

Inestabilidad de laderas en el Estado de Veracruz: *necesidades de investigación y búsqueda de soluciones*

MEMORIAS EN EXTENSO

Leonor Jiménez
editor

Guillermo Angeles
Beatriz Marín
Katrin Sieron
Ana María Alarcón
compiladores



**Inestabilidad de laderas en el
estado de Veracruz:
necesidades de investigación y
búsqueda de soluciones**

Memorias en extenso

Leonor Jiménez (Editor)

Guillermo Angeles, Beatriz Marín, Katrin Sieron y
Ana María Alarcón (compiladores)



Dr. Martín R. Aluja Schuneman Hofer

Director General

Dr. Guillermo Angeles

Secretario Académico

D.R. © 2015 por Instituto de Ecología, A.C.
Carretera antigua a Coatepec No. 351,
El Haya, Xalapa 91070, Veracruz, México

ISBN:978-607-7579-49-6

Título: Inestabilidad de laderas en el estado de Veracruz: necesidades de investigación y búsqueda de soluciones. Memorias en extenso

Publicación en línea:

http://www1.inecol.edu.mx/cv/CV_pdf/libros/Inestabilidad_de_laderas_en_el_estado_de_Veracruz.pdf

D.R. © Esta obra es una publicación editada por el Instituto de Ecología, A.C. México. El contenido es responsabilidad de los autores. Se autoriza la reproducción parcial del contenido siempre y cuando se cite la fuente.

**Coordinación interinstitucional
del Foro**

Instituto de Ecología A. C.

Dr. Guillermo Angeles Álvarez

Dra. María Leonor Jiménez Valdés

*Secretaría de Protección Civil del Estado de
Veracruz*

Lic. Noemí Z. Guzmán Lagunes

Lic. Alejandro Bonilla Bonilla

Comité académico

Dra. María Leonor Jiménez Valdés

M. en C. Beatriz E. Marín Castro

Dra. Katrin Sieron

Dra. (cnd) Ana María Alarcón
Ferreira

**Diseño de portada de Memorias y
cartel del Foro**

Área de Diseño del INECOL

Área de Comunicación

Social de la SPC-VER.

Exposición gráfica en el Foro

Lic. Alfonso Juan Rivas

Lic. Ramón Pérez Molina

I.A. Rafael Ávila Blancas

Apoyo logístico en el Foro

M. en C. Pasquinel de la Fraga
Chávez

Lic. Lorenzo A. Fontecilla Martínez

C. Mónica Patricia García Rivera

Lic. Mónica Bonilla Villarreal

Lic. Noé González Flores

Lic. Liz Mariana Bravo Flores

Lic. Diego Arrez Rebolledo

M. en C. Sac Nicté González Posada

I.A. Kelyna Ramírez Martínez

Ing. Víctor M. Hernández Miranda

Ing. Juan Carlos García Vásquez

Biol. Faustino R. Flores Fuentes

**Corrección de estilo de las
Memorias en extenso**

Beatriz Rebeca Piña Martínez

Paula Gutiérrez Martínez

Tania I. Hernández Leal

Prólogo

Instituto de Ecología A.C.

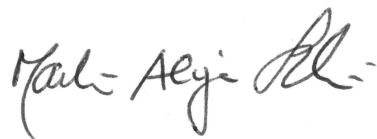
La estabilidad de taludes es un tema de altísima importancia para la seguridad de la población humana, pero también tiene un gran impacto en la conservación y la restauración ecológica que impacta a diversos organismos. En esta obra, el fenómeno se analiza desde diferentes puntos de vista: del de los ingenieros de carreteras, del de los responsables de prevenir o reducir los daños humanos y materiales ocasionados por derrumbes y del de los ecólogos, interesados en la sucesión de éstos ambientes degradados y su rehabilitación mediante técnicas de bio-ingeniería.

En el Instituto de Ecología, A.C., llevamos ya varios años llamando a la comunidad científica a colaborar para desarrollar investigación en éste importante tema, a que contribuyan con sus conocimientos y propongan formas de atenuar un problema que rebasa las barreras geográficas, pues ocurre en nuestro Estado y en cualquier parte del mundo. Esta obra que tiene en sus manos, estimado lector, es el fruto de ese llamado, que afortunadamente cayó en oídos receptivos, que se dieron a la tarea de convocar en un 1er Foro a actores importantes de México y otras partes del mundo, que ya estaban trabajando en el tema.

El Foro y estas memorias son resultado del intercambio de diversos puntos de vista y de largas horas de discusión entre reconocidos expertos en el tema de la estabilidad de taludes. Hemos logrado con este documento marcar las principales líneas de acción que involucra a ingenieros, investigadores científicos, personal especializado en materia de protección civil, tomadores de decisiones y sociedad en general, a trabajar en conjunto para disminuir en gran medida los procesos de remoción en masa causados por el hombre. Esperamos que éste documento sirva de libro de consulta y punto de partida en materia investigación,

ingeniería y protección civil y que además inspire a más actores a unirse a este esfuerzo.

Xalapa, Veracruz a 2 de diciembre 2015

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Martín R. Aluja Schuneman Hofer'.

Martín R. Aluja Schuneman Hofer
Director General
Instituto de Ecología A. C.

Índice

Introducción

Juan Cervantes Pérez y Katrin Sieron

Capítulo 1. Mecanismos asociados a la inestabilidad de laderas: factores que condicionan y desencadenan los procesos de remoción en masa

Katrin Sieron

Capítulo 2. Medidas de prevención y protección contra deslizamientos

Leobardo Domínguez Morales

Capítulo 3. Maximizing restoration success on landslides with ecological tools

Lawrence Walker

Capítulo 4. Protecting slopes from shallow landslides – the role of vegetation

Alexia Stokes, Claire Atger, A. Glyn Bengough, Thierry Fourcaud y Roy C. Sidle

Capítulo 5. Inventario nacional de fenómenos geológicos: capa de movimientos en masa

Mónica Martínez Medina y Francisco Alejandro Barrientos Reyna

Capítulo 6. Antecedentes de los deslizamientos de laderas en Veracruz

Wendy Morales Barrera y Sergio Rodríguez Elizarrarás

Capítulo 7. Consideraciones hidrometeorológicas relacionadas con el deslizamiento de laderas en el estado de Veracruz

Federico Acevedo y José Llanos

Capítulo 8. Aspectos geomorfológicos, edáficos e hidrológicos relacionados con la inestabilidad de laderas en el centro del estado de Veracruz

Daniel Geissert Kientz y Estela G. Enríquez Fernández

Capítulo 9. Cambio Global Forestal y Veracruz: hacia la cuantificación de una variable que influye en la estabilidad de laderas

Andrés de la Rosa Portilla y Juan Carlos Olivo Escudero

Capítulo 10. Rehabilitación de laderas a orilla de carreteras en México

Noel Riaño Ramírez

Capítulo 11. Inestabilidad de laderas – taller de trabajo

Leonor Jiménez, Katrin Sieron, Beatriz Marín y Ana María Ferreira

Conclusiones

Guillermo Angeles y Leonor Jiménez

INTRODUCCIÓN

Juan Cervantes Pérez y Katrin Sieron
Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana

La superficie de la Tierra ha estado y sigue sujeta a cambios constantes debido a su interacción con agentes internos y externos que propician su inestabilidad. Entre los procesos más violentos y rápidos que transforman la superficie terrestre se encuentran los procesos de remoción en masa (PRM). Durante los últimos años la problemática relacionada con los PRM ha estado presente en la vida diaria de las personas, por lo que un creciente número de incidentes ha despertado en la autoridad y la academia el interés de unir esfuerzos para enfrentar el problema.

Por sus características topográficas, morfológicas y climáticas, el estado de Veracruz ha sido vulnerable a los PRM, mismos que han tenido un marcado aumento en la última década, especialmente durante los años en los que se registraron eventos extraordinarios de lluvia, como 2013. Estos eventos provocan movimientos de ladera que forman parte del proceso natural de estabilización del terreno. Sin embargo, dicho proceso afecta directamente a muchas familias que ante la necesidad de expansión urbana invaden de manera descontrolada terrenos cada vez menos aptos y más riesgosos para el desarrollo de las diversas actividades antrópicas.

Como respuesta a esta problemática, el Instituto de Ecología A.C. (INECOL) en colaboración con la Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz (PC) convocó a una reunión con diversas instituciones y dependencias del sector público y privado que comparten el interés por esta temática. Como consecuencia de ello, los días 6 y 7 de noviembre de 2014 se celebró el 1er Foro

“Inestabilidad de laderas en el estado de Veracruz: necesidades de investigación y búsqueda de soluciones” en las instalaciones del INECOL.

Las personas que asistieron al foro representaron a instituciones educativas (40.64%), personal de dependencias federales y estatales (34.22%), consultoras y empresas de restauración ecológica (12.83%), personal de municipios afectados (10.69%) y público en general (1.6%). Aunque la temática estuvo enfocada en el estado de Veracruz, se contó con la participación de investigadores nacionales y extranjeros reconocidos en el tema, los cuales desarrollan proyectos en diferentes partes del mundo.

La importancia que tiene la difusión de los diferentes puntos de vista sobre la problemática de los PRM motivó la publicación de estas memorias, las cuales contienen los extensos de las ponencias y los resultados del Taller de Trabajo de Inestabilidad de Laderas. El cierre de estas memorias es una breve conclusión sobre las actividades de dicho foro.

El orden de los extensos presentados a lo largo de los once capítulos es el mismo que hubo en el foro y corresponde a una secuencia lógica basada en la diversidad del público presente. Con el fin de homogeneizar el conocimiento de las diferentes áreas acerca de los procesos que influyen en la estabilidad de una ladera, primero se presenta una síntesis de los conceptos básicos usados para denominar a los PRM, seguida de la clasificación de estos últimos y de los diversos factores que los detonan (Capítulo 1). También se presenta la perspectiva de la ingeniería y en específico de la geotecnia (Capítulo 2).

Ante un evento de remoción en masa se generan nuevas áreas desprovistas de vegetación que son colonizadas por comunidades vegetales, por lo que se explica cómo la comprensión de la dinámica y la ecología de las comunidades vegetales proporcionan nuevas herramientas para la prevención, mitigación y restauración de deslizamientos (Capítulo 3), lo cual permite, además, la adecuación de modelos para estimar qué tan susceptible es una ladera de sufrir la ocurrencia de un movimiento en masa. Estos modelos incluyen factores biológicos (Capítulo 4).

Una vez descrito el fenómeno desde diferentes puntos de vista, se expone una metodología que sirve para reunir la información que se tiene sobre los PRM ocurridos en el pasado. Con dicha

información se creó un inventario nacional de los fenómenos geológicos de México (Capítulo 5). En relación con el estado de Veracruz, se presentan casos específicos de este tipo de fenómenos ocurridos durante 2013, año en que la temporada extraordinaria de lluvias provocó una alta incidencia de los PRM (Capítulo 6). Se analizó con más precisión el papel del agua en la ocurrencia de los movimientos en masa, así como los cambios a los cuales esta ocurrencia queda sujeta; por ejemplo, las trayectorias de ciclones en las últimas décadas (Capítulo 7). Derivado de la problemática veracruzana se presenta un análisis de los PRM con enfoque de cuencas que describe los casos ocurridos en el estado de Veracruz y su relación con las características geomorfológicas y edáficas de las zonas en donde ocurren. Dada la variedad de factores asociados a los PRM, se remarca la importancia de conocer la problemática asociada a los PRM en cada región para contribuir a subsanar la falta de trabajos científicos de calidad que traten sobre los PRM de Veracruz (Capítulo 8). También se plantean medidas de remediación biológica, en las cuales nuevamente se enfatiza cómo la remoción de la cubierta vegetal se convierte en un factor que influye en la inestabilidad de las laderas. Además, se proponen estrategias para enfrentar el problema, por ejemplo, la reforestación de áreas vulnerables (Capítulo 9). En el último extenso de ponencia se lee sobre las prácticas de manejo y restauración de ecosistemas en el sector carretero, que tienen como objetivo estabilizar los taludes artificiales creados durante los cortes de la construcción en el terreno (Capítulo 10). Finalmente y como parte significativa de este libro, se agregan los resultados del taller de trabajo realizado de forma paralela al foro (Capítulo 11). En este apartado se describen las necesidades, los puntos de vista, los trabajos actuales de las diferentes instituciones involucradas y las posibilidades de colaboración para solucionar e investigar con éxito sobre la problemática de los PRM.

Este 1er Foro “Inestabilidad de laderas en el estado de Veracruz: necesidades de investigación y búsqueda de soluciones”, conjuntado en estas memorias, es un esfuerzo colectivo invaluable dado que se logró reunir la participación de dos sectores: el académico, con la investigación sobre el tema, y el sector gubernamental, con la toma de decisiones que le corresponde y las acciones que se ejecutan en campo. De esta forma se logró poner el primer precedente en el estado de Veracruz para generar iniciativas

multidisciplinarias y de trabajo conjunto entre los diversos sectores que hasta ahora habían enfrentado la problemática de manera aislada.

CAPÍTULO 1

Mecanismos asociados a la inestabilidad de laderas: factores que condicionan y desencadenan los procesos de remoción en masa

Katrin Sieron
Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana

Resumen

Los procesos de remoción en masa (PRM), comúnmente conocidos como deslizamientos de tierra, forman parte de los procesos geodinámicos. Son procesos que van modelando la superficie de la Tierra. Los PRM ocurren cada vez con mayor frecuencia y magnitud, lo que se debe, principalmente, a la invasión de terrenos no aptos para la construcción de infraestructura humana. Los PRM se clasifican según el mecanismo de movimiento en seis clases; desprendimientos, desplomes, flujos, deslizamientos, reptación, desplazamiento lateral y, como un tipo adicional, los movimientos complejos que son la combinación de dos o más de los anteriores. Estos seis tipos de PRM se pueden subdividir según el material involucrado. Los factores que influyen en los PRM se dividen en condicionantes y desencadenantes (o extrínsecos e intrínsecos).

Palabras clave: movimientos de terreno, clasificación, factor condicionante, factor desencadenante.

Introducción

La superficie de la Tierra está cambiando constantemente mediante diversos procesos que están incluidos en el tema de la geodinámica. Los procesos geodinámicos incluyen los internos o endógenos y los externos o exógenos. Los agentes de los procesos geodinámicos exógenos que tienen la función de la modelación de la superficie de una manera destructiva, controlados principalmente por la gravedad, se subdividen en tres categorías: agentes atmosféricos, hidrológicos y biológicos.

Los procesos de remoción en masa (PRM), también conocidos como deslizamientos, presentan los procesos más poderosos dentro de la geodinámica con mayor destrucción asociada. Además, muchas veces representan procesos que le siguen temporalmente a otros fenómenos naturales, como los sismos, incendios, erupciones volcánicas, inundaciones y huracanes.

Existe una gran variedad de estos PRM que incluyen desde caídas de roca hasta flujos de lodo. Ocurren no solamente debido a las razones más obvias, como son la pendiente y los lugares en donde han ocurrido históricamente, sino, también, y en gran medida, por las alteraciones del paisaje causadas por el ser humano.

Las poblaciones se expanden cada vez con mayor frecuencia hacia terreno no apto para la construcción, por ello estos fenómenos y su potencial destructivo han incrementado.

Terminología y clasificación de los procesos de remoción en masa

Los movimientos de terreno (MT) son generalmente conocidos como deslizamientos, un término que tiene su origen en la traducción de la palabra *landslides* (inglés). Pero ya que el término *deslizamientos* se refiere a un tipo específico incluido en los PRM, se evitará utilizarlo para no caer en confusiones (Alcántara, 2000). Según Alcántara el término general *landslide* se debería traducir como movimientos de terreno (MT).

Los MT incluyen los movimientos descendentes de un cierto volumen de material constituido por roca, suelo, detrito o sus combinaciones (Cruden, 1991).

Para clasificar y describir los PRM (Sharpe, 1939; Nemčok *et al.*, 1972; Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Cruden y Varnes, 1996), se

toman en cuenta dos términos: el tipo de movimiento y el tipo del material involucrado (Cuadro 1). Por consiguiente, se construyen términos como *deslizamiento de suelo* o *desprendimiento de roca*, entre otros (Cruden y Varnes, 1996). En la clasificación de los PRM, el tipo de material comprende la roca, definido como masa firme intacta e *in situ* antes de comenzar el movimiento; la tierra (o barro) que comúnmente se define como material compuesto de partículas menores a 2 mm; y el detrito (derrubios) que consiste de 20-80% de partículas mayores a 2 mm.

Cuadro 1. Clasificación de los PRM según el tipo de movimiento y material (modificado de Varnes, 1978 y Hutchinson, 1988).

Tipo de movimiento	Tipo de material		
	Roca	Derrubios Grano grueso	Suelo Grano fino
Caída/ Desprendimiento (Fall)	Caída o desprendimiento de roca	Caída o desprendimiento de derrubios	Caída o desprendimiento de suelos
Desplome/Vuelco (Topple)	Vuelco/Desplome de roca	Vuelco/desplome de derrubios	Vuelco/desplome de suelo
Deslizamiento (Slide)	Deslizamiento	Deslizamiento	Deslizamiento
Rotacional/traslacional	de roca	de derrubios	de suelo
Desplazamiento lateral (Lateral spread)	Desplazamiento lateral en rocas	Desplazamiento lateral en derrubios	Desplazamiento lateral en suelos
Flujo (Flow)	Flujo de roca	Flujo de detrito	Flujo de tierra
Combinado (Complex)	Combinación de dos o más tipos de movimientos		

La velocidad de los MT depende primero del tipo del material y segundo del ángulo de la ladera (pendiente), además varía entre movimientos apenas perceptibles, reconocidos, por ejemplo, por la inclinación de objetos; y movimientos extremadamente rápidos como las caídas de roca. Cruden y Varnes (1996) definen distintas clases de velocidades, a cada una de estas clases les asignan un cierto potencial destructivo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Rango de velocidades de los PRM; varían de extremadamente lentos a extremadamente rápidos. Después de Cruden y Varnes (1996).

Clase de velocidad	Descripción	Velocidad típica	Probable significado destructivo
7	extremadamente rápido	5 m/seg	Catástrofe de gran violencia; edificios destruidos por el impacto del material desplazado; muchas muertes, escapatoria improbable.
6	muy rápido	3 m/seg	Algunas pérdidas de vidas; velocidad demasiado grande para permitir el escape a todas las personas.
5	rápido	1.8 m/hr	Posible evacuación escapatoria; estructuras, bienes y equipo destruido.
4	moderado	13 m/mes	Algunas estructuras temporales y no vulnerables pueden mantenerse temporalmente.
3	lento	1.6 m/año	Construcción para remediar puede realizarse durante el movimiento; estructuras no vulnerables pueden mantenerse con trabajo frecuente de mantenimiento si el movimiento total no es alto durante una fase particular de aceleración.
2	muy lento	15 mm/año	algunas estructuras permanentes no dañadas durante movimiento
1	extremadamente lento		imperceptible sin uso de instrumentos, construcción posible con precauciones

A continuación, se describen los seis tipos de PRM más importantes.

a) Desprendimientos o caídas (*falls*)

En los denominados desprendimientos o caídas, el material se desprende de laderas empinadas o acantiladas, y mediante la caída

libre, rodando o botando se desplaza hacia la base del acantilado, en donde queda depositado. El movimiento es de muy rápido a extremadamente rápido (Cuadro 1 y Figura 1).



Figura 1. Desprendimientos: (A) desprendimiento esquemático (después de Highland y Johnson, 2004); (B) desprendimiento de material en una gravera abandonada (cono de escoria en Los Tuxtlas, Veracruz.); (C) acantilado en la costa del Golfo (Roca Partida, Veracruz.) y (D) material desprendido al pie de un talud artificial en Los Tuxtlas.

b) Desplomes o vuelcos (*topples*)

En este caso, bloques de material rocoso o de suelo se inclinan hacia fuera de la ladera y se separan del macizo para luego derivar en desprendimientos o deslizamientos; la separación depende de la geometría de la ladera (Figura 2). El movimiento de los desplomes o vuelcos varía de forma considerable de extremadamente lento a extremadamente rápido.

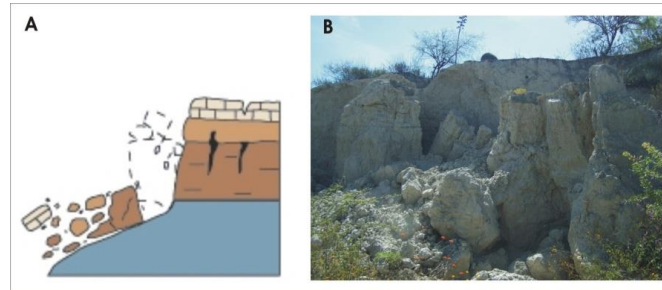


Figura 2. (A) Desplomes o vuelcos (esquemático) por Highland y Johnson (2004) y (B) estratos de material volcánico fuertemente meteorizados y afectados por desprendimientos y desplomes en Oaxaca.

c) Flujos (*flows*)

Los flujos incluyen movimientos rápidos de una masa viscosa que se compone de diferentes materiales como detritos, suelo o barro, roca y una contribución variable de agua o nieve/hielo (Figura 3). Los flujos que se forman en los flancos de un volcán se denominan *lahares*, un término que proviene de Indonesia. Los flujos que inicialmente se forman ladera arriba pueden incorporar material adicional en su camino y aumentar su volumen.

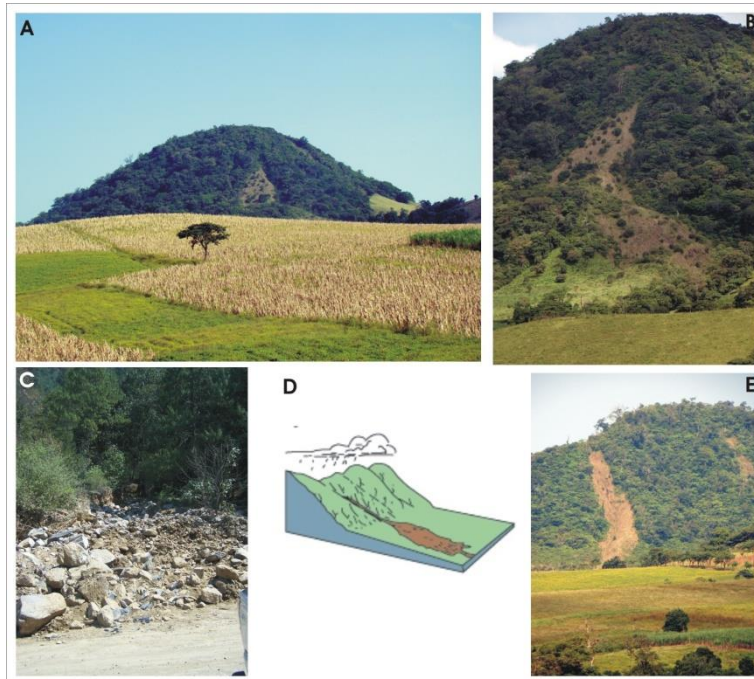


Figura 3. (A) y (E) Cono de escoria en Los Tuxtlas, Veracruz que tiene depósitos de flujos compuestos de suelo y detrito; (B) acercamiento de (A); (C) depósito de flujo de detrito en Maltrata, Veracruz y (D) dibujo esquemático de un flujo (Highland y Johnson, 2004).

d) Deslizamientos (*slides*)

Los deslizamientos son PRM causados por el fallamiento de cizalla a lo largo de una o varias superficies de ruptura. Existen los deslizamientos traslacionales y rotacionales (Figura 4) y un subtipo denominado deslizamiento en bloque que tiene una sola unidad que se desplaza ladera abajo. En los deslizamientos traslacionales, una masa de material se desliza sobre una superficie aproximadamente plana; además, los movimientos generalmente son superficiales y controlados por zonas de debilidad. En los deslizamientos rotacionales, una masa, generalmente compuesta de material homogéneo, se desliza sobre una superficie de fractura circular.



Figura 4. Deslizamientos (*slides*). (A) Dibujo esquemático de deslizamiento rotacional (después de Highland y Johnson, 2004); (B) deslizamiento rotacional en Chiconquiaco, Veracruz (foto cortesía de José Luis Murrieta Hernández), (C) dibujo esquemático de deslizamiento traslacional y (D) deslizamiento traslacional en Los Tuxtlas, Veracruz.

e) Reptación (*creep*)

La reptación es un corrimiento de suelo que afecta la capa superficial del mismo. Es provocado por la gravedad y la inestabilidad de ladera (Figuras 5A, B y D). El movimiento es generalmente lento y continuo, y produce arqueamiento de los tallos de los árboles, la inclinación de vallas y postes y la convexidad en la parte inferior de las vertientes debido al proceso de acumulación de material.

f) Desplazamientos laterales (*spreads*)

En este caso (Figura 5C), una masa de suelo o roca se extiende lateralmente en pendientes suaves y se comporta como un fluido. La velocidad del movimiento varía, pero generalmente es moderada. Las causas del movimiento son el incremento de la presión de poro o la licuefacción de la capa subyacente al suelo durante un terremoto.

Además de estos seis tipos principales, existen los movimientos complejos que involucran más de un mecanismo; por ejemplo el desprendimiento de material puede continuar como un flujo.

