J., Palma, M., Peralta, A., Prado M. J. y González M. F. (2002). Estado actual y dinámica de los recursos forestales de México. En: *Biodiversitas*, 41, 8-15.
- Wu, W., Switala, B. M., Sudan, A. M., Tamagnini, R., Auer, M., Graf, F., te Kamp, L. y Xiang, W. (2015) Effect of vegetation on stability of soil slopes: numerical aspect. En: *Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flow*, 163-177.