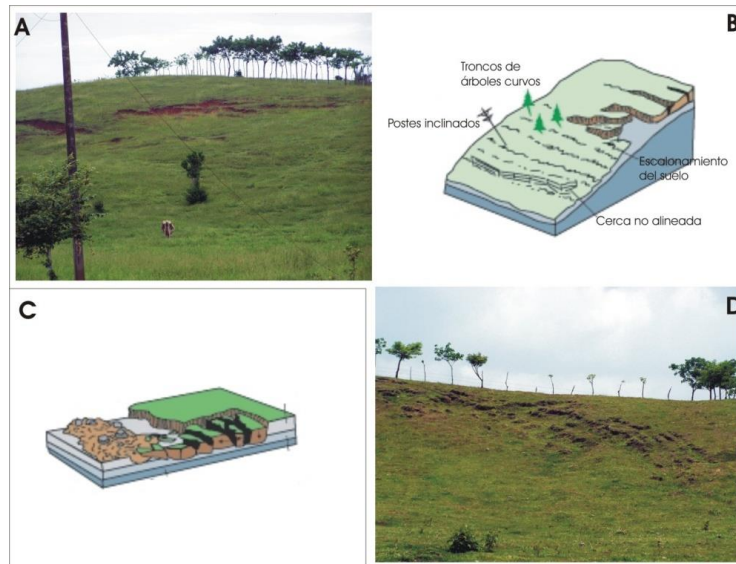


Figura 5. (A) y (D) Reptación (*creep*) en laderas deforestadas en Los Tuxtlas, Veracruz; (B) dibujo esquemático de reptación (Highland y Johnson, 2004) y (C) dibujo esquemático desplazamiento lateral (Highland y Johnson, 2004).

Factores condicionantes y desencadenantes

Generalmente, para que se produzcan los MT no actúa solo un factor, sino una combinación de factores condicionantes, a veces también denominados determinantes, que inciden en el proceso, y factores desencadenantes que activan a este último.

Entre los factores condicionantes, se encuentran factores geológicos (litológicos y estructurales), climáticos, hidrológicos, topográficos y la vegetación (Cuadro 3).

Cuadro 3. Factores condicionantes.

Factor condicionante	Ejemplo
Geológicos (Litológicos)	 <p data-bbox="956 600 1222 786">Alternancia de estratos de diferente naturaleza. Presencia de materiales alterados por meteorización. Falta de cohesión de los materiales que componen la roca.</p>
Geológicos (Estructurales)	 <p data-bbox="956 837 1206 972">Fallas, fracturas o plegamientos. Disposición paralela de los planos de estratificación respecto de la pendiente.</p>
Climáticos	 <p data-bbox="956 1025 1230 1211">Aportación de agua al subsuelo. Erosión superficial, alteración y meteorización de las rocas (Terzaghi, 1950). Alternancia de épocas (sequía-lluvia; hielo-deshielo).</p>
Hidrológicos	 <p data-bbox="956 1238 1217 1424">Aumento de la escorrentía superficial. Estancamiento de agua. Cambios en el nivel freático de las aguas subterráneas. Alternancia de estratos de diferente permeabilidad.</p>
Geomorfológicos (Topográficos)	 <p data-bbox="956 1503 1193 1529">Pendiente mayor de 15%.</p>
Vegetación	 <p data-bbox="956 1682 1177 1760">Ausencia o escasez de vegetación que sujete el terreno.</p>

Los factores desencadenantes se pueden subdividir en naturales y antrópicos (Cuadro 4).

Cuadro 4. Factores desencadenantes de los PRM.

Tipo de factor	Descripción
Naturales	Fuertes precipitaciones Inundaciones Socavamiento (oleaje) y erosión fluvial Erupciones volcánicas Terremotos
Antrópicos	Cambios de volumen (hielo-deshielo; humedad-desección) Aumento de peso de talud por acumulación de escombros o construcciones Excavaciones con retirada de materiales del pie del talud Creación de taludes artificiales Inundaciones causadas por roturas de presas Estancamiento de aguas por impermeabilización y asfaltado, y encharcamientos por exceso de riegos Deforestación de taludes Explosiones realizadas en la construcción de carreteras, minas, etc.

Aparentemente, los MT también ocurren de manera “espontánea”, pero procesos como pérdidas en la red de abastecimiento de aguas, cambios de uso de suelo y cambios en el manejo del terreno pueden hacerlo susceptible a experimentar un MT (Figura 6 y p. ej. Gutiérrez *et al.*, 1995).



Figura 6. Cambio de uso de suelo y construcción en terrazas en sedimentos terciarios en Los Tuxtlas, Veracruz.

Además, algunas investigaciones indican que las lluvias de gran intensidad y corta duración provocan predominantemente deslizamientos superficiales, flujos de detritos y desprendimientos; mientras que las lluvias por tiempos prologados (días a semanas) de baja a moderada intensidad producen deslizamientos rotacionales, traslacionales y flujos de lodo, suelo o barro (Moya y Corominas, 1997).

Conclusiones

Los MT son procesos que se generan por una combinación de diversos factores condicionantes y desencadenantes que pueden variar según las características de cada región y sitio. Sólo con el conocimiento detallado del área y de los factores que influyen, se puede analizar la susceptibilidad (y posteriormente amenaza y riesgo) de una zona específica que puede experimentar los MT. Estos análisis requieren el manejo simultáneo de una gran cantidad de información sobre los factores inter-relacionados, para lo cual se emplean los Sistemas de Información Geográfica. Entre las múltiples metodologías existentes se encuentran la de Mora-Vahrson, el análisis estadístico uni y multivariado, la evaluación espacial multicriterio y otras más.

Referencias

- Alcántara, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definiciones, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, Bol. Inst. Geograf. UNAM, 41, 7-25.
- Corominas, J. y García, A. (1997). Terminología de los movimientos de ladera. En E. Alonso, J. Corominas, J. Chacón, C. Oteo y J. Pérez (Eds). *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas inestables*, III pp. 1051-1072. Granada, España: Universidad de Granada.
- Cruden, D.M. (1991). A simple definition of a landslide. *IAEG Bull.*, 43, 27-29.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J. (1996). Landslide types and processes. En A.K. Turner y R.L. Shuster (Eds). *Landslides: Investigation and Mitigation (Reporte No. 247)* pp. 36-75. USA: Transportation Research Board Special Report.
- Gutiérrez, F., Arauzo, T., Sancho, C., y Gutiérrez, M. (1995). Factores desencadenantes de los deslizamientos de la cantera del Barrio de La Corona (Ejea de los Caballeros, Depresión del Ebro). *Cuaternario y Geomorfología*, 9, 33-50.

- Hutchinson, J.N. (1968). Mass movement. En R.W. Fairbridge (Ed.) Encyclopedia of Earth Sciences (Vol. 1) pp. 688-695. New York: Reinhold.
- Hutchinson, J.N. (1988). General report, morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. En C. Bonnard (Ed). Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides (Vol. I), pp. 3-35. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema.
- Mora, S. y Vahrson, W.G. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. Bull. Asoc. Engin. Geol., 31 (1), 49-58.
- Moya, J. y Corominas, J. (1997). Condiciones pluviométricas desencadenantes de deslizamientos en el Pirineo Oriental. En *IV* Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas inestables (Vol. I), pp. 199-212.
- Nemčok, A., Pašek, J. y Rybář, J. (1972). Classification of Landslides and Other Mass Movements. Rock Mechanics, 4, 71-78.
- Sharpe, C.F.S. (1939). Landslides and related phenomena. New York: Cooper Square Pub, Inc.
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of Landslides. En *Memories of Geology to Engineering Practice*. pp. 83-123. New York: Geological Society of America.
- Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes. En R.L. Shuster y R.J. Kriszek (Eds.). *Landslides, analysis, and control*. pp. 11-33. Washington D.C.: National Academy of Science, National Research Council Transportation Research Board.
- Highland, L. y Johnson, M. (2004). Landslide types and processes USGS (Fact sheet 2004-3072). Recuperado de <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>

CAPÍTULO 2

Medidas de prevención y protección contra deslizamientos

Leobardo Domínguez Morales
Centro Nacional de Prevención de Desastres

Resumen

En México y Latinoamérica, los deslizamientos de ladera cobran cientos de vidas cada año y son causa frecuente de daños en viviendas y en obras de infraestructura. Suceden principalmente durante lluvias intensas o bien durante eventos sísmicos; aunque también pueden ser detonados o desencadenados por actividades humanas no controladas o no planificadas. Si bien los eventos naturales son inevitables, su impacto se convierte en desastre sólo cuando no estamos preparados para enfrentarlos o reducirlos. La aplicación o implementación de medidas de prevención y/o de mitigación en laderas potencialmente inestables puede ser factible para reducir el peligro de deslizamiento en zonas urbanas y rurales. La selección de los métodos o medidas de prevención y mitigación contra deslizamientos requiere de un conocimiento preciso y detallado de los factores condicionantes y desencadenantes; aspectos que pueden ser estudiados y determinados por especialistas de diversas disciplinas. En general, la estabilización de una ladera o talud necesita de la inversión de recursos económicos considerables; sin embargo, en algunos casos es posible implementar medidas no estructurales o indirectas con las que la población misma, a través del conocimiento y la capacitación, pueda generar condiciones benéficas para la estabilidad de las laderas y taludes. En este artículo, más que discutir sobre el desarrollo teórico y científico

de los métodos de estabilización, se presenta un análisis de los principales factores condicionantes y detonantes que intervienen en la estabilidad o inestabilidad de una ladera o talud y su relación con las fuerzas actuantes y resistentes que intervienen en el factor de seguridad(FS).

Palabras clave: desastre, deslizamiento, prevención, mitigación, capacitación, factor de seguridad.

Introducción

El impacto de los deslizamientos de laderas puede ser muy variado: desde la interrupción de caminos y líneas de transmisión, hasta la pérdida de vidas humanas y la generación de daños materiales cuantiosos. En la actualidad, prácticamente todos los países y todas las ciudades importantes del mundo tienen desarrollos urbanos y zonas rurales, así como infraestructura y bienes económicos que están expuestos a fenómenos de inestabilidad de laderas; por ello, es necesario construir obras de estabilización o de protección que permitan detenerlos o proteger a la población y a la infraestructura de estos fenómenos.

La estabilización de laderas o de taludes es una práctica muy frecuente en la construcción de caminos, carreteras, líneas de transmisión, túneles, puentes y desarrollos habitacionales, y en muchos de estos casos son aspectos que determinan la viabilidad de proyectos e inversiones. Por lo tanto, son temas que requieren especial atención y la participación de especialistas y expertos en temas de geología, geotecnia, geomorfología, geofísica, topografía y otras disciplinas de ciencias de la Tierra.

Con el desarrollo de la tecnología, el diseño de obras y el análisis de la estabilidad de laderas y taludes se han facilitado, y constituyen una práctica generalizada en empresas y gobiernos; sin embargo, la selección del método o métodos de estabilización o de reforzamiento de laderas o taludes, requieren la participación de especialistas que conozcan a profundidad la física del problema y la comprensión de las causas y de las variables que intervienen en los procesos de inestabilidad. Es por ello, que se ha desarrollado esta guía, la cual puede ser una herramienta práctica que proporcione a los lectores un conocimiento global del fenómeno y les permita

identificar las causas o factores que detonan los deslizamientos, a fin de eliminarlos o disminuirlos.

Definición de ladera y talud

Una ladera es una frontera inclinada o transición entre dos elevaciones diferentes de una masa térrea natural. La noción de ladera suele utilizarse para nombrar al declive o superficie inclinada de una montaña, de un monte o de una altura en general (González de Vallejo, 2002). En ocasiones, este término también se usa para indicar la superficie inclinada de una hondonada, una barranca o un gravén. Puede decirse, en este sentido, que la ladera es uno de los lados de una montaña o de un cerro y, casi siempre, utilizamos este término para referirnos a la superficie natural del terreno aunque en algunas de sus partes tenga modificaciones o alteraciones producidas por actividades humanas. Por ejemplo, en las laderas de cerros y montañas es factible que existan cortes para caminos y/o carreteras, por lo tanto, la superficie inclinada que resulta de ese corte será un talud (según se explica en el siguiente párrafo) y, en general, el flanco del cerro o de la montaña seguirá siendo una ladera.

El término talud también se refiere a la inclinación de un terreno, aunque en ingeniería se utiliza para designar tanto a los terrenos que han sido modificados por actividades humanas (cortes y excavaciones), como a la superficie inclinada de obras primarias o secundarias en vías terrestres o hidráulicas, por ejemplo, terraplenes en carreteras, accesos para puentes, cortinas para presas, bordos de tierra y canales, por citar algunos casos.

Factor de seguridad

Las laderas naturales, la ejecución de cortes, la construcción de terraplenes para carreteras, las excavaciones para cimentaciones y canales y la construcción de presas y bordos ocupan un sitio importante en la ingeniería civil. Un aspecto relevante en la determinación de su comportamiento es el análisis de la estabilidad de la superficie inclinada de la ladera o del talud.

En una ladera, existen fuerzas actuantes que inducen esfuerzos cortantes que tienden a causar el movimiento pendiente abajo de una porción de los materiales que componen la ladera o talud, por lo que el peso propio, principalmente, es una de esas fuerzas. La

inestabilidad de una ladera ocurre cuando una porción de masa térrea, limitada por la superficie del terreno y la superficie de rotura, se desliza hacia abajo respecto de la masa restante de la ladera (Figura 1). Esto sucede cuando los esfuerzos actuantes que provocan la falla superan la resistencia al esfuerzo cortante en dicha masa, también conocida como fuerza resistente; o bien cuando los esfuerzos resistentes disminuyen por efecto del humedecimiento o saturación del suelo (presión de poro), o ya sea por efecto del intemperismo o debido a la degradación natural o artificial de los suelos o rocas.

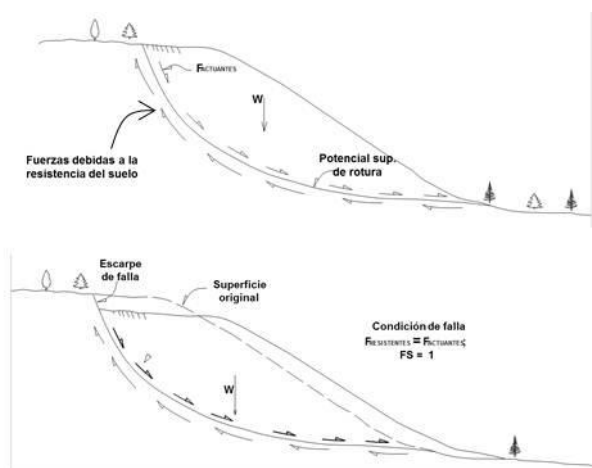


Figura 1. Esquema del proceso de inestabilidad en una ladera o talud. Se muestra la superficie de falla o de rotura en la que actúan las fuerzas actuantes y resistentes.

La relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes determinan lo que en ingeniería se conoce como factor de seguridad (FS), y éste representa el grado de estabilidad de una ladera o talud. Mientras más alto es el FS menos probabilidades existen para que la ladera o talud falle o se deslice. A menor FS, las posibilidades de que se presente la falla o rotura aumentan.

El FS de una ladera usualmente se expresa, desde el enfoque clásico de un análisis de estabilidad global (Terzaghi, 1943), como el cociente mínimo entre la resistencia media al esfuerzo cortante ($\bar{\tau}_r$) y el esfuerzo cortante medio ($\bar{\tau}$) que actúa en la potencial superficie de falla:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\text{Fuerzas resistentes}}{\text{Fuerzas actuantes}}$$

La resistencia media al esfuerzo cortante (τ_f) o fuerza resistente es la que proporciona estabilidad a los suelos o rocas y, por consiguiente, a las laderas y taludes; se debe, principalmente, a las características propias o intrínsecas de los suelos y rocas, y está relacionada con el origen y naturaleza de los mismos, así como con la forma en la que el agua y/o la humedad actúan para modificar dicha resistencia.

El esfuerzo cortante actuante (τ) o fuerza actuante que incide y tiende a producir la inestabilidad o falla de una ladera o talud se debe principalmente al peso del material que compone la ladera y a las sobrecargas que se colocan sobre ésta. Incluye el peso de las partículas sólidas que componen el suelo o roca y el peso del agua (o cualquier otro líquido) contenida en los huecos o poros de dichos materiales.

Si consideramos la existencia de una ladera, deberemos asumir que $\tau_f > \tau$ y, por lo tanto, el cociente FS es mayor que la unidad.

Ladera Estable
$(\tau_f > \tau)$ $FS > 1$

La condición de falla inminente en una ladera se presenta cuando se cumple $\tau_f = \tau$ y por tanto $FS = 1$. Por lo tanto, para que ello ocurra, a partir de una ladera estable donde el $FS > 1$, el esfuerzo cortante medio actuante o fuerza actuante debe aumentar y/o la resistencia media al esfuerzo cortante del suelo o fuerza resistente debe disminuir:

Falla
$\tau_f \downarrow$ y/o $\tau \uparrow$
$(\tau_f \leq \tau)$ $FS \leq 1$

En general, el aumento de las fuerzas actuantes y/o la reducción de las resistentes en un proceso de inestabilidad puede deberse tanto a factores ambientales o naturales como a las modificaciones realizadas por el ser humano.

Uno de los primeros investigadores en estudiar técnica y científicamente el fenómeno de inestabilidad de laderas y taludes fue el Dr. Karl Von Terzaghi, quien en su magistral artículo *Mecanismo de los Deslizamientos* (1950) describe de la manera más clara y sencilla los factores que influyen en la inestabilidad de una ladera o talud, y los denomina factores internos y factores externos.

Entre los factores internos, se pueden englobar los mecanismos que provocan una reducción de la resistencia cortante τ ; tales como el intemperismo y la erosión, los cuales generan disgregación y descomposición de materiales. Sin embargo, el mecanismo más simple y rápido para modificar la resistencia es la generación de la presión de poro (presión en el agua que ocupa los intersticios del suelo o las grietas de formaciones rocosas), la cual ocurre cuando el agua se acumula en el material que compone la ladera.

Entre los factores externos que inciden directamente en el valor del esfuerzo cortante τ se pueden considerar las posibles cargas externas aplicadas por la construcción de edificios y obras sobre el cuerpo o la corona de una ladera o talud; la modificación de la pendiente o de la altura de la ladera; la circulación de vehículos; la actividad sísmica; etc.

Mecanismos de falla por aumento de la presión del agua

Las fluctuaciones ocurren en los niveles de agua del terreno de las laderas, de acuerdo con las variaciones estacionales y los cambios climáticos a los que año con año están expuestas. En la temporada de sequía, el suelo se mantiene parcialmente saturado, e incluso genera tensión o presión negativa en el agua (succión), lo que define, temporalmente, una resistencia cortante relativamente alta del material (Mendoza y Domínguez, 2006). Al ocurrir precipitaciones intensas y prolongadas, esa succión se pierde; incluso se genera una presión positiva en el agua (también conocida como presión de poro).

En la figura 2a se esquematiza el aumento del tirante de agua dentro del suelo de la ladera (niveles 0, 1, 2 y 3), que es lo que sucedería internamente ante lluvias intensas. El aumento de presión

de poro (u) en la superficie potencial de falla va en detrimento de la resistencia del suelo atendiendo al principio de esfuerzos efectivos; en efecto, cuando la presión de poro aumenta por elevación del nivel freático del agua o NAF (Figura 2a), el nivel de esfuerzos efectivos (σ') disminuye, y, consecuentemente, también se reduce la resistencia efectiva del suelo, dada su naturaleza friccionante. En la figura 2b, aparece la trayectoria de esfuerzos efectivos al aumentar la presión de poro, hasta tocar la envolvente de resistencia.

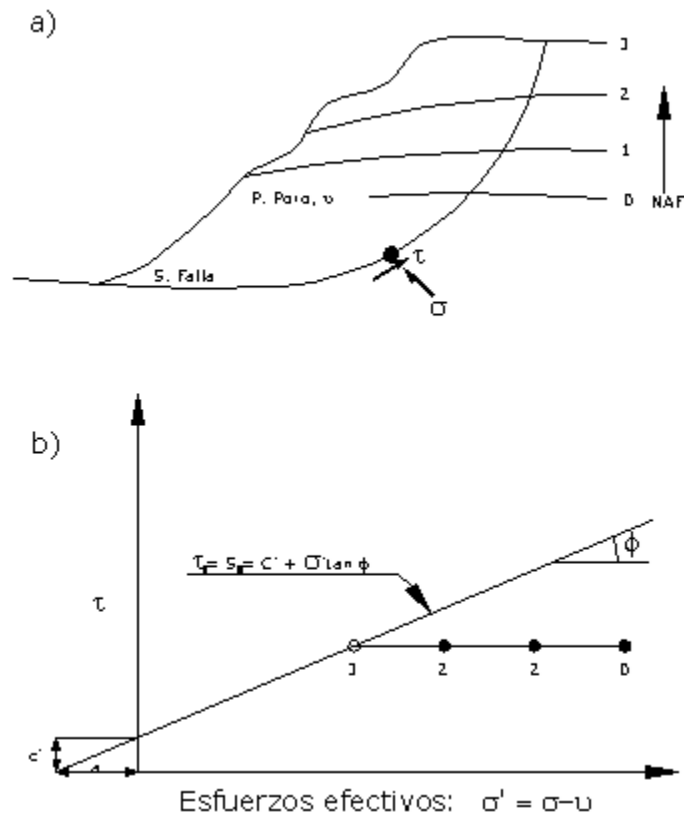


Figura 2. Efectos de la presión del agua sobre la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, atendiendo al nivel que alcanza el agua dentro de la ladera. a) aumento de la presión de poro por la elevación del nivel freático del agua (NAF) y disminución del nivel de esfuerzos efectivos (σ'), b) trayectoria de esfuerzos efectivos al aumentar la presión de poro, hasta tocar la envolvente de resistencia.

Lo que se acaba de exponer es el único mecanismo que ocurre en zonas no pobladas. Sin embargo, en centros urbanos o rurales, desarrollados en los alrededores de una ladera, a las lluvias debe agregarse la muy frecuente ocurrencia de fugas de agua en los servicios de alcantarillado y suministro de agua potable. Los volúmenes de agua generan, a fin de cuentas, presiones de poro en los intersticios de los suelos de la ladera, equivalentes a las que induce el agua de lluvia; y, por lo tanto, disminuyen la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos de forma similar a como ocurre en las zonas no pobladas.

Sobre los métodos de estabilización

Desde el punto de vista fenomenológico, los métodos de estabilización de laderas están encaminados a prevenir las causas que originan la inestabilidad y a mitigar los daños por la ocurrencia de deslizamientos. La aplicación de cada método de estabilización depende principalmente de la tipología, magnitud y velocidad de los movimientos. En caso de laderas potencialmente inestables, la estabilización puede realizarse antes de la ejecución de cortes o terraplenes, o cuando éstos ya iniciaron, siempre que la velocidad de los mismos lo permita. Los deslizamientos u otros procesos de inestabilidad de dimensiones considerables son muy difíciles o prácticamente imposibles de detener; por lo que en estos casos sólo existe como alternativa alertar a la población o, si es necesario, buscar la reubicación de la misma.

En conclusión, los métodos de estabilización deben tener como objetivo principal aumentar el FS de una ladera o talud, lo cual únicamente se puede lograr de dos maneras:

1. Aumentando las fuerzas resistentes. Las fuerzas resistentes son las que se oponen a que una ladera o talud falle o se deslice. Para aumentarlas se pueden utilizar métodos estructurales como muros, anclas y pilotes o colocar sobrepesos en la base de la ladera o talud; aunque su principal desventaja es el elevado costo y, en algunos casos, su mantenimiento. Otra forma muy conveniente es aumentar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos mediante la instalación de drenes superficiales y drenes internos con la finalidad de impedir que ingrese agua al interior

de las laderas o taludes, o bien abatir los niveles freáticos para reducir la presión de poro.

2. Disminuyendo las fuerzas actuantes. Las fuerzas actuantes son las que tienden a desestabilizar las laderas o taludes. Son propiciadas, principalmente, por el peso de los materiales que componen las laderas; así como por la aplicación de cargas sobre las mismas. Estas sobrecargas pueden llegar a ocurrir debido a la colocación de lastre, la construcción de viviendas, la instalación de tanques y el paso de vehículos, o por la construcción de cualquier obra de ingeniería. Por lo tanto, la eliminación de dichas cargas o la ejecución de cortes y excavaciones (bermas y terrazas) en la parte alta de las laderas y taludes pueden ser factibles de implementar para la reducción de dichas fuerzas.

Incremento de la resistencia del suelo mediante métodos estructurales

Los métodos estructurales contribuyen a la estabilidad de las laderas y taludes a través del incremento de los esfuerzos resistentes en la potencial superficie de falla. Generan fuerzas y esfuerzos que se oponen al desplazamiento de los materiales que componen las laderas y taludes. Dichas fuerzas son producidas por el aumento de la resistencia al esfuerzo cortante en los planos de deslizamiento que resultan del incremento de los esfuerzos normales en dichos planos; o bien por empujes que se oponen al desplazamiento de suelos y rocas.

Incremento de la resistencia del suelo a través de la reducción de presión de poro

El agua es el principal agente que desencadena los problemas de inestabilidad en las laderas, ya que aumenta el peso de la masa inestable, eleva el NFA y, consecuentemente, incrementa la presión poro. También genera empujes hidrodinámicos, reblandece el terreno y genera erosión en algunas zonas de la ladera, por ejemplo el pie.

En general, la construcción de sistemas de drenaje, ya sean superficiales o internos, tienen por finalidad eliminar o disminuir el agua presente en la ladera o talud y, por lo tanto, reducir las presiones intersticiales o de poro que actúan como factor desestabilizador en las

superficies de falla y grietas, debido a que el agua reduce las propiedades resistentes de los materiales.

El drenaje puede ser superficial mediante el empleo de canalizaciones revestidas; o profundo mediante la instalación de drenes horizontales o californianos, pozos o drenes verticales, galerías de drenaje y pantallas drenantes.

Reducción de las cargas que causan la falla

La reducción de las fuerzas actuantes en una ladera se logra, principalmente, por la remoción de material en el cuerpo y en la corona de la ladera, o al evitar la saturación de la misma. La reducción de peso se logra efectuando cortes y excavaciones en puntos clave de la ladera o talud.

Las lluvias no son la única fuente de agua que satura los suelos; las fugas en los sistemas de drenaje y de agua potable también contribuyen a este proceso.

Métodos de protección

Aun cuando la mayoría de los métodos de estabilización de laderas están encaminados a reforzar la masa de suelo o reducir el incremento de presión de poro en su interior, existen otras técnicas que son de protección. Éstas si bien no incrementan el FS, sí proporcionan resguardo y, en algunos casos, seguridad a los pobladores. Dichas medidas son generalmente de carácter superficial, y están encaminadas a reducir la energía y el desplazamiento de las masas de suelo o roca que se desprenden de las laderas o taludes. Dentro de esta clasificación, también se ubican los métodos de protección que evitan la saturación y la erosión superficial de los suelos y rocas.

Algunos de los métodos de protección consisten en la instalación de mallas metálicas, gaviones, terraplenes, geotextiles, obras de impermeabilización, colocación de concreto lanzado y siembra de plantas, árboles o arbustos que contribuyen a reforzar el suelo superficial.

Acciones de capacitación y concientización

Una de las medidas más económicas y quizá más efectiva en la prevención de desastres para cualquier fenómeno es la capacitación de

población. Una sociedad más preparada es menos susceptible de ser afectada o dañada por los fenómenos naturales, cualesquiera que éstos sean.

Investigadores de las ciencias sociales y de la antropología social que se han dedicado a estudiar y entender el comportamiento de la población antes, durante y después de la ocurrencia de fenómenos naturales y desastres indican que muchos de los desastres ocurridos se deben al escaso o nulo conocimiento de la población acerca de los efectos que sus acciones pueden inducir en el entorno natural en donde habitan; por lo que proponen a los gobiernos y a la sociedad en general trabajar en el concepto de la percepción social del riesgo.

Conclusiones

Las cordilleras, montañas, ríos y cañadas son lugares cada vez más habitados, ya sea por necesidad o por el atractivo natural que poseen. Además de los factores naturales, las actividades humanas como la deforestación, los cambios de escurrimientos, las modificaciones topográficas, la colocación de sobrecargas, etc. producen inestabilidad en laderas. Muchas de estas actividades se realizan por usos y costumbres y también por falta de conocimiento.

El conocimiento preciso y detallado de los factores y causas que modifican o desencadenan la inestabilidad de las laderas y taludes permite formular juicios más acertados y correctos referentes a las técnicas o métodos que deben utilizarse para estabilizar una ladera o talud, o bien, para definir las medidas de prevención y/o de protección más adecuadas para la población.

Las zonas rurales más vulnerables son las que presentan los mayores índices de marginación y analfabetismo. Para salvaguardar la vida de la población, se piensa, generalmente, en grandes inversiones y grandes obras, sin embargo, un área de oportunidad es la capacitación y entrenamiento de la población que habita en o cerca de las laderas y taludes; ya que está comprobado que los riesgos son socialmente contruidos y, en muchas ocasiones, los fenómenos naturales se convierten en desastres por la falta de conocimiento y preparación de la población para enfrentarlos.

Una sociedad más preparada es menos susceptible a ser afectada. Para avanzar hacia esta premisa, particularmente, en el ámbito de los deslizamientos de laderas, se requiere propiciar un mayor acercamiento entre las instituciones de gobierno, las

instituciones de educación superior y la población en general, así como la formación de capacidades locales en las instituciones de Protección Civil de los municipios y de los estados (Domínguez, 2014).

Un ejemplo muy exitoso de las actividades relacionadas con la percepción social del riesgo en zonas rurales es el trabajo que realiza la Universidad Nacional Autónoma de México con el programa de servicio social denominado “La UNAM en tu comunidad”. Se trata de un programa especial en el que alumnos de diferentes carreras asisten a las comunidades para desarrollar actividades de capacitación y difusión sobre diversas temáticas, entre ellas, las que abordan la protección civil y la prevención de desastres.

Referencias

- Domínguez, M. (2014). Caracterización y zonificación geotécnica en zonas rurales: Prevenir más que remediar [Conferencia]. En Sesión Caracterización y Zonificación Geotécnica II de la XXVII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica. Puerto Vallarta, Jalisco.
- González, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Madrid: Pearson Educación, Prentice Hall.
- Mendoza, M. J. y Domínguez, L. (2006). Estimación del peligro y el riesgo de deslizamientos en laderas. Fenómenos Geológicos. (Cap. V). Serie Guía básica para la elaboración de mapas de peligros y riesgos. México: CENAPRED-SEGOB.
- Terzaghi, K. (1943). Theoretical soil mechanics. London: J. Wiley and Sons, Inc.
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of Landslides. En *Memories of Geology to Engineering Practice*. pp. 83-123. New York: Geological Society of America.

CAPÍTULO 3

Maximizing restoration success on landslides with ecological tools

Lawrence Walker
School of Life Sciences, University of Nevada Las Vegas, USA

Introduction

Advances in our understanding of the ecological aspects of both restoration and succession suggest that the two fields are closely related and mutually reinforcing (Walker *et al.*, 2007). With increased rainfall projected from global warming, increased landslide frequency and severity is a distinct possibility (Dai *et al.*, 2002), particularly in tropical montane regions. Therefore, improving our understanding of successional changes of plant communities colonizing landslides will help restore ecosystems damaged by landslides. In addition, the use of ecological tools can help to predict landslide occurrence and mitigate the damage that they cause. In this paper, I explore how ecological insights about landslide dynamics and restoration ecology provide new tools for the management of unstable slopes.

Prediction

Landslides are mostly triggered by rainfall and earthquakes or other tectonic activities, but also by human activities such as deforestation or construction. Models of landslide hazards incorporate data on both local and regional aspects of topography, drainage, bedrock and regolith properties, soil infiltration rates, soil pore pressure, and vegetation parameters

(Walker and Shiels, 2013). Spatial and temporal patterns of previous landslides are also helpful predictors of the location, frequency, and severity of future landslides. Vegetation can promote both stability and instability on slopes. Vegetation parameters that indicate slope stability include high plant biomass on slopes > 45 degrees, hydrophytic plants communities and high water content in plant tissues, or any recent change in plant biomass (Crozier, 1984). On a landscape level, analyses of growth rings of woody stems or vegetation mapping can increase predictability of the location of future landslides. For example, the presence of shrubs might indicate frequent landslide activity, while trees suggest a longer period of slope stability. At a local level, indications of slope stability or instability (and likelihood of re-sliding) can be predicted by plant size, shape, and density. Slope stability is promoted by plants that grow close to the surface, thereby reducing rainfall splash erosion (Morgan, 2007). Deep roots (especially those that cross the shear line) can anchor the soil and funnel water away from the surface. In contrast, large plants can become unstable and topple, bringing soil with them as they fall. Similarly, roots can also funnel water to impermeable soil layers, thereby promoting slippage. Much more needs to be explored about these landscape and local influences of plants on slope stability, but general patterns are emerging (Sidle and Ochiai, 2006; Ghestem *et al.*, 2011). There is clearly a role for biological and ecological parameters in refining predictive models of landslides (Walker and Shiels, 2013).

Mitigation

Prevention of landslides can be up to 2000 times less expensive than repairing damage following a landslide (Keller, 1996). For example, ecologically-informed considerations about slope stability and building design can reduce the occurrence of landslides from the construction of roads or other infrastructures. However, mitigating damage from landslides (and re-sliding) is greatly improved when ecological lessons are incorporated. Technical aspects of mitigation of unstable slopes are numerous (e.g., walls, anchoring bolts, terraforming), relatively well understood, and rapidly constructed. However, to be successful,

these approaches must reduce pore pressure in the soils, which is the major cause of sliding. Establishment of deep-rooted plants is one effective way to reduce pore pressure. Thinning, but not over-harvesting landslide vegetation is also effective. A combination of technical and biological approaches is most adaptable to local conditions and most likely to stabilize a slope. Technical solutions can result in a false sense of security but are vulnerable to getting clogged, breaking down, or being overrun by new erosive events. Biological approaches are less costly and sometimes more resilient to repeated disturbances. Ultimately, any landslide is subject to possible re-sliding whether technical or biological means are used to stabilize it.

Restoration

Restoration, in the broadest sense, is the effort to recreate at least some aspects of the structure and function of the pre-landslide ecosystem. The first step in landslide restoration is to stabilize the slope. Other progressively more difficult challenges include re-establishing plant cover, hydrological conditions, soil fertility, species diversity, nutrient cycling, and successional processes. Restoration strategies will vary depending on the fertility and stability of the initial substrates.

Once ongoing erosion has been largely reduced on a landslide, efforts can begin to improve soil conditions. Structures that introduce and retain carbon and nutrients are essential for ecosystem development. Such structures can include organic matter such as leaf litter or walls made of stems that eventually sprout. Soil organisms such as mycorrhizae, nitrogen-fixing bacteria, decomposers, and burrowing animals (e.g., earthworms, ants, rodents) are also critical. These may be introduced or colonize from the local environment. Another step is to promote the dispersal of plant propagules, such as through the introduction of perches for birds that bring seeds. In most cases, however, plants are directly added as spores, seeds, seedlings, saplings, or cuttings, hopefully bypassing any dispersal limitations. Microsites favorable to germination and establishment of plant colonists must be present or be constructed for the plants to survive and reproduce. Popular species for restoration activities

include grasses (e.g., *Vetiveria*, bamboo) that grow rapidly and have extensive root systems, cuttings of fast-growing trees (e.g., *Populus*, *Salix*), or shrubs that form dense canopies and fix nitrogen (e.g., *Alnus*) (Stokes *et al.*, 2014).

At the landscape scale, issues such as enhancement of pollination, species diversity, and succession can be addressed by restoration activities. Pollination and other plant-animal interactions (e.g., dispersal, soil-mixing, herbivory, food web establishment) are crucial to the re-creation of an intact ecosystem. Little is known, unfortunately, about how to restore such plant-animal interactions (Walker and Shiels, 2013). Enhancing species diversity can improve such interactions and also may increase ecosystem resilience to additional disturbances (Suding and Hobbs, 2009), in part through providing functional redundancy. In addition, restoration is most successful when successional dynamics are addressed. How do these initial introductions interact with each other and how do they form plant communities that change over time? Do the initial colonists (or plantings) arrest successional change and is this desirable (until soils stabilize and organic matter builds up) or undesirable (delay of the establishment of a later successional stage that provides more ecosystem services)? The ability to successfully manipulate plantings and soil conditions to initiate a successional pathway of community change to a desirable successional stage greatly enhances the likelihood of a successful, low-maintenance restoration project (Walker *et al.*, 2009).

Conclusion

Numerous recent developments in the field of landslide ecology make it clear that the prediction, mitigation, and especially restoration of landslides are improved by the application of ecological tools. Exclusive use of technical aspects of restoration is useful but prone to problems (cost, durability, secondary effects). Ecological tools that increase restoration success on landslides include a) models and techniques that incorporate vegetation influences on soil pore pressure, b) approaches that address landscape-level fluxes in carbon, nutrients, and species diversity, and c) studies of plant succession that incorporate the

availability and dispersability of potential colonists and species interactions that influence community dynamics and rates of community turnover.

References

- Crozier, M. J. I. (1984). Field assessment of slope instability. In D. Brunsten & D. B. Prior (Eds.). *Slope Instability*. pp. 103-142. Chichester, UK: Wiley.
- Dai, F.C., Lee, C.F. & Hgai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64, 65-87.
- Ghestem, M., Sidle, R.C. & Stokes, A. (2011). The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability. *BioScience*, 61, 869-879.
- Keller, E.A. (1996). *Environmental Geology* (7th ed.). Upper Saddle River, New Jersey, US: Prentice Hall.
- Morgan, R.P.C. (2007). Vegetative-based technologies for erosion control. In A. Stokes, I. Spanos & J.E. Norris (Eds.). *Eco- and ground bio-engineering: the use of vegetation to improve slope stability*. pp. 265-272. Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Sidle, R.C. & Ochiai, H. (2006). *Landslides: processes, prediction, and land use*. Water Resources Monograph, 18. Washington, D.C., US: American Geophysical Union.
- Stokes, A., Douglas, G., Fourcaud, T., Giadrossich, F., Gillies, C., Hubble, T., Walker, L.R. (2014). Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil*, 377, 1-23.
- Suding, K.N. & Hobbs, R.J. (2009). Threshold models in restoration and conservation: a developing framework. *Trends in Ecology and Evolution* 24, 271-279.
- Walker, L.R. & Shiels, A.B. (2013). *Landslide Ecology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Walker, L.R., Walker, J. & Hobbs, R.J. (2007). *Linking Restoration and Ecological Succession*. New York: Springer.
- Walker, L.R., Velázquez, E. & Shiels, A.B. (2009). Applying lessons from ecological succession to the restoration of landslides. *Plant and Soil*, 324, 157-168.

CAPÍTULO 4

Protecting slopes from shallow landslides – the role of vegetation

Alexia Stokes¹, Claire Atger², A. Glyn Bengough³, Thierry Fourcaud⁴, Roy C. Sidle⁵

¹Institut National de la Recherche Agronomique, Montpellier, France

²Pousse Conseil, Lattes, France

³Scottish Crop Research Institute, Dundee, UK

⁴Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, France

⁵Department of Geology, Appalachian State University, Boone, USA

Abstract

Slope stability models traditionally use simple indicators of root system structure and strength when vegetation is included as factor. However, additional root system traits should be considered when managing vegetated slopes to avoid shallow substrate mass movement. Traits including root distribution, length, orientation and diameter are recognized as influencing soil fixation, but do not consider the spatial dimension of roots within a system. Thick roots act like soil nails on slopes and the spatial position of these thick roots determines the arrangement of the associated thin roots. Thin roots act in tension during failure on slopes and if they traverse the potential shear zone, provide a major contribution in protecting against landslides. How a landslide engineer can use this information when modelling slope stability and considering management strategies is discussed.

Excerpt translated from the original:

Stokes A., Atger C., Bengough A.G., Fourcaud T., Sidle R.C. 2009. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil*. 324: 1–30.

Keywords: cohesion, model, roots, slope stability, traits

What types of mass wasting processes can be stabilized by plant roots?

Woody vegetation, particularly trees, can help prevent shallow landslides in two ways: (1) modifying the soil moisture regime via evapotranspiration; and (2) providing root reinforcement within the soil mantle (Figure 1). The first factor is generally not very important for shallow landslides and debris flows that occur during an extended rainy season, except possibly in the tropics and sub-tropics where evapotranspiration is high throughout the year; deeper-seated landslides, such as earthflows, may experience slightly prolonged activity due higher moisture contents after vegetation is removed (Sidle and Ochiai, 2006). In most temperate regions, soils are nearly saturated and evapotranspiration is low during autumn and winter rainstorms when shallow slope failures typically occur, thus, soil water content is only minimally affected by the small water losses attributed to evapotranspiration (Sidle *et al.*, 1985). In Canada, reduced evapotranspiration following logging may increase pore water pressures during moderate-sized winter storms, but for the large storms in which landslides generally occur, differences in pore water pressure due to logging were difficult to detect (Dhakal and Sidle, 2004a). However, evapotranspiration facilitated by trees could extend the “window of susceptibility” for shallow landslides and debris flows if a large storm occurred near the beginning or end of the rainy season (Sidle *et al.*, 1985). Also, when large and high intensity storms occur during drier conditions, evapotranspiration may reduce the potential of shallow landslides (Sidle and Ochiai, 2006).

A much more significant contribution of woody vegetation to the stability of shallow soils on steep slopes is the additional soil strength or cohesion attributed to root systems. In shallow soils, tree roots may penetrate the entire soil mantle and anchor the soil into

more stable substrate (e.g., Wu *et al.*, 1979) (Figure 1a). Dense lateral root systems in the upper soil horizons form a membrane that stabilizes the soil (e.g., Schmidt *et al.*, 2001) (Figure 1a), and larger tree roots can provide reinforcement across planes of weakness along the flanks of potential slope failures (Sidle *et al.*, 1985). Past research suggests that while woody roots significantly reduce shallow (<1 to 2 m deep) landslide potential on steep slopes, deeper soil mantles (> 5 m) benefit little from such reinforcement, as root density decreases dramatically with depth and few large roots are able to anchor across the basal failure plane. The only benefit of root strength to the stabilization of deep-seated landslides, e.g., earthflows and slumps, is when very large lateral woody roots cross planes of weakness along the flanks of potential failures (Sidle and Ochiai, 2006). However, such reinforcement would only benefit small deep-seated landslides whereas lateral roots also offer protection against most shallow landslides (Swanston and Swanson, 1976) (Figure 1a). Basal woody vegetation cover, organic matter, and dense, shallow root mats prevent surface mass wasting, e.g. dry ravel on steep slopes (Mersereau and Dyrness, 1972).

Modelling the mechanical reinforcement of soil by roots

The effect of roots on soil fixation has been reported by several authors, but quantifying the gain in soil shear strength is difficult to achieve (Stokes *et al.*, 2014). Pioneering modelling work by Wu, (1976) and Waldron, (1977) have introduced the root mechanical contribution as additive soil cohesion in the Coulomb's failure criteria using a simple mechanistic model. The additional cohesion at the slip surface was defined by two variables: the average root tensile strength and root area ratio (RAR, or the fraction of a plane of soil occupied by roots). It was assumed that roots are initially perpendicular to the slip surface and bend according to the relative displacement of soil on both sides of the shear zone. The tangential component of root tensile force thus directly contributes to the increase in soil shear strength, whilst the normal component augments the confining pressure. These models of soil reinforcement have been shown to overestimate the additional cohesion due to roots in tension (e.g. Danjon *et al.*, 2008; Mao *et al.*, 2012). A significant improvement of this approach has been proposed by Pollen and Simon, (2005; 2009)

who applied a Fibre Bundle Model to rooted soils. This model considers that the root network breaks progressively from the weakest to the strongest roots, and that stresses of broken roots are redistributed to the remaining elements. More recent papers also pointed out the limitation of assuming that roots are initially oriented perpendicular to the slip surface, and propose using root architectural models as an improvement in slope stability analyses (Reubens *et al.*, 2007; Danjon *et al.*, 2008).

In most models, roots are considered as flexible elements, thus limiting their application to the finest roots. However, from a mechanical point of view, a distinction must be made between fine roots, which behave like cable elements without bending stiffness, and structural roots that are similar to beams, developing longitudinal shear stresses (Reubens *et al.*, 2007). The orientation of structural roots near the slip surface cannot be estimated using a simple geometrical rule, as performed by Wu *et al.*, (1979), due to flexural rigidity that limits their deformations. Woody roots play an important role in tree anchorage and their mechanical interactions with the soil medium have been previously investigated using finite element models (FEM) which take into account root architecture where structural roots can be considered as individual elements like piles (Dupuy *et al.*, 2005a,b). Few numerical analyses have been carried out at a local scale to quantify the effect of such root element inclusion on soil shear strength (Wu, 2007). Nor has stiffness of structural roots been introduced in slope stability models so far, except for the notable exceptions of models developed by Nakamura *et al.*, (2004) and Tosi, (2007).

Integration of root reinforcement models in slope stability models

Root reinforcement models are used to determine the contribution of vegetation to the factor of safety (FOS) of a particular slope. The FOS is defined as the ratio of the actual soil strength to the minimum shear strength required for equilibrium. To calculate the FOS of a vegetated slope, 2D or 3D numerical techniques exist which couple soil mechanics, soil hydrology and plant growth (Stokes *et al.*, 2014), e.g. the limit equilibrium model (Greenwood, 2006) finite difference (Wilkinson *et al.*, 2002; van Beek *et al.*, 2005) and finite element (Mao

et al., 2014) models. Vegetation must be taken into account as reinforcement elements and elements that modify the hydrological regime of the slope (Simon and Collison, 2002; Wilkinson *et al.*, 2002; Dhakal and Sidle, 2004b).

What are the root traits useful for reinforcing soil on slopes?

A trait is defined as a distinct, quantitative property of organisms, usually measured at the individual level and used comparatively across species. A functional trait is one that strongly influences organismal performance (McGill *et al.*, 2006). Depending on the goal of a landslide engineer or restoration ecologist, the immediate and long-term effects of plant traits in an environment must be considered if a site is to remain viable and ecologically successful. Although the plant root traits most commonly used by engineers when modelling slope stability are tensile strength and RAR, several other important traits should also be considered (Stokes *et al.*, 2009), the most important trait being rooting depth. To stabilize a slope against a shallow landslide, roots must cross the shear surface (Figure 1) which can be up to 2 m deep in the middle of the slope (Cammeraat *et al.*, 2005; van Beek *et al.*, 2005; Norris *et al.*, 2008). Rooting depth is species dependent when soil conditions are not limiting and root development changes significantly with depth, although in general, > 80% of biomass is in the top 0.4 – 0.5 m of soil. The number and orientation of roots that the shear surface intersects will change significantly with rooting depth for the same plant, even for magnitudes of only several cm (Figure 1b, c). Roots vertically aligned to the potential slip surface will be mobilised throughout their length whereas those with a larger angle will be more likely to slip before failure in tension occurs. A greater number of roots and diversity of branching angles will increase the thickness of the shear zone (Abe and Ziemer, 1991; Mickovski *et al.*, 2007). Although the true angle of roots in the shear zone is often ignored, and assumed to be between 40 – 70°, Greenway, (1987) and Danjon *et al.*, (2008) showed that such assumptions lead to an overestimation of the shear resistance contributed by roots. Even for the same root, the angle at which it grows with regard to the vertical can change several times along its length. Due to the physiology of roots, a root branch can be initiated at any point along a parent root, but not necessarily emerge fully from

the parent root. Emergence is largely controlled by auxin fluxes and the bending of a root around an obstacle or as it grows through the soil can trigger the initiation and emergence of a lateral root (Figure 1b).

Thick roots act like soil nails on slopes, reinforcing soil in the same way that concrete is reinforced with steel rods. The spatial position of these thick roots also has an indirect effect on soil fixation in that the location of thin and fine roots will depend on the arrangement of thick roots. Thin and fine roots act in tension during failure on slopes and if they cross the slip surface, provide a major contribution to slope stability (Figure 1, Waldron and Dakessian, 1982). Root thickness is thus an important trait to consider, and is also an indicator of root longevity (thicker roots live longer), bending stiffness and the ability to penetrate soil (Clark *et al.*, 2008) as well as to store and transport water (Roumet *et al.*, 2006). For the landslide engineer, one of the first considerations with regard to root thickness will be how tensile strength changes with diameter. Although thicker roots require more force to be pulled out of the soil, when root strength is calculated (force/root cross-sectional area), thinner roots are significantly stronger than thick roots, due to changes in cellulose content (cellulose is highly resistant in tension) (Genet *et al.*, 2005). Tensile strength values can vary from 20 – 730 MPa for roots in a diameter range of 0.15 – 4.5 mm (Bischetti *et al.*, 2005), this surprisingly high latter value for *Fagus sylvatica* L. being stronger than that for steel (400 – 700 MPa). A list of tensile strength values for 83 species is available in Mao *et al.*, (2012), but Genet *et al.*, (2010) and Mao *et al.*, (2012) suggested that differences in tensile strength among species within a plant functional group have little influence on the calculation of a slope's FOS and that root diameter and distribution within the soil will affect slope stability much more.

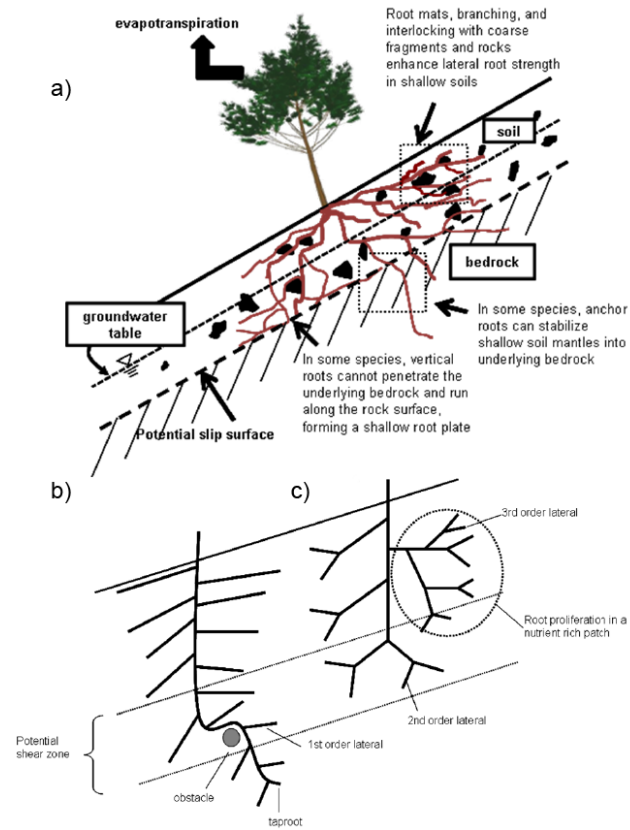


Figure 1. a) conceptual illustration of a potential slip plane at the soil – bedrock interface of a hillslope, dynamic shallow groundwater table (landslide triggering mechanism), and stabilizing components of root systems (lateral reinforcement within the upper soil and anchoring of shallow soil mantle to bedrock). b) a herringbone root system with one main axis on which are borne first order lateral roots. c) a dichotomous root system with two external root tips borne on every lateral. Depending on the branching pattern, the same volume of soil is not exploited equally. Dashed lines indicate the potential shear zone, the thickness of which can be influenced by the number of roots crossing through it, root length and branching angle. The zoom illustrates how root proliferation in e.g. a nutrient rich patch can influence root system architecture near a slip surface. Initiation and emergence of a lateral root on the upper side of the mother root can occur if the latter encounters an obstacle. Reproduced with permission from Plant and Soil (Stokes *et al.*, 2009).

To conclude, it is particularly important that we develop better ways of measuring root distribution with depth. If root traits could be predicted from aboveground measurements or characteristics, it would be possible to map the contribution of vegetation to slope stability and thus highlight zones of potential failure (Roering *et al.*, 2003). This type of mapping could also consider species diversity and the effect of different species mixtures on slope stability. How root systems grow when planted individually or in competition with other species differs, and soil exploration and exploitation can be highly influenced by a diversity of root forms. More work needs carrying out therefore on plant diversity with regard to slope stability, as well as how to plant and manage along a slope, taking into account local variations in topography and ecology. To this end, the development of expert systems and species databases would be very useful, especially open source systems where data can be added freely by end-users and researchers (Norris *et al.*, 2008).

References

- Abe, K. y Ziemer, R. R. (1991). Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress. *Can. J. For. Res.*, 21, 1012-1019.
- Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P. y Zocco, A. (2005). Root strength and root area of forest species in Lombardy. *Plant and Soil*, 278, 11-22.
- Cammeraat, L. H., Van Beek, L. P. H. y Kooijman, A. M. (2005). Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain. *Plant and Soil*, 278, 135-147.
- Clark, L. J., Price, A. H., Steele, K. A. y Whalley, W. R. (2008). Evidence from near-isogenic lines that root penetration increases with root diameter and bending stiffness in rice. *Funct. Plant Biol.*, 35, 1163-1171.
- Danjon, F., Barker, D. H., Drexhage, M. y Stokes, A. (2008). Using 3D plant root architecture in models of shallow-slope stability. *Ann. Bot.*, 101, 1281-1293.
- Dhakal, A. S. y Sidle, R.C. (2004). Pore water pressure assessment in a forest watershed: Simulations and distributed field measurements related to forest practices. *Water Resour. Res.*, 40, W02405, doi:1029/2003 WR002017
- Dhakal, A. S. y Sidle, R. C. (2004b). Distributed simulations of landslides for different rainfall conditions. *Hydrol. Proc.*, 18, 757-776.
- Dupuy, L., Fourcaud, T. y Stokes, A. (2005). A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Plant and Soil*, 278, 119-134.
- Dupuy, L., Fourcaud, T. y Stokes, A. (2005b). A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *Eur. J. Soil Sci.*, 56, 319-327.

- Genet, M., Stokes, A., Fourcaud, T. y Norris, J.E. (2010). The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest. *Ecol. Eng.*, 36, 265-275.
- Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S. B., Fourcaud, T., Dumail, J. y Van Beek, L. P. H. (2005). The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant and Soil*, 278, 1-9.
- Greenway, D. R. (1987). Vegetation and slope stability. In M. G. Anderson y K. S. Richards (eds.). *Slope Stability*. pp. 187-230. Chichester: Wiley.
- Greenwood, J. R. (2006). Slip4ex-A program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes. *Geotech. Geol. Eng.*, 24, 449-465.
- Mao, Z., Saint-André, L., Genet, M., Mine, F.X., Jourdan, C., Rey, H., Courbaud, B. y Stokes, A. (2012). Engineering ecological protection against landslides in mountain forests: choosing cohesion models. *Ecological Engineering*, 45, 55-69.
- Mao, Z., Bourrier, F., Stokes, A. y Fourcaud, T. (2014). Three dimensional modelling of slope stability in heterogeneous montane forest ecosystems. *Ecological Modelling*, 273, 11-22.
- Mersereau, R. C. y Dyrness, C. T. (1972). Accelerated mass wasting after logging and slash burning in western Oregon. *J. Soil Water Conserv.*, 27, 112-114.
- Mickovski, S. B., Bengough, A. G., Bransby, M. F., Davies, M. C. R., Hallett, P. D. y Sonnenberg, R. (2007). Material stiffness, branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems. *Eur. J. Soil Sci.*, 58, 1471-1481.
- Nakamura, H., Nghiem, Q. M. y Iwasa, N. (2007). Reinforcement of tree roots in slope stability: A case study from the Ozawa slope in Iwate Prefecture, Japan. In A. Stokes, I. Spanos, J. E. Norris y L. H. Cammeraat (Eds.). *Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*. Developments in Plant and Soil Sciences. pp. 81-90. Dordrecht: Springer.
- Norris, J. E., Stokes, A., Mickovski, S. B., Cammeraat, E., Van Beek, L. P. H., Nicoll, B. y Achim, A. (eds.) (2008). *Slope Stability and Erosion control: Ecotechnological Solutions*. Dordrecht: Springer.
- Pollen, N. y Simon, A. (2005). Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Res.*, 41, W07025. doi: 10.1029/2004WR003801
- Pollen-Bankhead, N. y Simon, A. (2009). Enhanced application of root-reinforcement algorithms for bank-stability modeling. *Earth Surf. Proc. Land*. In press. doi: 10.1002/esp.1690
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G. y Muys, B. (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees: Struct. Func.*, 21, 385-402.
- Roering, J. J., Schmidt, K. M., Stock, J. D., Dietrich, W. E. y Montgomery, D. R. (2003). Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range. *Can. Geotech. J.*, 40, 237-253.

- Roumet, C., Urcelay, C. y Díaz, S. (2006). Suites of root traits differ between annual and perennial species growing in the field. *New Phytol*, 170, 357-368.
- Schmidt, K. M., Roering, J. J., Stock, J. D., Dietrich, W. E., Montgomery, D. R. y Schaub, T. (2001). Root cohesion variability and shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Can. Geotech. J.*, 38, 995-1024.
- Sidle, R. C., Pearce, A. J. y O'Loughlin, C. L. (1985). Hillslope stability and land use [Monograph]. Am. Geophysical Union, Water Resources No. 11, Washington, D.C., 140 p.
- Sidle, R. C. y Ochiai, H. (2006). Landslides: Processes, Prediction, and Land Use [Monograph]. Am. Geophysical Union, Water Resources, No. 18, AGU, Washington, D.C., 312 p.
- Simon, A. y Collison, J. C. (2002). Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surf. Proc.Land.*, 27, 527-546.
- Stokes, A., Atger, C., Bengough, A.G., Fourcaud, T. y Sidle, R.C. (2009). Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil*, 324, 1-30.
- Stokes, A., Douglas, G., Fourcaud, T., Giadrossich, F., Gillies, C., Hubble, T., Walker, L.R. (2014). Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil*, 377, 1-23.
- Swanston, D. N. y Swanson, F. J. (1976). Timber harvesting, mass erosion, and steepland forest geomorphology in the Pacific Northwest. In D.R. Coates, (ed.) *Geomorphology and Engineering*. pp. 199-221. Stroudsburg, USA: Dowden, Hutchinson and Ross, Inc.
- Tosi, M. (2007). Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 87, 268-283.
- Van Beek, L. P. H., Wint, J., Cammeraat, L. H. y Edwards, J. P. (2005). Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes. *Plant and Soil*, 278, 55-74.
- Waldron, L. J. (1977). Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 843-849.
- Waldron, L. J. y Dakessian, S. (1982). Effect of grass, legume and tree roots on soil shearing resistance. *J. Soil Sci. Soc. Am.*, 46, 894-899.
- Wilkinson, P. L., Anderson, M. G., Lloyd, D. M. y Renaud, J. P. (2002). Landslide hazard and bioengineering: towards providing improved decision support through integrated numerical model development. *Env. Model. Soft.*, 17, 333-344.
- Wu, T. H. (2007). Root reinforcement: analyses and experiments. In J. E. Norris, A. Stokes, S. B. Mickovski, E. Cammeraat, L. P. H. Van Beek, B. Nicoll y A. Achim, (eds). *Slope stability and erosion control: ecotechnological solutions*. pp. 21-30. Dordrecht: Springer.
- Wu, T.H., McKinnell, W.P. y Swanston, D.N. (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince-of-Wales-Island Alaska. *Can. Geotech. J.*, 16, 19-33.

CAPÍTULO 5

Inventario nacional de fenómenos geológicos: capa de movimientos en masa

Mónica Martínez Medina¹ y Francisco Alejandro Barrientos Reyna²

¹Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Coordinación Estatal Michoacán.

²Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Oficinas Centrales

Resumen

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) realizó un primer inventario nacional de fenómenos geológicos, en este caso sobre los movimientos en masa (MM, equivalente en este libro a procesos de remoción en masa o PRM, Capítulo 1). En total se han cartografiado y georreferenciado 10,308 MM en cuatro diferentes regiones del país: Zongolica, la porción noreste de la Sierra Madre Oriental, Macizo de Chiapas y región Huasteca. Primero se consultaron registros de MM en fuentes hemerográficas, trabajos académicos y bases de datos como DesInventar y del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Sin embargo, los datos obtenidos no están posicionados espacialmente, por lo que fue necesario utilizaron métodos y técnicas cartográficas y de percepción remota para georreferenciarlos. Asimismo, el INEGI elaboró el *Diccionario de datos del inventario nacional de fenómenos geológicos* (INEGI, 2012). En el presente trabajo se establecen las características y criterios de representación vectorial del fenómeno.

Palabras clave: fenómenos geológicos, movimientos en masa, deslizamientos.

Introducción

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), conforme al Art. 26º, apartado B, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, tiene la responsabilidad de normar y coordinar el Sistema Nacional de Estadística y Geografía (SNIEG); asimismo, conforme a la Ley del SNIEG, Art. 2º, fracción IV, tiene la encomienda de levantar información geográfica de interés nacional (Gobierno de México, 2014). En respuesta a la necesidad mencionada, el INEGI se ha dado a la tarea de generar el inventario nacional de fenómenos geológicos que será actualizado posteriormente y estará disponible en el portal Mapa Digital de México en la versión 6 (<http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>). Se pretende que sea un insumo en la planeación, prevención, seguimiento y fortalecimiento de las políticas públicas y en las acciones que en materia de protección civil preventiva se deben incorporar en México.

La Tierra como un sistema dinámico tanto al interior como al exterior (procesos endógenos y exógenos) produce eventos geológicos que han originado la diversidad del relieve y el paisaje. Es decir, estos eventos son los arquitectos de los diversos escenarios en los que se ha desarrollado nuestra civilización, por lo que nuestro desarrollo económico y social no es ajeno a los procesos exógenos o modeladores del relieve, entre los cuales se encuentran los MM en sus diferentes formas y dimensiones (Capítulo 1).

Todos los años, en los diferentes medios de comunicación (periódico, radio y televisión), se dan a conocer reportes sobre los MM y su grado de afectación en la población, pero surge la pregunta: ¿dónde exactamente han ocurrido dichos MM? Pues bien, son numerosos los trabajos académicos en los que se ha estudiado, clasificado e incluso predicho la susceptibilidad sobre su ocurrencia; sin embargo, para contestar esta pregunta es necesaria una base de datos georreferenciada con un criterio homogéneo en la que se pueda observar e interpretar la ocurrencia de los MM.

Conforme a la normatividad del INEGI cada documento cartográfico debe contar con su diccionario de datos. El *Diccionario de datos de fenómenos geológicos* (INEGI, 2012) es un documento específico complementario de las normas técnicas en materia geográfica y

contiene las especificaciones particulares que rigen los procesos de producción de los datos espaciales a nivel de objetos espaciales. Describe cada objeto en términos de su definición, sus atributos y sus dominios de valores, así como su representación espacial y las restricciones de integridad.

Un objeto espacial es una abstracción construida a partir de un elemento del espacio geográfico; puede corresponder a elementos de la naturaleza, a productos de la mano del hombre o a abstracciones numéricas derivadas de las dos anteriores. Su característica intrínseca es la referencia espacial en dos o tres dimensiones expresada en coordenadas geográficas.

En el *Diccionario de datos de fenómenos geológicos* (INEGI, 2012) se consideran siete objetos espaciales: aparato volcánico, erosión costera, inundación, movimiento en masa, sismo, subsidencia y colapso.

El objeto espacial que nos ocupa en el presente documento es el movimiento en masa que, en términos sencillos, se describe como un desplazamiento del terreno (depósitos recientes y/o rocas) a diferentes velocidades sobre las pendientes, debido a factores naturales y/o antropogénicos. Dicho objeto es representado geométricamente con un símbolo puntual.

Inventario nacional de fenómenos geológicos: capa de movimientos en masa

El inventario de los MM se desarrolló en las siguientes etapas:

A. Recopilación y análisis de información digital e impresa de los MM ocurridos en México. En esta etapa se rescataron registros en bases de datos, documentos académicos y fuentes hemerográficas.

B. Fotointerpretación y georreferenciación. Estos procesos se realizaron con base en las capas cartográficas de entidades, municipios, localidades urbanas y localidades rurales del Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2010) y, además, con conjuntos vectoriales topográficos, escalas 1:50 000 y 1:250 000; Continuo Nacional Geológico, escala 1:250 000, serie I (vectorial);

Continuo Nacional de Isoyetas (vectorial), imágenes de satélite de alta resolución y ortofotos.

C. Reinterpretación y validación de los MM. Elaboración de un documento normativo para definir el objeto espacial MM, sus atributos y valores (INEGI, 2012).

D. Integración de datos de la capa MM y validación de atributos de los objetos espaciales (MM).

Inventario nacional de fenómenos geológicos: objeto espacial movimientos en masa

El inventario de los MM se inició en 2011 con 698 puntos georreferenciados y distribuidos en la parte centro-sur del país. Actualmente están disponibles para su consulta en el Mapa Digital del INEGI en: www.gaia.inegi.org.mx/mdm6/ (Figura 1) con su correspondiente simbología (Figura 2).

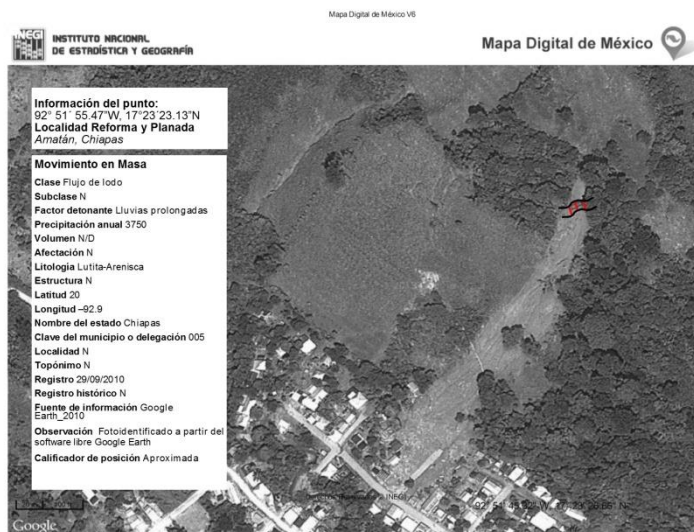


Figura 1. Vista de un movimiento en masa (flujo de lodo en Amatán, Chiapas) y el despliegue de atributos, obtenida de la capa de MM (homólogo de PRM) en el Mapa Digital del INEGI.

-  Movimiento en masa - Compuesto
-  Movimiento en masa - Desprendimiento
-  Movimiento en masa - Flujo de Detritos
-  Movimiento en masa - Flujo de Lodo
-  Movimiento en masa - Ninguno
-  Movimiento en masa - Rotacional
-  Movimiento en masa - Traslacional
-  Movimiento en masa - Vuelcos

Figura 2. Simbología por tipo de movimientos en masa usada en el Mapa Digital de México del INEGI.

A partir de 2012, el INEGI ha dado continuidad a la elaboración del inventario nacional de fenómenos geológicos: capa movimientos en masa, de cuatro diferentes regiones. En 2012, el inventario registró 508 y 870 MM en la porción noreste de la Sierra Madre Oriental y en la Sierra de Zongolica, respectivamente; para 2013 se obtuvieron 6,305 en el Macizo de Chiapas y en 2014 se registraron 1,927 MM en la región Huasteca (Figura 3). En total se cuenta con 10,308 MM identificados y georreferenciados. Cabe mencionar que estos registros estarán disponibles en el Mapa Digital de México del INEGI en el primer semestre de 2015.

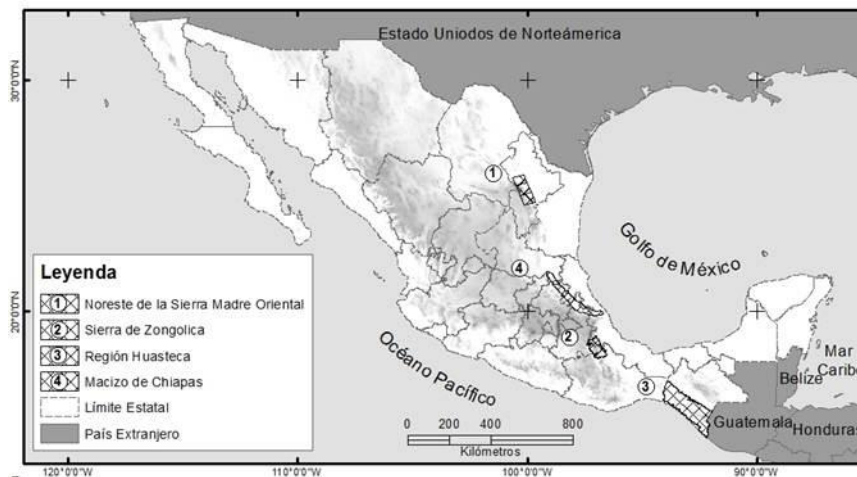


Figura 3. Mapa de distribución de polígonos fotointerpretados: noreste de la Sierra Madre Oriental con 508 MM, Sierra de Zongolica con 870 MM, región Huasteca con 1,927 MM, Macizo de Chiapas con 6,305 MM.

Polígono noreste de la Sierra Madre Oriental

El polígono noreste de la Sierra Madre Oriental incluye a 23 municipios de las entidades federativas Coahuila de Zaragoza y Nuevo León, aunque no abarca a todos completamente. En Coahuila de Zaragoza cubre parcialmente el municipio de Arteaga, en donde se registraron tres MM de tipo caído, dos de deslizamiento y dos de flujo.

Los 22 municipios restantes pertenecen a Nuevo León y seis de ellos están abarcados totalmente: Allende, Guadalupe, Monterrey, Rayones, San Nicolás de los Garza y San Pedro de los Garza García. Los municipios cubiertos parcialmente son: Apodaca, Cadereyta Jiménez, El Carmen, Galeana, García, General Escobedo, General Zuazua, Hualahuises, Iturbide, Juárez, Linares, Montemorelos, Pesquería, Salinas Victoria, Santa Catarina y Santiago. Todos estos municipios suman 508 MM de cuatro diferentes tipos: 273 flujos, 142 caídos, 941 deslizamientos y dos de reptación.

Polígono de la Sierra de Zongolica

El polígono de la Sierra de Zongolica comprende 52 municipios de tres entidades federativas: Veracruz de Ignacio de la Llave, Puebla y Oaxaca. Los municipios del estado de Veracruz son: Acultzingo, Astacinga, Atlahuilco, Camerino Z. Mendoza, Coetzala, Huiloapan de Cuauhtémoc, Ixtaczoquitlán, Magdalena, Mixtla Altamirano, Naranja, Rafael Delgado, Los Reyes, San Andrés Tenejapan, Soledad Atzompa, Tehuipango, Tequila, Texhuacán, Tlaquilpa, Tlilapan, Xoxocotla y Zongolica. Estos municipios apenas cubren 28.3% de la superficie del polígono; sin embargo, contienen más de la mitad de los MM georreferenciados con un total de 478 MM, entre los que predominan los deslizamientos (233 MM), seguidos muy de cerca por los flujos (207 MM) y los menos representativos, los de tipo caído (38 MM).

El estado de Puebla cubre 41.3% de este polígono. Ahí se identificaron 162 MM distribuidos (18.62%) en 10 municipios: Coyomeapan, Eloxóchitl, Nicolás Bravo, San Antonio Cañada, San Sebastián Tlacotepec, Vicente Guerrero, Coxcatlán, Zinacatepec, Ajalpan y Zoquitlán. Predominan los MM de tipo deslizamiento (86 MM), les siguen los de tipo flujo (56 MM) y los menos frecuentes, los de tipo caído (20 MM).

Los municipios trabajados en Oaxaca cubren 30.4% de la superficie de este polígono y suman 21: Eloxochitlán de Flores Magón, Huautepéc, Huautla de Jiménez, Mazatlán Villa de Flores, San Bartolomé Ayautla, San Francisco Huehuetlán, San Jerónimo Tecóatl, San José Tenango, San Juan Coatzacoapam, San Juan de los Cués, San Lorenzo Cuaunecuiltla, San Lucas Zoquiápam, San Martín Toxpalan, San Mateo Yoloxochitlán, San Pedro Ocopetillo, Santa Ana Ateixtlahuaca, Santa Cruz Acatepec, Santa María Chilchotla, Santa María la Asunción, Santa María Teopoxco, Santiago Texcalcingo. En total fueron observados 230 MM: 142 de flujos, 64 de deslizamientos y 24 de tipo caído.

Polígono Macizo de Chiapas

En el denominado polígono Macizo de Chiapas se registraron 6,305 MM: 4,588 flujos, 1,449 deslizamientos, 218 caídos y 50 de tipo reptación. Este polígono abarca 37 municipios del estado de Chiapas, de los cuales Acacoyagua, Ángel Albino Corso, Bejucal de Ocampo, Bella Vista, El Porvenir, Escuintla, La Grandeza, Montecristo de Guerrero, Siltepec y Tuzatlán están incluidos totalmente en este polígono; los 27 restantes están abarcados de forma parcial: Acapetahua, Amatenango de la Frontera, Arriaga, Cacahoatán, Chicomuselo, Cintalapa, Frontera Comalapa, Frontera Hidalgo, Huehuetán, Huixtla, Jiquipilas, La Concordia, Mapastepec, Mazapa de Madero, Mazatlán, Motozintla, Ocozacoautla de Espinosa, Pijijiapan, Suchiate, Tapachula, Tonalá, Tuxtla Chico, Unión de Juárez, Villa Comaltitlán, Villa Corso y Villaflores.

Polígono de la región Huasteca

El polígono de la región Huasteca tiene una superficie de 9,134 km² y se encuentra en 107 municipios de cinco entidades federativas: Hidalgo, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí y Veracruz de Ignacio de la Llave.

Hidalgo cubre 21.96% de este polígono con 19 municipios: Atlapexco, Calnali, Chapulhuacán, Huazalingo, Huehuetla, Huejutla de Reyes, Jaltocán, Lolotla, Pisaflores, San Bartolo Tutotepec, San Felipe Orizatlán, Tenango de Doria, Tepehuacán de Guerrero, Tianguistenco, Tlanchinol, Xochiatipan, Xochicoatlán, Yahualica y

Zacualtipán. En este estado se registraron 562 MM, entre los que predominan los de deslizamientos y los caídos, con 234 y 229 MM, respectivamente. Los menos frecuentes son los de tipo flujo y reptación con 87 y 12 MM, respectivamente. Conviene destacar que algunos de estos municipios no presentan MM en la porción de su superficie dentro del polígono de trabajo.

Puebla cubre 32.14% del polígono de la región Huasteca. En esta superficie se registraron 447 MM, de los cuales 245 son deslizamientos, 159 de flujo, 42 caídos y 1 de reptación. Asimismo cubre total y/o parcialmente 48 municipios: Acatenco, Ahuacatlán, Amixtlán, Atlequizayan, Camocuautla, Caxhuacan, Chiconcuautla, Coatepec, Cuautempan, Cuetzalan del Progreso, Hermenegildo Galeana, Huauchinango, Huehuetla, Hueyapan, Hueytamalco, Hueytalpan, Huitzilán de Serdán, Ixtepec, Jalpan, Jonotla, Jopala, Juan Galindo, Naupan, Nauzontla, Olintla, Pahuatlán, Pantepec, San Felipe Tepatlán, Tenampulco, Tepango de Rodríguez, Teziutlán, Tlacuilotepec, Tlaola, Tlacopaya, Tlatlauquitepec, Tlaxco, Tuzampan de Galeana, Xicotepec, Xiutetelco, Xochitlán de Vicente Suárez, Yaonihuac, Zacapoaxtla, Zacatlán, Zapotitlán, Zihuatehuatla, Zongozotla y Zoquiapan.

Querétaro cubre únicamente 0.39% de este polígono y toca una porción del municipio Jalpa de Serra. Ahí se registraron dos deslizamientos y dos flujos.

San Luis Potosí sólo cubre 16.22% del polígono, y se registraron 345 MM, de los cuales 179 son de deslizamiento, 77 de flujos, 71 caídos y 18 de reptación. Los municipios son: Aquismón, Axtla de Terrazas, Coxcatlán, Huehuetlán, Matlapa, San Antonio, San Martín Chalchicuautla, Tamazunchale, Tampacán y Xilitla.

Veracruz cubre casi 29.29% de este polígono con 27 municipios: Altotonga, Atzalan, Benito Juárez, Coahuatlán, Colipa, Coxquihui, Coyutla, Espinal, Filomeno Mata, Huayacocotla, Ilamatlán, Ixhuatlán de Madero, Jalancingo, Martínez de la Torre, Mecatlán, Misantla, Nautla, Tenochtitlan, Texcatepec, Tlachichilco, Tlapacoyan, Vega de Alatorre, Yecuatla, Zacualtipan, Zontecomatlán de López y Fuentes y Zozocolco de Hidalgo.

Diccionario de datos del inventario nacional de fenómenos geológicos escala 1:250 000

Para terminar, debe señalarse que el diccionario contiene la caracterización conceptual de los MM como: tipo, clase, subclase, factor detonante, precipitación anual, volumen, afectación, litología, estructura, latitud, longitud, nombre del estado, clave de municipio o delegación, localidad, topónimo, registro, fuente de información, campo para observaciones y calificador de posición con su correspondiente conceptualización. Este documento estará disponible en el primer semestre de 2015 en la Mapa Digital de México del INEGI.

Referencias

- Gobierno de México. (2014). *Constitución Política de Los Estados Unidos Mexicanos*. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1_07jul14.pdf
- Gobierno de México. (2014). *Ley del Sistema Nacional de Información, Estadística y Geográfica*. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LSNIEG_140714.pdf
- INEGI. (2010). *Marco Geoestadístico 2010 versión 6.0a*. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx
- INEGI. (2012). *Diccionario de datos del inventario nacional de fenómenos geológicos, escala 1:250 000*. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/geologia/default.aspx?_file=/geo/contenidos/recnat/geologia/doc/dd_invnacfengeol_250k.pdf
- INEGI. (2014). *Mapa Digital*. Recuperado de <http://gaia.inegi.org.mx/>

CAPÍTULO 6

Antecedentes de los deslizamientos de laderas en Veracruz

Wendy Morales Barrera^{1,2} y Sergio Rodríguez Elizarrarás¹

¹Instituto de Geología, Universidad Autónoma de México

²Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz

Resumen

Los peligros geológicos superficiales más recurrentes en el estado de Veracruz son los procesos de remoción en masa (PRM). La historia de éstos muestra una amplia exposición a los fenómenos hidrometeorológicos, los cuales han desencadenado este tipo de amenazas. En menos de una década (2005 a 2013), se han registrado 2,010 deslizamientos, deslaves y derrumbes, algunos de gran envergadura, que han ocasionado severas pérdidas económicas y humanas. El 2013 fue un año atípico, ya que de junio a diciembre se registraron intensas lluvias en gran parte del estado de Veracruz, originadas por una serie de sistemas meteorológicos sucesivos. Este ritmo de precipitación de varios días consecutivos favoreció la saturación del suelo y, en consecuencia, la inestabilidad de muchas laderas en las regiones montañosas de Misantla, Juchique de Ferrer, Zongolica, Huayacocotla, Cofre de Perote, Los Tuxtlas, Uxpanapa y Papantla. En este año, ocurrieron al menos 789 deslizamientos que afectaron principalmente la zona centro del estado. Además de las lluvias, también prácticas humanas históricas como la deforestación, el mal diseño de carreteras, la inadecuada explotación de bancos de material, las constantes fugas en tuberías de agua, entre otras, han sido identificadas como factores asociados a los PRM. Para hacer frente a

estos escenarios, el Gobierno del Estado de Veracruz, a través de la Secretaría de Protección Civil, ha trabajado con un enfoque de gestión y reducción de riesgos, por medio de un proceso transversal y articulado, con la finalidad de salvaguardar la vida, el patrimonio de la población y la infraestructura, así como asegurar un desarrollo sostenible.

Palabras clave: fenómenos atmosféricos, ciclones tropicales, frentes fríos, Veracruz.

Introducción

El estado de Veracruz muestra una amplia exposición a los fenómenos naturales y antropogénicos. Sin duda, aquellos de mayor prioridad son los asociados a los fenómenos hidrometeorológicos que han desencadenado inundaciones y deslizamientos que causan severas pérdidas económicas y humanas. Sin embargo, este impacto adquiere cada vez mayores proporciones debido a las acciones de los seres humanos que deterioran el ambiente, así como a los efectos adversos del cambio climático, tales como el aumento de temperaturas y del nivel del mar, más lluvias, sequías, inundaciones y deslizamientos.

Los peligros geológicos superficiales más recurrentes en el estado de Veracruz son los procesos de remoción en masa (PRM), entre los cuales predominan los deslizamientos de tierra, seguidos por los hundimientos del terreno. Este tipo de fenómenos se concentra, predominantemente, en las zonas serranas con topografía abrupta y geología compleja. La figura 1 muestra una distribución de los deslizamientos de tierra en el sur de la República mexicana.

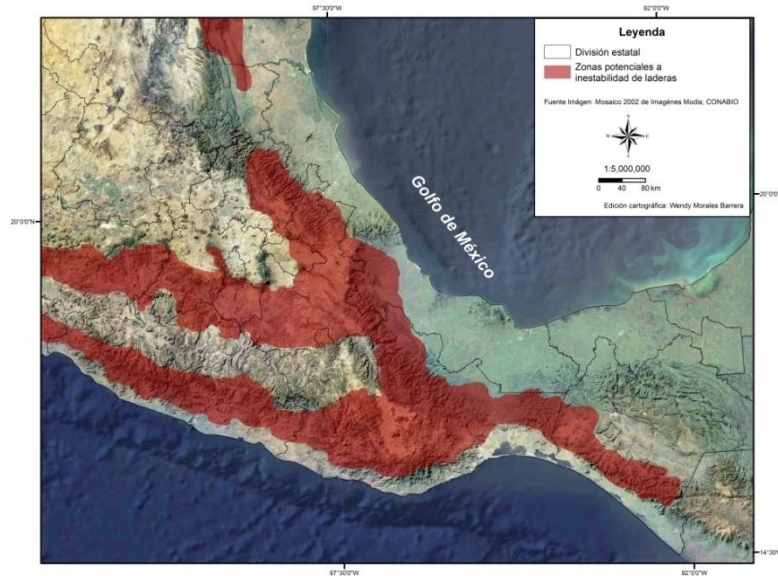


Figura 1. Distribución de zonas con potencial importante para la ocurrencia de procesos de remoción en masa (áreas en café). Obsérvese que en el estado de Veracruz hay una ocurrencia importante en la zona serrana central (modificado de CENAPRED, 2001).

Antecedentes históricos de inestabilidad de laderas

Para tener un mejor conocimiento sobre la inestabilidad de laderas es necesario saber la ocurrencia, la distribución espacial y las características de este fenómeno en un tiempo determinado, lo cual se logra mediante la elaboración de un mapa de inventarios de procesos de remoción (Alcántara y Murillo, 2008). Estos inventarios registran la ubicación, la fecha de ocurrencia, la extensión y la tipología de dichos procesos, así como los daños que ocasionan, entre otras cosas. (Mc Calpin, 1984; Guzzetti, *et al.*, 2012).

Rodríguez y Morales (2014) realizaron un inventario multitemporal de los PRM para el estado de Veracruz. En dicho inventario se hace un recuento de los eventos ocurridos entre 2005 y 2013. Las técnicas y herramientas utilizadas para la elaboración de éste fueron trabajo de campo, análisis e interpretación de imágenes, recopilación de archivos históricos e informes técnicos y, posteriormente, incorporación de la información compilada a un sistema de información geográfica.

Este inventario registra aproximadamente 2,010 deslizamientos ocurridos a lo largo de todo el estado en poco menos de una década, así como su ocurrencia por año (Figura 2), su distribución espacial y las afectaciones que han ocasionado. Destaca que la mayoría de estos eventos se han presentado durante los meses que van de junio a noviembre (Figura 3), periodo que coincide con la temporada de lluvias y ciclones tropicales en el Atlántico. Sin embargo, este trabajo no muestra la magnitud de eventos históricos notables de estos PRM, como los referidos en Rodríguez *et al.* (2011), que tuvieron lugar en algunas comunidades de los municipios de Tlachichilco, Papantla, La Perla, Orizaba e Hidalgotitlán; o más recientes, como los descritos por Morales y Rodríguez (2008a, 2008b), ocurridos en la localidad de Barranca Grande en el municipio de Ixhuacán de los Reyes y en la cabecera del municipio de Ozuluama, entre otros.

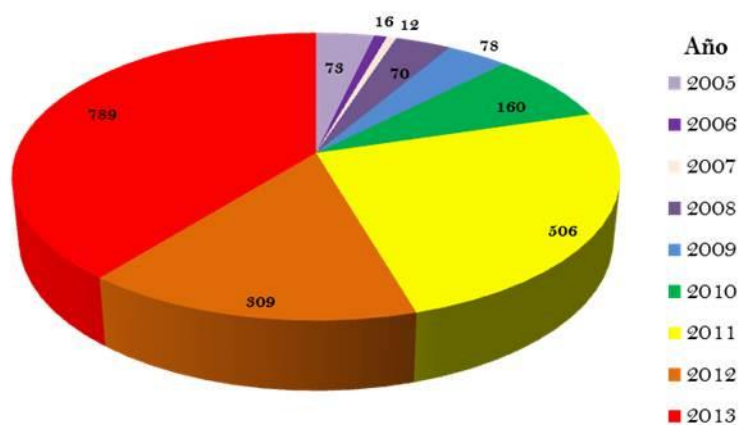


Figura 2. Número de casos de procesos de remoción en masa ocurridos durante el periodo 2005 a 2013 en el estado de Veracruz (Fuente Rodríguez y Morales, 2014).

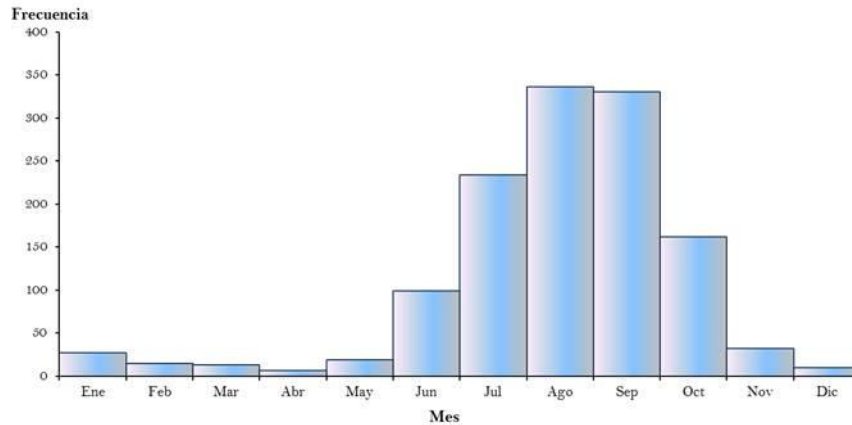


Figura 3. Mes de ocurrencia de los deslizamientos durante el periodo 2005 a 2013 en el estado de Veracruz.

Ocurrencia de los deslizamientos a nivel estatal durante 2013 desencadenados por los fenómenos meteorológicos

El 2013 fue un año atípico, pues el estado de Veracruz se vio afectado por una serie de sistemas meteorológicos sucesivos, entre los que destacan las tormentas tropicales Barbara, en el océano Pacífico; Barry y Fernand, en el Golfo de México; la depresión tropical No. 8 y el huracán Ingrid como tropicales y los frentes fríos 1, 4, 6, 7 8, 10, 11, 12 y 14 como extratropicales. Esto dio como resultado lluvias por arriba de la media en la mayor parte del estado y con máximos en la zona de las cuencas Nautla-Misantla, en donde ésta se superó por más de 120% durante el periodo junio-octubre (Guzmán y Morales, 2014).

Este ritmo de precipitación, de pocos días de diferencia, favoreció que la lluvia se infiltrara y no escurriera, lo que ocasionó que varias laderas de las zonas serranas acumularan progresivamente agua en el terreno, provocando la saturación y la elevación de los niveles freáticos. Este hecho desencadenó, al menos, 789 deslizamientos en diferentes puntos (Guzmán y Morales, 2014). Esta inestabilidad de laderas afectó principalmente las regiones montañosas de las cuencas de Nautla, Juchique de Ferrer, La Antigua, Actopan, Cazonas, Papaloapan y Tuxpan (Figura 4).

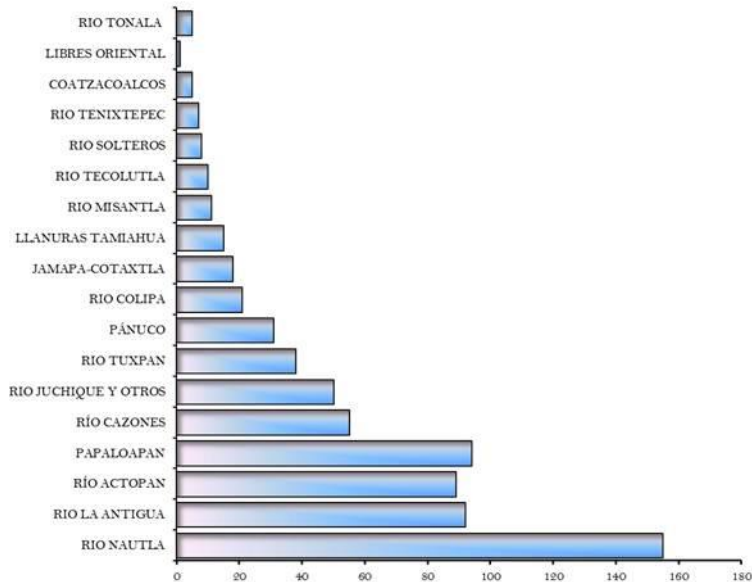


Figura 4. Frecuencia de deslizamientos ocurridos durante 2013 en las cuencas del estado veracruzano (modificado de Guzmán y Morales, 2014).

Como consecuencia de estos movimientos de terreno, diversas comunidades sufrieron severos daños en su infraestructura vital y estratégica, y, lamentablemente, en algunas hubo pérdidas humanas. Entre los casos más representativos de los varios cientos de deslizamientos que ocurrieron durante 2013, destacan los procesos de reptación en las localidades Rincón de Negros en el municipio de Alto Lucero (Figura 5) y Liquidámbar en el municipio de Misantla; el deslizamiento rotacional en la comunidad El Capulín en Chiconquiaco (Figura 6); los deslizamientos complejos en Barranca Nueva en Ixhuacán de los Reyes y Xaltepec en Altotonga; y los flujos de lodo y rocas en las comunidades de Roca de Oro en el municipio de Yecuatla y Rincón de Chicol en Mariano Escobedo (Figura 7).



Figura 5. Daños ocasionados en las viviendas de la comunidad de Rincón de Negros, municipio de Alto Lucero, Veracruz por el proceso de reptación ocurrido en junio de 2013.



Figura 6. Corona del deslizamiento rotacional, de aproximadamente 200 m (línea punteada), ocurrido en la localidad El Capulín, municipio de Chiconquiaco, en octubre de 2013. Observe el tamaño de las personas en el costado derecho en donde se puede ver la medida 1.75 m.



Figura 7. Flujo de lodo en Rincón de Chicol, municipio de Mariano Escobedo con dirección Noreste el cual se extendió en un área de aproximadamente 250 m² y sepultó dos viviendas que se encontraban en la zona baja.

Factores que condicionaron y desencadenaron los deslizamientos durante 2013

Es importante resaltar que el factor que desencadenó estos deslizamientos fue un periodo de intensas y prolongadas lluvias; sin embargo, existen otros factores que los propiciaron, los cuales se describen a continuación.

Indudablemente uno de estos factores son las condiciones naturales que hay en el estado:

1. La naturaleza del material geológico que forma las regiones serranas y que está íntimamente relacionada con el tipo de inestabilidad que puede sufrir.
2. La topografía que define la pendiente y la geometría de las laderas.

Pero los factores más importantes que están desestabilizando las laderas son las modificaciones que el ser humano hace en la superficie de la tierra, específicamente en aquellos lugares en donde no existe un adecuado ordenamiento territorial. Las principales modificaciones identificadas que necesitan atención de manera inmediata son las siguientes:

1. La más importante es la deforestación de grandes extensiones de bosques, especialmente la que ocurre cerca de los núcleos urbanos.
2. La construcción de carreteras mal diseñadas, las cuales se hacen en pendientes escarpadas sin estudiar la geología y la geomorfología del terreno, lo cual modifica, en ocasiones, los drenajes naturales y genera taludes inestables sin ninguna obra de mitigación.
3. Explotación inadecuada de bancos de material en grandes áreas con cortes de talud de gran altura, o bancos abandonados sin ningún tratamiento para estabilizarlos.
4. Fugas incontroladas en tuberías de agua y descarga directa de aguas domésticas y de fosas sépticas.
5. Cambios topográficos para adaptar los terrenos al proceso de urbanización; así como la construcción informal e incluso formal en pendientes escarpadas.
6. La colocación de rellenos directamente sobre los taludes para nivelar los terrenos, generalmente sin compactación o compactados inadecuadamente.
7. La construcción de canales de irrigación de agua, los cuales constituyen puntos concentrados de infiltración que generan variaciones en el terreno.

Como se observa, son más los factores humanos que contribuyen a acelerar los deslizamientos de tierra.

La importancia del Sistema Estatal de Protección Civil y la inestabilidad de laderas

Las comunidades veracruzanas están constantemente expuestas a los peligros por deslizamientos que, conjugados con el grado de vulnerabilidad de aquéllas, determinan escenarios con altas probabilidades de originar grandes desastres y constantes

emergencias. Esta situación exacerba las condiciones de pobreza y la pérdida de bienes sociales, económicos, ambientales y vidas humanas.

Con el propósito de hacer frente a estos escenarios, ha sido fundamental el cambio de paradigma de las políticas de Protección Civil del Gobierno del Estado de Veracruz; también pasar de un enfoque reactivo, que ha prevalecido por décadas, a uno de gestión y reducción de riesgos, orientado como un proceso transversal y articulado con el fin de conocer las principales causas que dan origen al riesgo de desastres, y así salvaguardar la vida, el patrimonio de la población y la infraestructura, para poder asegurar un desarrollo sostenible.

Para ello, es imprescindible el trabajo en el marco del Sistema Estatal de Protección Civil, el cual tiene las siguientes prioridades (Ley N° 856, 2013):

- Promover que la reducción del riesgo de desastres constituya un objetivo prioritario en las políticas públicas, los programas de gobierno y la planeación de un desarrollo sostenible.
- Identificar, evaluar y vigilar los riesgos de desastre y potenciar la alerta temprana.
- Utilizar el conocimiento, la innovación y los contenidos de la educación para establecer una cultura de prevención y de resiliencia en toda la población.
- Reducir los factores subyacentes de riesgo.

Del mismo modo, es importante señalar que la participación de las comunidades en la reducción de riesgos de desastre, mediante la transferencia de habilidades, resulta fundamental para fortalecer los procesos de toma de decisiones y responsabilidades que les permitan obtener soluciones relevantes en su realidad, así como para construir conocimiento y experiencia con los cuales enfrenten nuevos retos.

Con lo anterior, se garantiza la suma de esfuerzos y corresponsabilidades de acuerdo con el ámbito de competencia de cada institución y de la población. Así se actuó en 2013 para hacer frente a la multiplicación de deslizamientos y deslaves ocurridos en el estado de Veracruz.

Referencias

- Alcántara, I. y Murillo, F. (2008). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 66, 47-64.
- CENAPRED (2001). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. En *Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana*. pp. 1-232. México: CENAPRED.
- Guzzetti, F., Cesare, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M. y Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problema. *Earth-Science Reviews*, 112, 42–66.
- Guzmán, N. y Morales, W. V. (2014). La gestión de riesgos por deslizamientos de laderas en el estado de Veracruz durante el 2013. Xalapa, Veracruz: Gobierno del Estado de Veracruz.
- McCalpin, J. (1984). Preliminary age classification of landslides for inventory mapping. En *Proceedings 21st annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium*. pp. 99–111. Moscow, Idaho: University Press.
- Morales, W. V. y Rodríguez, S. R. (2008a). Informe de la visita realizada a la localidad de Barranca Grande, municipio de Ixhuacán de Los Reyes, Veracruz, el día 13 de septiembre de 2008 (Informe técnico inédito). Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz.
- Morales, W. V. y Rodríguez, S. R. (2008b). Informe de la visita realizada a la cabecera municipal de Ozuluama, Veracruz, los días 17 y 18 de octubre de 2008 (Informe técnico inédito). Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz.
- Ley Número 856 (agosto, 2013). Ley de Protección Civil y la Reducción del Riesgo de Desastres para el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. *Gaceta Oficial del Órgano del Gobierno del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave*. Xalapa-Enríquez, México. Oficio número 188/2013.
- Rodríguez, S. R., y Morales, W. V. (2014). Peligros geológicos asociados a deslizamientos, hundimientos y agrietamientos del terreno en localidades del centro y norte del estado de Veracruz. Análisis, evaluación e integración en un Sistema de Información Geográfica (Informe técnico inédito). Proyecto FOMIX 109131.
- Rodríguez, S. R., Mora, I., Murrieta, J. y Morales, W. V. (2011). Peligros geológicos más frecuentes en el estado de Veracruz. Xalapa, Veracruz: Universidad Veracruzana.

CAPÍTULO 7

Consideraciones hidrometeorológicas relacionadas con el deslizamiento de laderas en el estado de Veracruz

Federico Acevedo¹ y José Llanos²

¹Centro de Estudios y Pronósticos Meteorológicos

²Secretaría de Protección Civil de Veracruz

Resumen

Uno de los factores que interviene significativamente en los procesos de remoción en masa (PRM) es el agua, por ello se escogió describir los principales sistemas meteorológicos que año con año producen lluvias fuertes, intensas y torrenciales en el estado de Veracruz, en particular los fenómenos atmosféricos que provocaron fuertes precipitaciones en 2013 y que desencadenaron frecuentes deslizamientos de laderas en la región central veracruzana.

Palabras clave: fenómenos atmosféricos, ciclones tropicales, frentes fríos, Veracruz.

Introducción

Desde el punto de vista atmosférico, la vertiente oriental de México (Tamaulipas, Veracruz y Tabasco) es afectada cada año por 45 frentes fríos, en promedio, entre septiembre y mayo y por igual número de ondas tropicales entre junio y noviembre. También suelen presentarse tormentas eléctricas locales que favorecen fuertes chubascos y, por si

esto fuera poco, en los últimos diez años, los impactos directos de ciclones tropicales han aumentado (Acevedo, 2014). A su vez, estos fenómenos atmosféricos pueden ocasionar lluvias localmente intensas que desencadenan crecidas de ríos y arroyos y favorecen deslaves, derrumbes y deslizamientos.

En los últimos años, la lámina de lluvia acumulada en el estado de Veracruz ha registrado valores superiores a sus niveles históricos (promedio de 1,553 mm). Un ejemplo de ello ocurrió en 2013, cuando, a excepción de enero, abril y diciembre, llovió todo el año.

Factores que intervienen en los procesos de remoción en masa

De acuerdo con Morales y Rodríguez (2014), los PRM son ocasionados por dos tipos de factores: determinantes o condicionantes y detonantes o desencadenantes.

Entre los factores determinantes se encuentran: el tipo de suelo, la saturación del suelo por el agua, la deforestación, la pendiente del terreno y el relieve, entre otros más.

Con respecto de los factores detonantes, el primero incluye las lluvias puntuales asociadas a eventos o sistemas meteorológicos extremos de gran escala o locales y el segundo, en algunos casos, se refiere a la interacción de la lluvia con otros fenómenos de tipo extratropical como los frentes fríos, así como los eventos sísmicos. En ambos tipos de factores, el agua juega un papel importante durante los PRM.

En 2013, las lluvias torrenciales que resultaron de la presencia consecutiva de fenómenos atmosféricos, además de alteraciones ambientales como la deforestación y los cortes carreteros, fueron determinantes para que en ese año se registraran 789 deslaves y derrumbes en el estado de Veracruz. A continuación, desde el punto de vista meteorológico, se describen las circunstancias de estas precipitaciones y las zonas en donde la mayoría ocurrieron.

Sistemas meteorológicos que afectan al estado de Veracruz

a) Ciclones tropicales

Por su posición geográfica, México quizá sea el único país que cada año es impactado por ciclones tropicales (CT) de dos océanos, Pacífico y Atlántico. Históricamente se puede decir que, de manera

directa o indirecta, nuestro país es afectado desde el inicio de la temporada de ciclones que, oficialmente, comienza a partir del 15 de mayo en el océano Pacífico. En la cuenca del Atlántico se ha observado que la tendencia anual de CT va en aumento (Luna y Licona, 2013).

Magaña (2004) menciona que los fenómenos de El Niño y La Niña influyen en la generación de CT en ambos océanos; sin embargo, Klotzbach y Wilmsen (2012) establecen que en el Atlántico existe otro fenómeno denominado Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés) que contribuye significativamente en la cantidad de CT que se desarrollan en el Atlántico. En su fase positiva, la AMO dura aproximadamente entre 20 y 30 años. Durante este periodo, se presentan temperaturas superficiales del mar por arriba de su promedio que oscila, durante el verano, entre 24-28°C. Precisamente, una de las condicionantes para que los CT se desarrollen es que la temperatura superficial del mar supere los 26°C.

Desde mediados de la década de los noventa, la AMO se encuentra en su fase positiva. Esto ocasionó que durante la última década el promedio de CT en el Atlántico haya aumentado en cuatro.

Otro dato importante que se debe considerar es que el impacto directo de los CT sobre costas veracruzanas también aumentó a partir de 2005. Luna y Licona (2013) determinaron que, desde 1851 a la fecha, 51 CT han entrado por costas veracruzanas, de éstos, 15 impactos ocurrieron en los últimos nueve años, lo que representa 29% del total.

En el cuadro 1 se enlistan los ciclones y las zonas por donde han penetrado al territorio veracruzano. Como se aprecia, la zona norte es la más propensa a ser embestida, seguida por la parte central y la de menor probabilidad: la porción sur. Sin embargo, se debe mencionar que las lluvias que producen estos sistemas pueden extenderse a través de todo el estado.

Cuadro 1. Ciclones tropicales que han impactado en Veracruz en los últimos nueve años.

Nombre	Categoría	Fecha de impacto	Zona de impacto
1. Bret	Tormenta	29 de junio de 2005	Tecolutla
2. Gert	Tormenta	25 de julio de 2005	Tamiahua
3. José	Tormenta	23 de agosto de 2005	Nautla
4. Stan	Huracán 1	4 de octubre de 2005	Los Tuxtlas
5. Dean	Huracán 1	22 de agosto de 2007	Tecolutla
6. Lorenzo	Huracán 1	28 de septiembre de 2007	Tecolutla
7. Marco	Tormenta	7 de octubre de 2008	Nautla
8. Karl	Huracán 3	17 de septiembre de 2010	La Antigua
9. Arlene	Tormenta	30 de junio de 2011	Tamiahua
10. Harvey	Tormenta	22 de agosto de 2011	Alvarado
11. Nate	Tormenta	11 de septiembre de 2011	Tecolutla-Nautla
12. Ernesto	Tormenta	9 de agosto de 2012	Coatzacoalcos
13. Barry	Tormenta	20 de junio de 2013	La Mancha (Actopan)
14. Fernand	Tormenta	25 de agosto de 2013	Úrsulo Galván
15. Ingrid	Tormenta	16 de septiembre 2013	La Pesca (Tampico)

De acuerdo con lo anterior, las tendencias de ocurrencia y de impacto de los CT continuarán en el estado de Veracruz con respecto de los estados que se ubican en la vertiente oriental del país.

Estas tendencias tienen sustento en las investigaciones de Cristina Archer y Ken Caldeira de la Stanford University y Carnegie Institute for Science de Washington, respectivamente (citado por Masters, 2008). Los investigadores indican que a partir del cambio climático, la corriente en chorro tropical (vientos en altura con velocidades sostenidas máximas de 110 km/h) se ha estado

desplazando hacia el Norte desde 1970, aproximadamente unos 200 km por década.

Esta situación está provocando que los sistemas de alta presión en la superficie con comportamientos asociados a la corriente en chorro (que en muchas ocasiones bloquean a los CT, y los llevan hacia los Estados Unidos o al norte del Atlántico) también tengan menor presencia en las zonas tropicales. Esto provoca que más ciclones se desplacen hacia México y Centroamérica.

Por su parte, Lorenz y De Weaver (citado por Masters, 2008) estiman en algunos estudios que hicieron para el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático que la corriente de chorro puede seguir desplazándose hacia el Norte hasta el 2100. Esto concuerda con lo encontrado por Archer y Caldeira y, por lo tanto, podría persistir la probabilidad de que los ciclones que se formen en el Caribe o Golfo de México sigan llegando a Veracruz en los siguientes años.

b) Frentes fríos

Otros tipos de sistemas que generan lluvias torrenciales en poco tiempo son los frentes fríos. Estos sistemas son franjas o zonas que separan a dos masas de aire de diferente densidad: una fría-seca y otra cálida-húmeda. Cuando la masa de aire frío es más fuerte y empuja o hace retroceder a la masa cálida, se le denomina frente frío (Petersen, 1990).

El tránsito de los frentes fríos por la vertiente oriental del país (y Golfo de México) ocasiona precipitaciones con algunas tormentas eléctricas. Las lluvias suelen ser fuertes al comienzo de su temporada en los meses de septiembre, octubre y noviembre, así como hacia el final de abril y mayo.

Conforme la masa de aire frío y seco avanza sobre la vertiente oriental del país, ésta fuerza a la masa de aire cálido y húmedo a que ascienda. Esto ocasiona la formación de nubes de gran desarrollo vertical conocidas como cumulonimbos, las cuales pueden producir lluvias intensas, especialmente, en las cuencas de los ríos Nautla y Misantla, la región de los Tuxtlas y las zonas bajas de las cuencas de los ríos Coatzacoalcos y Tonalá, en donde se tienen registros históricos de más de 300 litros por metro cuadrado en 24 horas.

De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), en promedio, 51 frentes fríos afectan a México entre el 15 de septiembre y el 15 de mayo de cada año.

c) Ondas tropicales

Las ondas tropicales también suelen provocar lluvias abundantes y, prácticamente, cada año, su continuidad genera el desbordamiento de ríos que se ubican principalmente en el centro y sur de Veracruz.

Las ondas tropicales viajan desde las costas de África, avanzan por el océano Atlántico y el mar Caribe, cruzan nuestro país y se internan en el Pacífico, y en algunas ocasiones se disipan antes de llegar a territorio nacional o sobre el mismo.

En general, el aire asciende en la parte trasera de la onda tropical y genera nubes de gran desarrollo vertical, las cuales favorecen lluvias fuertes en poco tiempo. Sin embargo, esta regla se rompe en el oeste del Golfo de México, en donde las precipitaciones pueden ser más intensas en los momentos que la onda tropical se encuentre frente a la Sierra Madre Oriental o en las inmediaciones de la misma. Este tipo de sistemas pueden generar lluvias superiores a los 100 mm en 24 horas. En promedio, entre la segunda quincena de mayo y los días finales de noviembre, afectan al país entre 40 a 50 ondas.

En la figura 1 se muestran los registros de la lámina acumulada de lluvias anuales del estado de Veracruz (barras oscuras), así como el número de ciclones que impactaron directamente al territorio veracruzano (barras claras). Se puede observar que en el periodo de 2005 a 2013 la precipitación media acumulada anual se ubica dentro o por arriba de lo que llueve normalmente.

Si bien, los CT favorecen lluvias significativas en Veracruz, existen otros fenómenos que suelen ocasionar acumulados importantes, como sucedió en 2006, 2010 y 2012, cuando el impacto directo de ciclones fue mínimo.

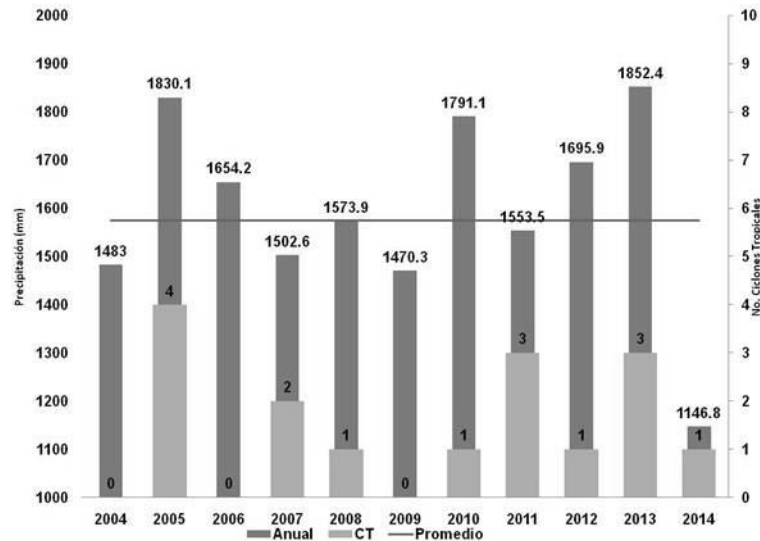


Figura 1. Precipitación anual acumulada e impactos directos de los ciclones tropicales (CT) en el estado de Veracruz. La línea horizontal representa la precipitación anual promedio.

Sistemas meteorológicos que afectaron al estado de Veracruz en 2013

En 2013, el estado de Veracruz fue afectado consecutivamente por diferentes fenómenos tropicales y extratropicales. El primer fenómeno fue el huracán Barbara (27 al 31 de mayo) que pasó por la zona sur. Éste ocasionó lluvias importantes en las cuencas de los ríos Actopan, La Antigua, Jamapa-Cotaxtla, Papaloapan, Coatzacoalcos y Tonalá. En este periodo, se registraron precipitaciones entre los 250 a 300 mm (250 a 300 litros por metro cuadrado), especialmente en la cuenca del río Coatzacoalcos.

A mediados de junio, se desarrolló la tormenta tropical Barry en el océano Atlántico. La mañana del 20 de junio, Barry tocó tierra en la localidad de La Mancha, municipio de Actopan, con vientos máximos sostenidos de 75 km/h. Las primeras lluvias provocadas por Barry ocurrieron durante la noche del miércoles 19 de junio y en los dos días siguientes (por las mañanas) se registraron las precipitaciones más intensas, con valores acumulados superiores a los 250 y 300 mm

durante las primeras 24 horas. Las lluvias más intensas se presentaron en las cuencas de los ríos Misantla, Actopan, Nautla y La Antigua.

El efecto de la canícula de 2013 fue de corta duración, ya que el 25 de agosto de ese año la tormenta tropical Fernand impactó a Veracruz en el municipio de Úrsulo Galván. Fernand provocó lluvias máximas, en 24 horas, de 310 mm en Tenochtitlán; 305 en Misantla; 302 en Libertad; 292 en Tomata; 291 en Martínez de la Torre; 230.5 en El Tejar; 212 en Altotonga; 203 en Veracruz y Acatlán; 191 en Poza Rica; 184 en Manlio F. Altamirano y 182 en Atzacan.

A finales de agosto de 2013, las lluvias continuaron con menor intensidad, pero volvieron a intensificarse el 5 y 6 de septiembre por el impacto de la depresión tropical No. 8 en las inmediaciones de Tampico, Tamaulipas. Esta depresión tropical ocasionó lluvias de 200 mm en las cuencas de los ríos Tecolutla y las partes bajas de las cuencas de los ríos Antigua, Jamapa-Cotaxtla y Papaloapan.

En los siguientes días, las precipitaciones continuaron y generaron vaguadas (sistemas de baja presión elongados e inestables) sobre el oeste del Golfo de México. Asimismo, el paso de la onda tropical No. 19 favoreció precipitaciones, especialmente, en las cuencas de los ríos Cazones, Tecolutla, La Antigua, Jamapa-Cotaxtla, Papaloapan y Coatzacoalcos, con valores puntuales de 100 mm. Estas lluvias incrementaron del 12 al 16 de septiembre por el paso del huracán Ingrid frente y muy cerca al litoral veracruzano. Su paso originó lluvias en todo el estado, y de tipo torrenciales sobre las cuencas de los ríos Nautla y Misantla, en donde se acumuló una lámina superior a los 370 mm.

En 2013, los frentes fríos comenzaron a impactar normalmente la vertiente oriental del país. En la noche del 20 de septiembre, el primer frente frío de la temporada 2013-2014 ingresó al noroeste del Golfo de México; éste interactuó con los remanentes de un sistema de baja presión el día 21 de septiembre sobre las cuencas de los ríos Nautla y Misantla. Esto provocó una lámina de precipitación superior a los 350 mm.

Las lluvias persistieron desde septiembre hasta los primeros días de octubre. Con la llegada del frente frío No. 4, las lluvias se intensificaron del 6 al 8 de octubre y alcanzaron valores máximos superiores a los 200 mm, nuevamente, en las cuencas de los ríos Nautla y Misantla. En la parte baja de la cuenca de los ríos Coatzacoalcos y Tonalá, los valores superaron los 270 mm.

Las lluvias provocadas por los fenómenos descritos y sus valores hicieron de 2013 un año histórico en la entidad veracruzana. Asimismo, resulta importante que el estado fuera impactado directamente por las tormentas tropicales Barry y Fernand e indirectamente por la depresión tropical No. 8 y los huracanes Ingrid y Barbara. La importancia radica en que estos sistemas atmosféricos provocaron, entre junio y noviembre, la acumulación de una lámina de lluvias por arriba de la media (1,232 mm) en la mayor parte del estado, con valores máximos en las cuencas de los ríos Tecolutla, Nautla, Misantla y con valores superiores a los 3,000 y 3,500 mm en parte de la cuenca del río Papaloapan (Figura 2a).

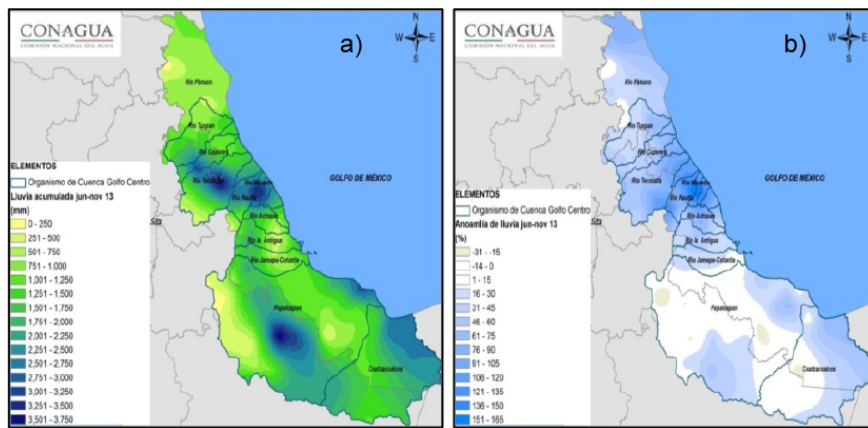


Figura 2. a) Precipitación acumulada entre el 1 de junio y el 30 de noviembre de 2013. b) Anomalía de la precipitación acumulada para el mismo periodo (OCGC, 2013).

Para el periodo de junio y noviembre, en la estación climatológica de Misantla se registró una precipitación de 3,876 mm, lo cual representa un poco más de 1.5 veces sobre su valor medio para el mismo periodo (1,340 mm). El registro de este periodo también superó en más de 150% el valor de la lluvia promedio durante la época de lluvias en algunas zonas de las cuencas de los ríos Nautla y Misantla (Figura 2b).

Es importante mencionar que bajo estas condiciones, el río Nautla se desbordó en cinco ocasiones y el río Agua Dulce (en el sur de Veracruz) lo hizo en cuatro, durante 2013.

Sistemas meteorológicos locales que se deben considerar en la generación de lluvias significativas

Existen fenómenos atmosféricos de escala local que también suelen provocar lluvias significativas en Veracruz, tanto en zonas de montaña como en zonas de costa. Durante las décadas de los setenta y ochenta, es posible que la cubierta vegetal amortiguara los cambios repentinos de temperatura, y con ello evitara erosiones importantes del suelo y redujera la velocidad del escurrimiento superficial. Sin embargo, en la actualidad, el cambio de uso del suelo y su consecuente deforestación (que transforma los bosques en zonas agrícolas y, en especial, en zonas de uso urbano) están generando un aumento de la temperatura del terreno a nivel local-regional. Estos cambios originan que exista mayor energía y esto provoca que los sistemas meteorológicos locales sean cada vez más severos, es decir, tormentas eléctricas con lluvias torrenciales y granizadas más fuertes. Asimismo, estas lluvias provocan un escurrimiento superficial y una mayor erosión del suelo, lo cual implica una degradación del mismo y, posiblemente, un aumento de los MM.

Conclusiones

La actividad del ser humano es un factor determinante en el incremento de la cantidad de movimientos en masa como deslaves y derrumbes. El uso de zonas inapropiadas para la construcción de viviendas, las técnicas inadecuadas para construirlas, el cambio de uso del suelo, la tala inmoderada de árboles, la ampliación y generación de nuevas vías de comunicación en zonas montañosas y la explotación de bancos de arena son algunas de las actividades que han favorecido el hecho de que eventos como los MM sean más recurrentes en varias zonas de Veracruz. Otros factores como los sismos y las precipitaciones también contribuyen a MM como deslaves, deslizamientos y derrumbes.

En 2013, los sistemas y fenómenos meteorológicos ocasionaron lluvias históricas, especialmente en la zona montañosa central de Veracruz, lo que representó un elemento fundamental para que el número de deslaves, deslizamientos y derrumbes superara los 700, muy por arriba de los 70 que normalmente se registran, de acuerdo a la estadística disponible.

Se presume que los CT, por efecto del desplazamiento hacia el norte de la corriente en chorro, incidirán más en México y Centroamérica, hecho que podría reflejarse en el número de impactos en el estado de Veracruz durante los próximos años.

Recomendaciones

Para tener un mejor entendimiento del efecto de la precipitación en relación con los PRM y, sobre todo, para generar herramientas que auxilien en las actividades de alertamiento, se recomienda la instalación de estaciones de monitoreo de lluvia y humedad a diferentes profundidades del suelo en zonas donde la probabilidad de que ocurran PRM sea alta o moderada. Esto permitirá generar modelos predictivos y correlativos entre la precipitación y la susceptibilidad de una ladera al deslizamiento.

Referencias

- Acevedo, F. (2014). El Cambio Climático. ¿Responsable de un elevado número de impactos de Ciclones Tropicales en el Estado de Veracruz durante los últimos años? *Meteorólogos, boletín de meteorología*, 7,32-34.
- Luna, J. y Licona, Y. (2013). Recuento Histórico de la Incidencia de ciclones tropicales en el Estado de Veracruz. *Meteorólogos, boletín de meteorología*, 6, 19-22.
- Magaña, V. (Ed.). (2004). Los impactos del Niño en México. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Secretaría de Gobernación.
- Masters, J. (2008). Jet stream moved northwards 270 miles in 22 years; climate change to blame? [Mensaje en un blog, 5 Junio2008]. Recuperado de <http://www.wunderground.com/blog/JeffMasters/show.html>
- Morales, W. V. y Rodríguez, S. R. (2014). La Gestión del Riesgo por deslizamientos de laderas en el Estado de Veracruz, durante el 2013. Veracruz: Editora del Gobierno del Estado de Veracruz.
- Petersen, S. (1990). *Introducción a la meteorología*. Madrid: Espasa-Calpe.
- Klotzbach, P. J., Gray, W. M., y Wilmsen, E. (2012). Extended range forecast of Atlantic seasonal hurricane activity and landfall strike probability for 2012. Colorado, USA: Department of Atmospheric Science, Colorado State University.

CAPÍTULO 8

Aspectos geomorfológicos, edáficos e hidrológicos relacionados con la inestabilidad de laderas en el centro del estado de Veracruz

Daniel Geissert Kientz¹ y Estela G. Enríquez Fernández²

¹Instituto de Ecología, A.C.

²Universidad Veracruzana

Resumen

En este texto se ilustran, desde la perspectiva de las cuencas, algunos aspectos geomorfológicos, edáficos e hidrológicos locales relacionados con la inestabilidad de laderas en el centro del estado de Veracruz. También se presenta cómo los flujos de agua en la zona crítica terrestre (ZCT) y la gravedad controlan tanto a los procesos de remoción en masa (PRM) como a los procesos de erosión del suelo. A partir de estas consideraciones se concluye que en el estado de Veracruz es necesario promover la investigación sobre la inestabilidad de laderas e integrar la ciencia y la tecnología para evaluar el riesgo de inestabilidad de laderas en áreas urbanas y rurales.

Palabras clave: deslizamiento, erosión, Veracruz.

Introducción

Los procesos de inestabilidad de laderas como los procesos de remoción en masa (PRM), la escorrentía concentrada y los hundimientos son productos del efecto del agua y de la gravedad.

Otros factores detonadores de éstos son los terremotos y los cambios de uso del suelo derivados de las actividades humanas. Paradójicamente, los factores que causan la inestabilidad de laderas también provocan su estabilidad, éstos son el clima, la topografía, la litología, la vegetación/uso del suelo, el hombre y su infraestructura. La diferencia entre si producen inestabilidad o estabilidad depende de la magnitud, frecuencia y lugar de ocurrencia de los procesos.

Por un lado, el agua promueve la inestabilidad de laderas porque la precipitación induce cambios geomorfológicos que favorecen la escorrentía, el intemperismo de los materiales geológicos y los PRM. Por otro lado, el agua estabiliza las laderas cuando contribuye al desarrollo de la vegetación (que protege el suelo contra la erosión y los deslizamientos superficiales en regiones húmedas) y al desarrollo del suelo, el cual es un factor amortiguador de la escorrentía en zonas semi-áridas y áridas. Bajo las mismas condiciones meteorológicas, las características y los mecanismos hidrológicos determinan la frecuencia de la erosión y los diferentes tipos de deslizamientos dentro y fuera de las cuencas potencialmente inestables (Van Asch, Buma y Van Beek, 1999).

Para entender dónde, cuándo y cómo pueden desencadenarse los procesos de inestabilidad de laderas, es importante tener un conocimiento adecuado de lo que varios autores han llamado zona crítica terrestre (ZCT), en inglés *earth's critical zone*, la cual se define como: “un ambiente heterogéneo en la superficie de la Tierra, en el cual interacciones complejas, que involucran rocas, suelos, agua, aire y organismos vivos, regulan el hábitat natural y determinan la disponibilidad de recursos sustentables para la vida” (National Research Council, 2001). La ZCT se extiende desde la copa de los árboles hasta los mantos freáticos profundos y se refiere, particularmente, al suelo intemperizado, la regolita y el sustrato rocoso consolidado, en el cual se aloja el manto freático o acuífero. El estudio de la ZCT no sólo debe enfocarse en sus componentes estáticos (pendientes, rocas, suelos, entre otros), sino también en los procesos dinámicos de circulación del agua y en su variabilidad espacial (desde lo microscópico hasta lo macroscópico y lo global) y temporal (desde lo esporádico hasta lo crónico) (Lin, 2010).

Antecedentes sobre los estudios de inestabilidad de laderas en Veracruz

En Veracruz, las laderas potencialmente inestables cubren aproximadamente 25% de la superficie del estado (17,570 km²), lo que corresponde a las zonas montañosas (Sierra Madre Oriental, parte oriental del Cinturón Neovolcánico, la zona de Los Tuxtlas, estribaciones orientales de la Sierra Madre del Sur y septentrionales de las montañas de Chiapas) y de lomeríos (Geissert, 1999; Geissert y Enríquez, 2011).

Aunque ya existe un interesante cúmulo de observaciones sobre deslizamientos (por parte de la Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz, los institutos de Geología y Geografía de la UNAM y el Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana), pocos trabajos arbitrados han sido publicados en revistas y libros. Varias de estas publicaciones se enfocan en la tectónica (p. ej. Wassmer, Geissert, De Fraipont y Enríquez, 2004; Concha-Dímas, Cerca, Rodríguez y Watters, 2005; Carrasco-Núñez *et al.*, 2006) y en procesos catastróficos prehistóricos relacionados con la actividad volcánica del Pico de Orizaba o del Cofre de Perote.

Sobre la inestabilidad de laderas no derivada de la actividad volcánica, sólo se encontraron 12 artículos publicados entre 1993 y 2014, aunque la mayoría se relaciona con los colapsos de edificios volcánicos (p. ej. Rodríguez, Mora y Murrieta, 2006; Díaz, Carrasco y Álvarez, 2008; Legorreta *et al.*, 2014). En tanto, algunos libros o capítulos de libros abordan los temas de peligros, riesgos (p. ej. Rodríguez, Mora, Murrieta y Morales, 2011; Enríquez y Geissert, 2012; Geissert, 2004) y su cartografía (p. ej. el *Atlas estatal de riesgo* de la Secretaría de Protección Civil de Veracruz, de 2000, y el *Atlas de peligros geológicos e hidrometeorológicos del estado de Veracruz* de la Secretaría de Protección Civil de Veracruz, de 2010).

El objetivo de este trabajo es presentar algunos aspectos geomorfológicos, edáficos e hidrológicos locales relacionados con la inestabilidad de laderas en el centro del estado de Veracruz. A partir de estas observaciones se busca dar una explicación sobre los mecanismos causantes de los PRM y de la erosión del suelo.

Inestabilidad de laderas en el centro del estado de Veracruz: subcuenca del río Los Gavilanes

La subcuenca del río Los Gavilanes (41.3 km²) es tributaria de la cuenca alta del río La Antigua, está situada en la ladera barlovento del estratovolcán Cofre de Perote y pertenece a los municipios de Coatepec y Xico. Su clima es semicálido y húmedo en la porción baja (1,090-1,800 msnm), templado húmedo en la intermedia (1,800-2,400 msnm) y semifrío húmedo en la alta (2,400-2,960 msnm). El relieve se desarrolló sobre brechas y andesitas altamente intemperizadas. Se describe como un relieve suave, de colinas con cauces de poca incisión en la parte alta; laderas de pendiente fuerte, separadas por barrancas profundas en forma de “V” en la parte media; cerros bajos y lomeríos, separados por fondos de valles aluviales bien formados en la parte baja.

Los suelos dominantes de la subcuenca, desarrollados sobre andesita intemperizada y capas delgadas de cenizas, son de tipo andosol en la parte media y alta y tienen un gradiente de Cambisol-Acrisol en la parte baja. (Rossignol, Geissert, Campos y Kilian, 1987; Meza y Geissert, 2007). Con estas características se constituye la ZCT de la subcuenca. El uso del suelo consiste en un mosaico discontinuo de bosque mesófilo maduro, acahuales, bosque de pino y pino-oyamel, pastizales inducidos, matorral secundario, cafetales, asentamientos humanos, áreas agrícolas y huertas.

La hidroedafología es una disciplina derivada de la ciencia del suelo que puede contribuir significativamente al conocimiento de los mecanismos de la ZCT, los cuales provocan la inestabilidad de laderas.

El concepto unificador propuesto por Lin *et al.* (2006) es el flujo de agua en el paisaje (*landscape water flux*), el cual considera la fuente, el almacenamiento, el flujo, los recorridos, el tiempo de residencia, la disponibilidad y la distribución espacio-temporal del agua en la zona vadosa. Este concepto fue propuesto para integrar dominios hidroedáficos cartografiables.

En la subcuenca Los Gavilanes, cada unidad hidroedáfica funcional (UHF) fue definida por una categoría de flujo de agua, caracterizada por la profundidad de la capa impermeable y del nivel freático y por la conductividad hidráulica saturada de la capa menos permeable, con base en criterios tomados de los grupos hidrológicos

de suelos, como aparece en NRCS-USDA, 2007. (Figura 1). A cada UHF se le asignó un código alfanumérico tipo 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 3A, 3B, etc. Las UHF derivadas de andosoles cubren 79.5% de la subcuenca (3,282.54 ha), mientras que las derivadas de suelos no ándicos cubren 20.5% (845.36 ha). En consecuencia, el funcionamiento hidroedáfico de la subcuenca depende fundamentalmente de las propiedades hídras de los andosoles y del sustrato del cual derivan.

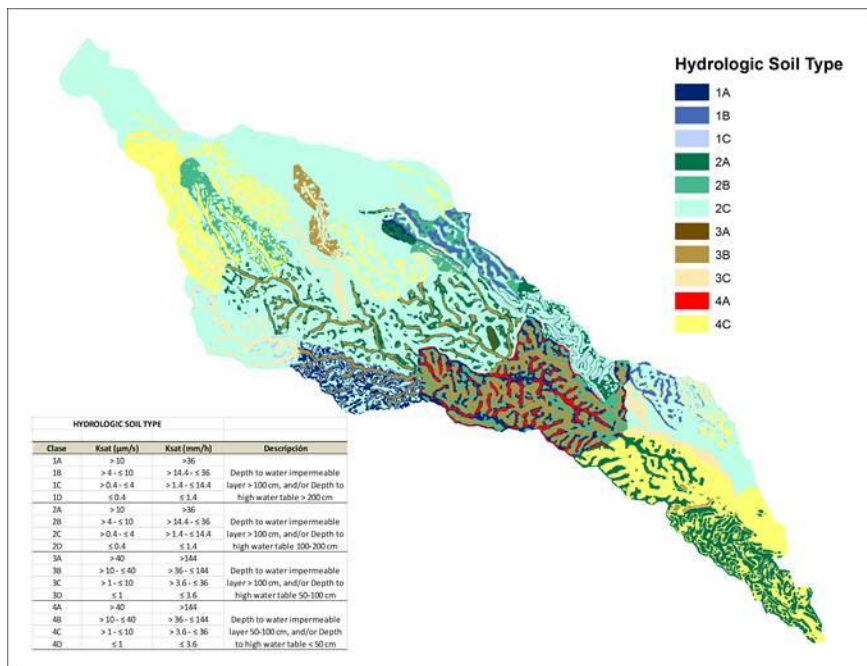


Figura 1. Unidades hidroedáficas funcionales de la subcuenca del río Los Gavilanes.

Las UHF de la clase 1 corresponden a suelos con buen drenaje, en donde el movimiento dominante del agua es vertical, insaturado y preferencial (a menudo rápido). Este movimiento se dirige hacia los mantos freáticos situados a más de dos metros de profundidad. Si existiera un horizonte menos permeable (variante 1C), podría formarse un nivel freático elevado estacional que indujera un flujo lateral a lo largo del contacto capa permeable/capa menos permeable o suelo/roca. El flujo de agua se produce en el sustrato volcánico

intemperizado y fracturado, posiblemente más por las fisuras que por la porosidad. La escorrentía superficial es muy poco probable en donde la conductividad hidráulica es elevada. Este tipo de unidad cubre 7.6% del área de la subcuenca.

Las UHF de la clase 2 también son de buen drenaje. El flujo vertical rápido a moderadamente rápido, insaturado o preferencial, mueve el agua hacia el sustrato subyacente o manto freático situado a menos de dos metros de profundidad (variantes 2A, 2B). Cuando se forma un nivel freático alto, el régimen hídrico dominante es de flujo lateral saturado en temporada de lluvias (variante 2C). En general, la escorrentía superficial es inexistente o poco probable debido a la alta capacidad de infiltración y de conductividad hidráulica. Las variantes 2A y 2B cubren 17.1% de la superficie de la subcuenca, mientras que la variante 2C abarca 45.5% del área.

Las UHF de la clase 3 se caracterizan por un buen drenaje, pero el movimiento descendiente e insaturado del agua ocurre a menor profundidad debido a la presencia de un horizonte (o capa de menor permeabilidad) y a la presencia de un manto freático, entre los 50 y 100 cm de profundidad, los cuales son alcanzados con mayor rapidez. En consecuencia, la respuesta del suelo es dominada por el flujo saturado lateral o sublateral, situado a una profundidad variable entre los 50 y 150 cm. Debido a las altas tasas de conductividad en 3A y 3B, la escorrentía superficial es poco probable, mientras que en 3C sí es posible debido a la reducción del drenaje. Dicha UHF, con sus tres variantes, cubre 12.4% de la subcuenca.

Las UHF de la clase 4 tienen una capa poco permeable de entre 50 y 100 cm de profundidad y/o un manto freático a menos de 50 cm. El flujo insaturado del agua se restringe a los primeros 20-30 cm del suelo y alcanza rápidamente al manto freático. La respuesta hidrológica del suelo es ampliamente dominada por el flujo lateral o sublateral saturado. La UHF con sus tres variantes (4A, 4B, 4C) cubre 17.4% de la subcuenca.

En la zona altitudinal de mayor precipitación (2,000-2,500 mm), la UHF 2C es dominante en los interfluvios, la ladera superior y la media (67.4% de la zona). El movimiento del agua en el suelo es vertical y profundo y ocurre en condiciones insaturadas. Sin embargo, el flujo se convierte en saturado y lateral de poca profundidad (UHF 3 y 4) en los pies de ladera (25.6% de los casos) y los talwegs (67.4% de los casos). El flujo base de los arroyos es controlado por los procesos

laterales de flujo saturado en la parte inferior de las laderas que los rodean. Cuando ocurren lluvias cuya intensidad y magnitud rebasan la capacidad de retención de agua de los suelos, los terrenos de esta zona se vuelven muy susceptibles a PRM.

En un estudio sobre deslizamientos, Cabrera (2011) evidenció que 64% de ellos se produjeron en la zona con precipitaciones de 2,400 a 2,800 mm/año y que 78% de los deslizamientos se produjeron sobre pendientes de 20 a 40°. Estos deslizamientos ocurrieron en materiales piroclásticos deleznable y suelos de tipo andosol. Como la subcuenca es un área principalmente rural, 64% de los deslizamientos sucedieron en sitios con bosque mesófilo y 32% en pastizales y matorrales. La mayoría de los deslizamiento (80%) fueron superficiales y de tamaño pequeño a mediano (Cuadro 1).

Cuadro 1. Número de deslizamientos en la subcuenca Los Gavilanes, según su profundidad y el tamaño de la corona.

		Tamaño de corona (m)		
		< 60	60-120	120-180
Profundidad (m)	<2	52	41	6
	2-10	5	3	1
	>10	4	4	0

A partir de la cartografía de las precipitaciones, las pendientes y los sitios de ocurrencia se elaboró un mapa de susceptibilidad a deslizamientos, a escala 1:20 000 (Figura 2). La susceptibilidad fue cuantificada en términos de densidad: baja (0-2 deslizamientos/10 km²), media (3-13 deslizamientos/10 km²) y alta (14-21 deslizamientos/10 km²).

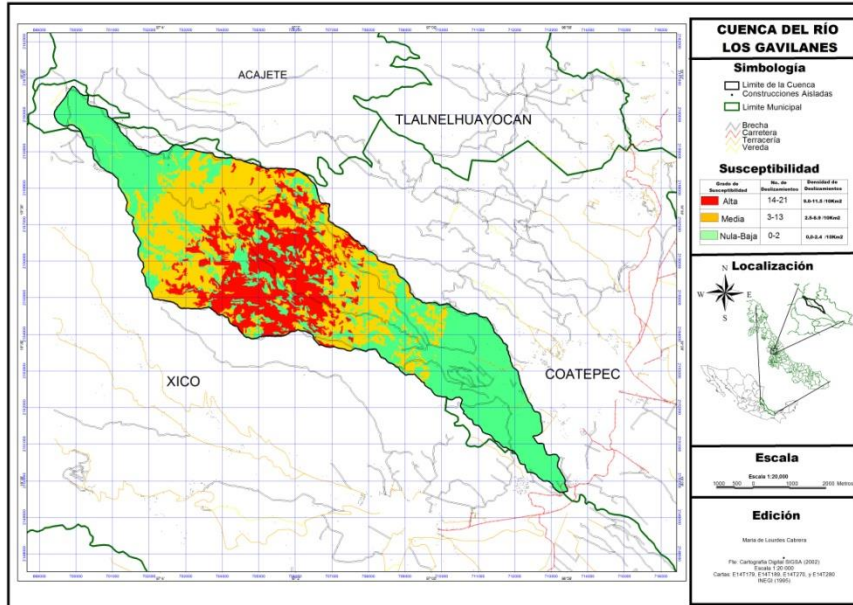


Figura 2. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca Los Gavilanes. Verde= baja, naranja= media y rojo= alta.

En un estudio sobre el contenido de humedad del suelo, entre mayo de 2009 y abril de 2010 (con precipitaciones de 3,281 mm/año y un acumulado de 77% entre mayo y octubre), Castro (2012) mostró que el grado de saturación de agua en los andosoles de bosques bajos es siempre superior a 80% vol. en el solum, esto en condiciones normales de precipitación, tanto en la estación lluviosa de verano como en la estación más seca de invierno.

Esta condición hídrica, propiciada por la alta capacidad de infiltración de los andosoles (que también tienen una alta capacidad de retención de agua), favorece los deslizamientos. El 25 de julio de 2010, en una microcuenca de bosque, de la zona central de la subcuenca Los Gavilanes, ocurrió un deslizamiento que se convirtió en flujo de escombros. El evento fue provocado por una precipitación que en 4 horas alcanzó los 117.1 mm y por una anterior que llegó hasta los 199.1 mm en seis días. La generación de escorrentía y el alto caudal pico en la corriente de primer orden fueron las causas del flujo de detritos. La escorrentía suministró agua a las masas de detritos ya acumuladas en el cauce, esto aumentó la presión de poros dentro del material, lo que a su vez inició el flujo en

el contacto con la capa menos permeable. La alta capacidad de infiltración del suelo y la inclinación, así como la forma y rugosidad de la pendiente de la microcuenca, determinaron la altura del caudal pico y, por ende, la presión máxima del fluido dentro de los escombros.

Las condiciones de inestabilidad de laderas en la subcuenca Los Gavilanes son similares a las que existen en las laderas ubicadas sobre formaciones volcánicas y de condiciones climáticas húmedas, localizadas en el centro de Veracruz y de Los Tuxtlas. Los deslizamientos superficiales son los más comunes en estas zonas. Si los suelos son poco profundos, los flujos de agua son controlados por la infiltración, la percolación no saturada del frente de humectación y la brusca elevación de niveles freáticos superficiales. Esto como respuesta a un evento de lluvia.

Las condiciones que favorecen el movimiento de los suelos poco profundos no dependen, necesariamente, de una presión de poro positiva a lo largo de la superficie de deslizamiento. El movimiento puede ocurrir a una profundidad crítica determinada por la cohesión del suelo y el ángulo de pendiente cuando el contenido de agua en el suelo se acerca a la saturación. Esto reduce considerablemente la cohesión y resistencia (Lida, 1999). Los deslizamientos profundos son provocados, en la mayoría de los casos, por la presión de poro positiva a lo largo del plano de deslizamiento, ocasionada por la elevación de niveles freáticos locales. Esto significa que los deslizamientos profundos requieren de mayores cantidades de agua que los superficiales para desencadenarse (Van Asch *et al.*, 1999).

Escorrentía y erosión del suelo en la subcuenca del río Los Gavilanes

La erosión hídrica no es un proceso peligroso en sí, pero causa problemas de gran magnitud en las cuencas hidrográficas, tanto en áreas rurales como urbanas, porque deteriora la calidad del suelo y del agua, provoca sedimentación e incrementa el riesgo de inundación. Este tipo de erosión se debe a los efectos adversos sobre la infiltración, la capacidad de retención de agua, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de materia orgánica, el espesor del suelo y la biota edáfica (Pimentel, 2000). México tiene una larga historia de erosión debido a la transformación de áreas forestales en campos agrícolas y pastizales.

En la subcuenca Los Gavilanes, Sánchez (2011) estimó la pérdida de suelo por erosión mediante el modelo RUSLE (Renard *et al.*, 1997) y encontró que la tasa de erosión actual es de 11.8 Mg/ha/año, valor considerablemente bajo para un terreno en gran parte escarpado. Las condiciones climáticas de esta subcuenca favorecen una cubierta vegetal boscosa bastante generalizada. En su mayoría, las áreas deforestadas fueron convertidas en pastizales o cafetales, poco propicios para generar escorrentía; sin embargo, si la cubierta vegetal actual no existiera y la escorrentía sólo dependiera de la lluvia, de las condiciones del suelo o de la pendiente, la pérdida potencial de suelo sería alta y superior a 200 Mg/ha/año (Cuadro 2).

La erosión actual es moderada y 97% de la superficie de la subcuenca se encuentra dentro de los límites de tolerancia de pérdida de suelo (<10 Mg/ha/año). En este caso, la cobertura vegetal es el factor determinante porque controla la erosión en las áreas con topografía accidentada y el suelo es el factor que mitiga la erosión de forma natural, por sus bajos valores de erodabilidad. Los usos de suelo que fomentan un mayor grado de erosión son el agrícola y el pecuario, por lo tanto, se deben implementar de forma prioritaria medidas de conservación del suelo en estos sistemas para evitar que la erosión se acelere y se generalice.

Cuadro 2. Tasas de erosión actual y potencial en la subcuenca Los Gavilanes.

Tasa (Mg/ha/año)	Erosión actual (% superficie)	Erosión potencial (% superficie)
0 – <10	91.8	0.0
10 – <50	7.9	11.6
50 – 200	0.3	0.3
> 200	0.0	88.1

Por las condiciones del entorno se recomienda privilegiar los usos forestales y agroforestales para garantizar una mayor estabilidad de las laderas de la subcuenca, tanto para mitigar los procesos erosivos como los de remoción en masa. En los terrenos destinados a los usos agrícolas y pecuarios, las estrategias de conservación de suelos y agua dependerán del factor topográfico. La implementación de cultivos en contornos, fajas y terrazas es eficaz para pendientes leves y moderadas, mientras que en pendientes pronunciadas se

recomienda el cambio de uso de suelo a forestal, combinado con prácticas de conservación en los sitios requeridos.

Conclusión

La inestabilidad de laderas es un problema general. Abarca desde áreas de alta montaña hasta zonas costeras (tanto en zonas muy húmedas como secas) y desde áreas sujetas a terremotos y erupciones volcánicas hasta áreas tectónicamente inactivas. Los procesos de ladera, los erosivos, de remoción en masa y de hundimientos son naturales y no pueden evitarse, pero muchos son inducidos por las actividades humanas y la mala planeación del uso de la tierra. Por ello se requieren estudios multidisciplinarios para mitigar los efectos negativos de estos procesos y reducir los riesgos que pueden presentar; asimismo es necesaria una estrecha colaboración entre las instituciones académicas, de gobierno y de la sociedad civil.

En el estado de Veracruz es necesario promover la investigación sobre la inestabilidad de laderas; integrar la ciencia y la tecnología en el marco cultural y social para evaluar el riesgo de inestabilidad de laderas en áreas urbanas y rurales; así como contribuir a la protección del medio ambiente natural y transformado. Para lograrlo habría que trabajar con expertos nacionales e internacionales en la evaluación de los riesgos, de la mitigación y de la restauración. Asimismo, en el desarrollo de un programa de acción concertado, multidisciplinario y multi-institucional.

Referencias

- Cabrera, L. (2011). Los deslizamientos: zonificación de la susceptibilidad y del grado de peligro en la cuenca del río Los Gavilanes, municipios de Coatepec y Xico, Veracruz, México (Tesis de licenciatura). Facultad de Economía de la Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver.
- Carrasco-Núñez, G., Díaz-Castellón, R., Siebert, L., Hubbard, B., Sheridan, M.F. y Rodríguez, S. R. (2006). Multiple edifice-collapse events in the Eastern Mexican Volcanic Belt: The role of sloping substrate and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158, 151-176.
- Castro, A. A. (2012). Variación temporal del contenido de humedad en un bosque mesófilo de montaña, en Coatepec, Veracruz (Tesis de maestría). Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, Ver.
- Concha-Dimas, A., Cerca, M., Rodríguez, S.R. y Watters, R. J. (2005). Geomorphological evidence of the influence of pre-volcanic basement

structure on emplacement and deformation of volcanic edifices at the Cofre de Perote–Pico de Orizaba chain and implications for avalanche generation. *Geomorphology*, 72, 19-39.

- Díaz, R., Carrasco, G. y Álvarez-Manilla, A. (2008). Mechanical instability quantification of slopes at Cofre de Perote volcano, eastern Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 60(2), 187-201.
- Enríquez, E. y Geissert, D. (2012). Riesgos naturales en una zona rural de la cuenca alta del río La Antigua. En S. E. Silva Gómez y M. R. Parra Vázquez (Coord.). *Patrimonio cultural y natural desde los enfoques de la sustentabilidad y del saber local*. pp. 93-119. México, D.F.: Asociación Mexicana de Estudios Rurales (AMER-UNAM), Casa abierta al tiempo (UAM-Xochimilco).
- Geissert, D. (2004). La Geomorfología. En S. Guevara, J. Laborde y G. Sánchez-Ríos (Eds.). *Los Tuxtlas. El paisaje de la sierra*. pp. 159-178. Parte 2. México: Unión Europea-INECOL.
- Geissert D. (1999). Regionalización geomorfológica del estado de Veracruz. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 40, 23-47.
- Geissert D. y Enríquez, E. (2011). Geomorfología. En Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). *La Biodiversidad en Veracruz: Estudio de Estado*, vol. I, (pp. 53-68) y Apéndice I. 1. México: CONABIO, Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, A.C.
- Lida T., (1999). A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landsliding due to rainstorms. *Catena*, 34, 293-313.
- Legorreta, G., Bursik, M., Solene, P., Lugo, J., Paredes, L.M. y Aceves, F. (2014). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66 (2), 343-354.
- Lin, H. (2010). Earth's Critical Zone and hydrogeology: concepts, characteristics, and advances. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 25-45.
- Lin, H., Bouma, J., Pachepsky, Y., Western, A., Thompson, J., Van Genuchten, R., Vogel, H. y Lilly, A. (2006). Hydrogeology: synergistic integration of pedology and hydrology. *Water Resources Research*, 42, 1-13.
- Meza, E. y Geissert, D. (2007). El comportamiento hidrodinámico de Andosoles con uso diferenciado en el municipio de Coatepec, Estado de Veracruz, México (Reporte Técnico Final del proyecto No. INE/A1-064/2007, pp. 118-130). Xalapa, Ver.: Instituto de Ecología, A.C.-Vrije Universiteit Amsterdam- Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- National Research Council. (2001). *Basic research opportunities in the earth sciences*. Washington, D. C.: National Academy Press.
- NRCS-USDA. (2007). Hydrologic Soil Groups. En *National Engineering Handbook (Part630)*. USA: Autor. Recuperado de <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch7.pdf>

- Pimentel, D. (2000). Soil Erosion and the threat to food security and the environment. *Ecosyst. Health*, 6 (4), 221–226.
- Renard, K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K. y Yoder D. C. (Coord.). (1997). Predicting Soil Erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss equation (RUSLE). En U.S. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook*, 703.
- Rodríguez, S.R., Mora-González, I. y Murrieta-Hernández, J.L. (2006). Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana [Número Especial de Geología Urbana]*, 58(2), 223-236.
- Rodríguez, S.R., Mora, I., Murrieta, J.L. y Morales, W.V. (2011). Peligros geológicos más frecuentes en el estado de Veracruz. Xalapa, Ver.: Universidad Veracruzana.
- Rossignol, J-P., Geissert, D., Campos, A. y Kilian, J. (1987). Mapa de unidades morfoedafológicas del área Xalapa-Coatepec, escala 1:75 000. Xalapa, Ver.: INIREB-ORSTOM-CIRAD.
- Sánchez S., S. (2011). Estrategias de conservación de los recursos suelo y agua mediante un modelo de predicción de la erosión (RUSLE), en la microcuenca de montaña “Los Gavilanes”, municipio de Coatepec, Veracruz. Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, Ver.
- Van Asch, Th.W.J., Buma, J. y Van Beek, L.P.H. (1999). A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology*, 30, 25-32.
- Wassmer, P., Geissert, D., De Fraipont, N. y Enríquez-Fernández, E. (2004). Morphological evolution of La Concepción valley by huge mass movements on plateau edges in the eastern part of the Mexican Volcanic Belt (Xalapa, Veracruz, Mexico). *Acta Vulcanológica*, 16(1-2), 125-132.

CAPÍTULO 9

Cambio Global Forestal y Veracruz: hacia la cuantificación de una variable que influye en la estabilidad de laderas

Andrés de la Rosa Portilla y Juan Carlos Olivo Escudero
Secretaría de Medio Ambiente, Gobierno del Estado de Veracruz

Resumen

La ausencia de una metodología consensuada para monitorear la degradación, conservación, aumento y disminución de los recursos forestales ha limitado la identificación de laderas con poco o nulo arbolado, vulnerables a los procesos de remoción en masa (PRM). Con base en el análisis global de los recursos forestales del planeta que efectuó el estudio Cambio Forestal Global 2013 (GFC por su siglas en inglés), realizamos un análisis preliminar de la dinámica de pérdida y ganancia forestal en diversas regiones naturales y sociopolíticas del estado de Veracruz. Durante 2013, encontramos que 80% de los PRM ocurrió en zonas con porcentaje de dosel arbóreo bajo (0-60% de cobertura), mientras que 20% aconteció en zonas de dosel alto o muy alto (60-100% de cobertura). Los resultados y la metodología de este análisis presentan una oportunidad para la identificación de áreas vulnerables a PRM, así como para el manejo de los recursos naturales en el estado de Veracruz.

Palabras clave: Veracruz, Global Forest Change, pérdida forestal, ganancia forestal, porcentaje de dosel.

Introducción

La riqueza de la vegetación del estado de Veracruz es el resultado evolutivo de la interacción de múltiples factores como los edáficos, climáticos, eólicos, topográficos y el contexto biogeográfico (Ellis y Martínez, 2010). La vegetación es un factor relevante en el fenómeno de remoción en masa, específicamente en la estabilidad de ladera, además influye de varias formas: intercepta la precipitación en sus ramas y hojas, retiene agua en sus raíces y permite que escurra una menor cantidad de agua, lo cual reduce la erosión, escorrentía y la velocidad de los ríos y arroyos; además, las raíces retienen el suelo y evitan su desprendimiento (CENAPRED, 2014).

¿Cuánta vegetación existe?, ¿en dónde está presente?, ¿cuánto se pierde?, ¿cuánto se gana?, ¿en dónde se pierde y gana? Son preguntas realizadas de manera constante, y se han respondido de modo unilateral desde el servicio público, la academia o la sociedad. La publicación del estudio Cambio Forestal Global 2013 (GFC por sus siglas en inglés) muestra una metodología y un mapa aceptados por la comunidad científica que permite obtener datos puntuales del periodo 2000-2012 sobre la ganancia, pérdida y estado de los recursos forestales del planeta (Hansen *et al.*, 2013). En el presente documento se hace un análisis preliminar del cambio forestal de las regiones políticas (tres macroregiones y 10 regiones) y de las regiones naturales (cuencas y áreas naturales protegidas) del estado de Veracruz. El GFC hace énfasis especial en la importancia de las cuencas hidrográficas. Los datos acerca de esto contribuirán específicamente al apartado “1.1.4. Eje estratégico” de la *Estrategia para la conservación y uso sustentable de la biodiversidad del estado de Veracruz* (CONABIO, 2013), aquél plantea un programa de monitoreo para analizar los cambios de uso de suelo que se especifican. Con esto se pueden priorizar zonas con remanentes de vegetación en las cuales, por sus características morfométricas y edafoclimáticas, pudiesen ocurrir procesos de remoción en masa (PRM).

Cambio Global Forestal 2000-2012, una síntesis

Hansen *et al.* (2013) publicaron los primeros datos mundiales de la ganancia y pérdida forestal en un periodo de 12 años (2000-2012), basados en imágenes del satélite Landsat 7 de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA por sus siglas en

inglés). Este estudio manifiesta que las imágenes contenidas en Google Earth™ y Google Map™ pueden utilizarse para hacer análisis detallados de la cobertura forestal del planeta. En el estudio fueron cartografiados 2.3 millones de km² de la Tierra para definir la cubierta arbórea en 2000 (base del estudio), así como el porcentaje de dosel de toda la vegetación mayor a 5 m de altura.

La pérdida de bosques del periodo 2000-2012, se definió como una perturbación o cambio de un bosque a otro estado, no forestal, mientras que la ganancia forestal del mismo periodo, se definió como el paso de un estado no forestal a bosque. Los resultados más sobresalientes de dicho estudio pueden resumirse de la siguiente forma:

- La pérdida global de bosques ascendió a 2.3 millones de km² y la ganancia a 0.8 millones de km².
- Las tasas de pérdida de bosques en países como Indonesia, Malasia, Tanzania, Angola, Perú y Paraguay dieron lugar a una tendencia, estadísticamente significativa, en el aumento de la pérdida de bosque tropical.
- Los bosques del Chaco de Bolivia, Paraguay y Argentina están bajo intensa presión de desarrollo agroindustrial; los primeros han experimentado una rápida deforestación debido al desarrollo de ranchos ganaderos.
- La pérdida de bosques tropicales aumentó con una media de 2.1 km² por año durante el período de estudio.
- En la última década, la pérdida anual de bosques se redujo en promedio a 1.3 km²/año en la selva de Brasil.
- Rusia tiene la mayor pérdida de bosques a nivel mundial.
- Las áreas de pérdida y ganancia sobrepuestas indican las prácticas forestales intensivas en todos los continentes con un clima subtropical dominante, entre ellas, Sudáfrica, Chile central, el sudeste de Brasil, Uruguay, el sur de China, Australia y Nueva Zelanda.
- Los Bosques subtropicales de América del Norte, específicamente del sudeste de los Estados Unidos, son únicos en cuanto a su dinámica de cambio, debido al corto ciclo de aprovechamiento y plantación de árboles. La tasa de perturbación de esta ecozona era cuatro veces mayor que en

las selvas tropicales de América del Sur durante el período de estudio, ya que 31% más de su cobertura forestal se perdió o volvió a crecer debido al aprovechamiento sustentable de los recursos forestales (plantaciones forestales comerciales).

Los resultados del GFC permiten responder a las preguntas hechas anteriormente y establecer una plataforma de monitoreo de los recursos forestales del planeta, lo cual permitirá establecer tendencias y estrategias para tomar mejores decisiones sobre las acciones que generan pérdida y ganancia de los recursos forestales (Hansen *et al.*, 2013).

Análisis preliminar de Veracruz en el marco del Cambio Global Forestal

Para analizar la dinámica de pérdida y ganancia forestal del estado de Veracruz, con los datos del GFC, fue necesario descargar 15 gb de información que incluían datos de ganancia, pérdida, cubierta forestal y porcentaje de dosel superior a los 5 m de altura. Una vez recortados los datos del estado de Veracruz se hicieron geoprocesamientos con 2.5 gb de capas. La pérdida y ganancia neta obtenida, se refiere a la superficie forestal total ganada y perdida en el periodo del estudio (2000-2012), en el entendido de que si restamos a lo perdido lo ganado, obtendremos la pérdida forestal real para dicho periodo. De igual forma se puede estimar la superficie perdida y ganada de manera anual al dividir la superficie forestal neta entre los años (12) del periodo de estudio, lo que nos permite obtener valores más concretos y que pueden asociarse a fenómenos climáticos, acciones concretas o políticas implementadas en el año respectivo.

Para realizar el análisis de los datos a través de las macroregiones y regiones del *Plan veracruzano de desarrollo* (Gobierno del Estado de Veracruz, 2011) fue necesario obtener los datos del Marco Geoestadístico Nacional (MGN) más reciente, diseñado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013). Para el caso se utilizó información cartográfica de la red hidrográfica de las cuencas, escala 1:50 000 (INEGI, 2010), la cual corresponde a datos de corrientes de agua, cuerpos de agua, flujos intermitentes, canales, manantiales, áreas urbanas y al conjunto nacional de curvas de nivel, entre escalas 1:250 000 y 1:20 000, asimismo, contiene datos vectoriales de circulación lineal que modela el drenaje de la cuenca.

También se consideraron los polígonos de las áreas naturales protegidas (ANP) estatales, definidas como “las zonas del territorio nacional en donde los ambientes no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas”, como aparece en el artículo 3, fracción II, de la *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* (Diario Oficial de la Federación, 1988).

Las ANP están sujetas al régimen previsto por la misma legislación con el objetivo de obtener datos sobre su efectividad, ya que éstas representan un instrumento relevante para la protección de recursos naturales; ello, a su vez, en concordancia con la planeación de recursos naturales del estado de Veracruz, en la cual se proponen acciones estratégicas efectivas a través de la ampliación y decreto de nuevas ANP. El fin es mantener la cobertura actual de vegetación primaria y restaurar la vegetación secundaria, y así permitir la conectividad entre los ecosistemas (CONABIO, 2013).

Por último, se analizó el porcentaje del dosel arbóreo de las imágenes satelitales de 2000 (año base del GFC), el cual expresa la calidad en cobertura de copa de los recursos forestales. Este porcentaje fue intersectado con los puntos georreferenciados de los PRM ocurridos en 2013 (SEPC, 2014), lo que nos permitió identificar la relación de la calidad del arbolado, con respecto a su densidad de copa, y la presencia de los PRM.

Los resultados en el estado de Veracruz arrojaron una ganancia forestal neta de 90,635 ha y una pérdida forestal neta de 272,416 ha, ambas en el periodo 2000-2012 para todo el estado. En la figura 1 se puede apreciar la pérdida anual y acumulada en este periodo, en ésta destaca que en el periodo 2004-2005 se registró la pérdida más alta y en el periodo 2011-2012, la pérdida más baja.

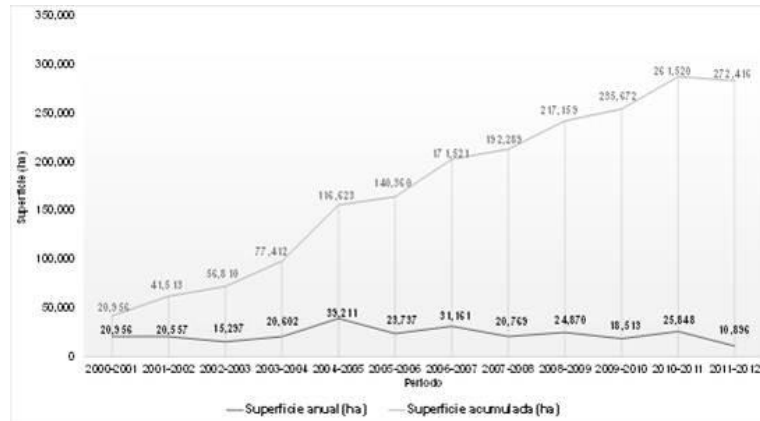


Figura 1. Pérdida anual y acumulada de la superficie forestal en el estado de Veracruz durante el periodo 2000-2012.

Si comparamos la pérdida forestal anual neta estimada de 22,701 ha (total de pérdida entre el número de años) del GFC para el estado de Veracruz, con la calculada por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), que registró, en la misma entidad, una pérdida anual neta estimada de 31,356 ha (CONAFOR, 2005), se puede apreciar una diferencia a la baja de 27% (8,655 ha). La cifra del GFC podría haber sido mayor que la reportada por CONAFOR, ya que la primera presenta los datos con mayor detalle a una escala aproximada 1:100 000 y la segunda a una escala 1:250 000.

Con respecto del GFC, el primer análisis de pérdida y ganancia forestal se basó en el *Plan veracruzano de desarrollo 2011-2016* (2011), el cual establece tres macroregiones: la norte, que abarca las regiones Huasteca Alta, Huasteca Baja y Totonaca; la centro, que incluye Nautla, Xalapa, Las Montañas y Sotavento y la sur, que comprende las regiones de Papaloapan, Los Tuxtlas y la Olmeca. Los resultados obtenidos destacan a la macroregión sur como la que más recursos forestales perdió en el periodo del estudio (46% de pérdida) y la centro, como la que menos perdió (9% de pérdida).

En el análisis de pérdida forestal (Cuadro 1) realizado en la región del *Plan veracruzano de desarrollo*, resalta la Olmeca con 36% y Los Tuxtlas con una pérdida menor, de apenas 2%. En la ganancia forestal (Cuadro 2), destaca la Huasteca Alta con 31% y la región de Las Montañas, la que menos ganó, con 1%.

Cuadro 1. Superficie forestal perdida por región en el estado de Veracruz durante el periodo 2000-2012.

Región	Superficie perdida (ha)	%	Superficie anual (ha)
Olmeca	97,988	36	8,166
Huasteca Alta	69,704	26	5,809
Huasteca Baja	37,747	14	3,146
Papaloapan	23,057	8	1,921
Totonaca	15,187	6	1,266
Nautla	7,880	3	657
Sotavento	6,058	2	505
Capital	5,400	2	450
Las Montañas	5,186	2	432
Los Tuxtlas	4,208	1	351
Total general	272,416	100	22,701

Cuadro 2. Superficie forestal ganada por región en el estado de Veracruz durante el periodo 2000-2012.

Región	Superficie ganada (ha)	%	Superficie anual (ha)
Huasteca Alta	27,667	30	2,306
Olmeca	25,421	28	2,118
Huasteca Baja	10,918	12	910
Totonaca	7,956	9	663
Papaloapan	7,837	9	653
Sotavento	4,719	5	393
Los Tuxtlas	2,318	3	193
Capital	1,737	2	145
Nautla	1,237	1	103
Las Montañas	824	1	69
Total general	90,635	100	7,553

También se efectuó un análisis a escala de la dinámica forestal de las cuencas hidrográficas, considerando que se trata de un sistema integral en el que no sólo intervienen los cuerpos de agua y las corrientes superficiales, sino también el suelo, la vegetación y las actividades humanas que repercuten en la cuenca; entendida ésta como una delimitación natural del territorio y que puede llegar a dividirse en microcuencas. Además, en este espacio ocurren las interacciones más fuertes entre el uso y manejo de los recursos naturales (acción antrópica) y el comportamiento de éstos como reacción al ambiente (FAO, 2010). Por eso, el uso de la tierra en la

cuenca incide en el régimen hídrico y en la calidad del agua río abajo. Por otro lado, la deforestación impacta directamente en la tasa de infiltración y recarga de acuíferos (FAO, 2007). Éstos en conjunto con otros factores de orden geológico (tipo y estado de roca) y morfométrico (formas del territorio), además de las precipitaciones intensas, entre otros, pueden combinarse y dar pie a deslizamientos en laderas. Cabe señalar que la superficie forestal ganada y perdida no fue ponderada con la superficie de las cuencas.

Los resultados obtenidos arrojaron como dato relevante que la mayor pérdida se localiza en la cuenca del río Coatzacoalcos con 23% y la menor pérdida en la cuenca del río Atoyac, con apenas 0.04% (Cuadro 3).

Cuadro 3. Pérdida anual acumulada de la superficie forestal por cuenca durante los años 2000-2012 en el estado de Veracruz.

Cuenca	Superficie (ha)	Superficie (ha) anual	%
Coatzacoalcos	62,648	5,221	23
Pánuco	43,934	3,661	16
Papaloapan	43,207	3,601	16
Tonalá	22,909	1,909	8
Tuxpan	21,698	1,808	8
Laguna de Tamiahua	20,666	1,722	8
Moctezuma	20,386	1,699	7
Jamapa y otros	11,783	982	4
Nautla y otros	9,790	816	4
Cazones	8,452	704	3
Tecolutla	6,846	571	2.9
Atoyac	98	8	0.1
Total	272,416	22,701	100

Además, los resultados de ganancia forestal destacan en la cuenca del río Pánuco con 20%, en contraste con la cuenca del río Atoyac, con apenas 0.3% de ganancia (Cuadro 4).

Cuadro 4. Ganancia acumulada de la superficie forestal por cuenca en los años 2000-2012 en el estado de Veracruz.

Cuenca	Superficie (ha)	Superficie anual (ha)	%
Pánuco	18,108	1,509	20
Coatzacoalcos	17,998	1,500	20
Papaloapan	17,173	1,431	19
Moctezuma	6,991	583	8
Laguna de Tamiahua	6,696	558	7
Cazones	6,187	516	7
Tuxpan	5,977	498	7
Jamapa y otros	4,742	395	5
Nautla y otros	2,188	182	2
Tecolutla	2,181	182	2
Tonalá	2,080	173	2
Atoyac	314	26	1
Total	90,635	7,553	100

Cabe señalar que en el análisis resaltan los resultados anuales de pérdida forestal del periodo 2004-2005, durante el cual las cuencas de los ríos Coatzacoalcos, Pánuco y Papaloapan registraron las cifras más altas de pérdida forestal en todo el periodo de estudio (Cuadro 5).

Cuadro 5. Pérdida de la superficie forestal por cuenca hidrográfica durante el periodo 2000-2012.

Cuenca/Periodo	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	Total
Coatzacoalcos	5,591	6,082	4,562	3,569	12,164	3,214	9,102	4,194	4,523	2,612	5,392	1,642	62,648
Pánuco	5,468	2,101	1,780	4,749	6,342	4,622	5,105	3,070	3,355	2,314	3,190	1,838	43,934
Papaloapan	3,000	3,806	2,561	1,881	5,879	3,745	3,381	4,253	4,232	2,663	5,797	2,007	43,207
Tonalá	1,044	1,935	1,226	1,935	3,432	1,319	3,639	1,846	2,269	1,179	2,577	508	22,909
Tuxpan	1,287	1,426	876	1,821	1,999	2,706	2,600	1,458	2,474	2,167	1,677	1,209	21,698
Laguna de Tamiahua	1,553	1,855	1,510	1,994	2,640	1,758	1,524	1,890	1,883	1,826	1,470	761	20,666
Moctezuma	1,329	1,286	819	2,211	1,582	2,707	2,037	1,367	1,489	1,604	2,726	1,228	20,386
Jamapa y otros	382	367	902	426	3,516	701	694	1,232	1,370	733	1,016	444	11,783
Nautla y otros	347	681	400	603	653	1,272	1,090	553	1,322	1,536	808	524	9,790
Cazones	594	624	426	612	519	969	1,021	560	1,143	879	699	406	8,452
Tecolutla	357	384	229	796	478	718	958	337	792	992	488	317	6,846
Atoyac	4	8	4	4	7	7	11	9	17	7	9	11	98
Total	20,956	20,557	15,297	20,602	39,211	23,737	31,161	20,769	24,870	18,513	25,848	10,896	272,416

Debido a la escala utilizada para los análisis (1:100 000), no es posible mostrar con precisión las zonas en donde han ocurrido las pérdidas y ganancias forestales durante 2000-2012 en los municipios; sin embargo, sí es posible cuantificar, de manera general, el

comportamiento de dichos conceptos en este territorio político. Para el caso de ganancia forestal, entre los municipios que presentaron las mayores cifras en el periodo 2000-2012, se identificaron: Pánuco con 7,543 ha, Ozuluama de Mascareñas con 5,069 ha y Tempoal con 4,321 ha.

Asimismo, el análisis arroja que los municipios en donde se presentó la mayor pérdida forestal, en el periodo 2000-2012, son Las Choapas con 31,347 ha, Ozuluama de Mascareñas con 17,739 ha y Tantoyuca con 16,491 ha.

Con respecto de las ANP estatales, se llevó a cabo el análisis de la pérdida y ganancia forestal en el periodo indicado. En este tema, la Secretaría de Medio Ambiente del estado de Veracruz (SEDEMA) ha promovido los Espacios Naturales Protegidos (ENP) y actualmente el estado cuenta con 20 ANP estatales, 424 Áreas Privadas de Conservación (APC), seis ANP federales y nueve sitios Ramsar (Figura 2).

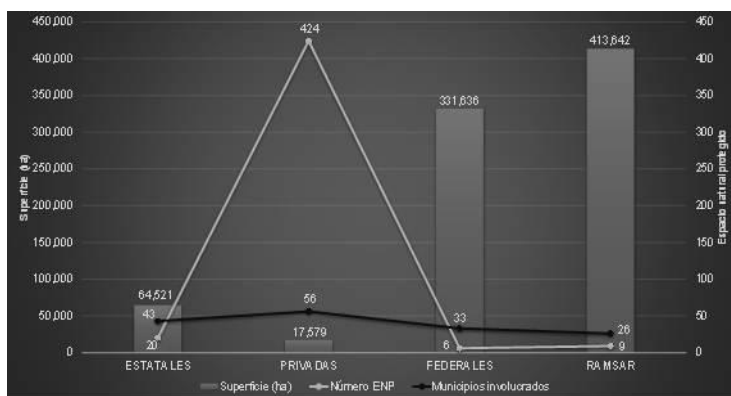


Figura 2. Áreas naturales protegidas del estado de Veracruz hasta el mes de septiembre de 2014 (SEDEMA, 2014).

El análisis arroja que en las ANP estatales se registró una pérdida forestal de 722 ha, lo que representa 0.2% de la pérdida estatal en la cual el río Filobobos y su entorno fueron los que más superficie arbolada perdieron (510 ha). Por otro lado, la ganancia forestal de las ANP fue de 82 ha, lo cual representa 0.09% de la ganancia estatal.

En cuanto al análisis realizado sobre la pérdida forestal y los datos del *Uso del suelo y vegetación* de INEGI (2013), se encontró que la

transformación de superficie arbolada a ganadera asciende a 52%, a agrícola, 24%, y que la degradación de zonas forestales asciende a 23% del total de la superficie perdida de 2000-2012 (Figura 3).

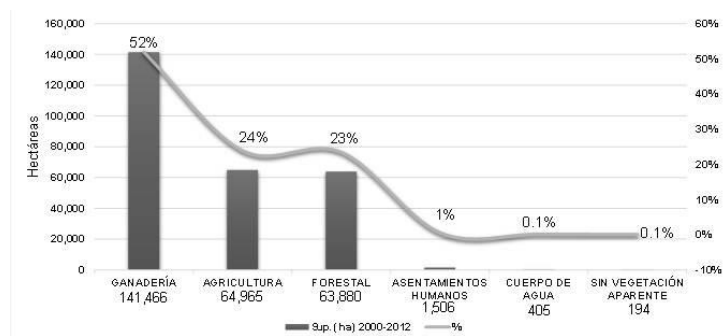


Figura 3. Transformación de zonas arboladas a otros usos del suelo.

Con respecto de la calidad de la cubierta arbórea, representada por el porcentaje de dosel (Figura 4), se registró 80-100% en el estado de Veracruz; en las zonas conservadas, 60-80% representa zonas arboladas con alteraciones y el resto, 0-60%, zonas muy fragmentadas o prácticamente desprovistas de arbolado.

Este análisis de porcentaje de dosel resultó estratégico para contrastarlo en territorios donde se presentaron PRM en 2013 (Figura 5), ya que permitió identificar que 50% de estos PRM ocurrieron en sitios con dosel de 0-14% (prácticamente sin arbolado); 24% en lugares con dosel de 14-60% (arbolado muy pobre o muy fragmentado); sólo 10% aconteció en sitios con 60-80% de dosel (arbolado fragmentado) y otro 10% en lugares con dosel de 80-100% (arbolado conservado). Lo que indica una relación entre la calidad de los recursos forestales (porcentaje de dosel) y los PRM ocurridos en 2013.

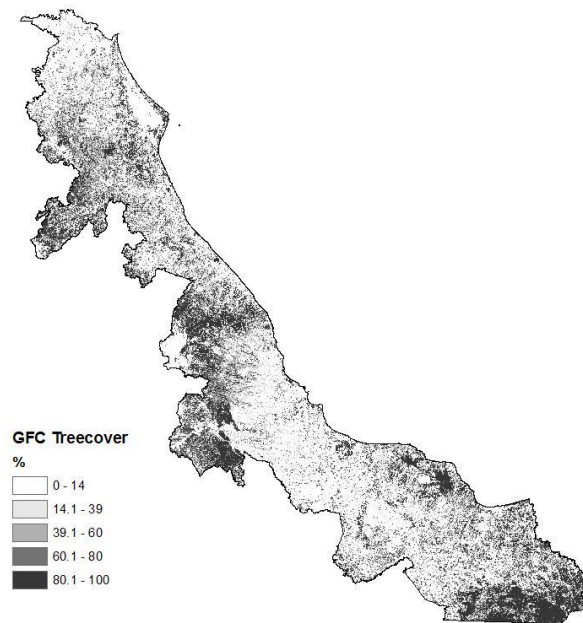


Figura 4. Porcentaje de cobertura de dosel para el estado de Veracruz.

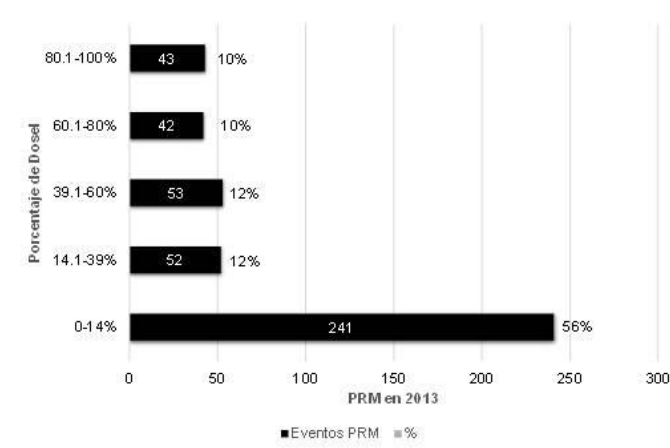


Figura 5. Eventos de procesos de remoción en masa (PRM) durante el 2013 en diversos porcentajes de cobertura de dosel.

La estabilidad de laderas en el contexto de la pérdida forestal en Veracruz

Aun cuando se trata de una exploración preliminar de la dinámica de pérdida y ganancia forestal en el estado, se lograron identificar patrones generales que sugieren una relación entre la calidad del arbolado (porcentaje de dosel) y la ocurrencia de PRM en 2013.

Influencia de la vegetación en la estabilidad de laderas

Los datos obtenidos indican que del total de PRM de 2013, georreferenciados por el Sistema Estatal de Protección Civil (SEPC), 241 (56%) ocurrieron, mayormente, en zonas donde el arbolado es casi nulo (muy poco porcentaje de densidad de dosel), 147 (34%) en donde existe poco arbolado o se encuentra fragmentado y sólo 10% en territorios con arbolado conservado (alto porcentaje de dosel). Esto sugiere una relación entre la calidad del porcentaje de dosel y la ocurrencia de PRM en 2013.

Por otro lado, resulta sorprendente que en la cuenca del río Nautla, en donde sólo se registró 4% de la pérdida forestal estatal, se presentó el mayor número de deslizamientos, 150 (19%) de 789 en 2013 (SEPC, 2014). Ante estos casos es importante realizar investigaciones que incluyan otros factores, a fin de comprender el estado de dicha cuenca y su relación con la presencia de los PRM. En el caso específico de la cuenca del río Nautla, históricamente, diversos procesos antropogénicos de cambio de uso del suelo han impactado la vegetación y dejado muy poco arbolado que pueda ser deforestado. Es necesario, entonces, no sólo considerar la dinámica de la vegetación de las cuencas durante un periodo, sino también el tipo de uso de suelo anterior a los PRM, así como la morfometría del territorio y las precipitaciones anuales, entre otros factores.

Conclusiones

Los resultados obtenidos coadyuvan a contextualizar los PRM de 2013 en el marco del territorio veracruzano, así como su interacción con las zonas arboladas y su calidad con respecto del porcentaje de dosel, sin embargo, es necesario establecer, de manera detallada, los siguientes cuestionamientos: ¿en dónde ocurre la pérdida forestal?, ¿en qué tipo de uso de suelo ocurren y qué elementos de la

morfometría de la zona influyen? Esto con el fin de identificar las laderas que hoy han quedado desprovistas de vegetación y que en un futuro podrían presentar PRM que ponga en riesgo a la población.

Referencias

- CENAPRED. (2014). El clima en la inestabilidad de laderas. La época de lluvias. México: Autor.
- CONABIO. (2013). Estrategia para la conservación y uso sustentable de la biodiversidad del estado de Veracruz. México: Autor.
- CONAFOR. (2005). Dinámica de cambio de la cobertura forestal 1993-2002 en Veracruz. Xalapa, Veracruz, México: Autor.
- Diario Oficial de la Federación. (1988). Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. México, D.F. Recuperado de http://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/protocolo/LGE_EPA.pdf
- Ellis, E.A. y Martínez, M. (2010). Vegetación y uso de suelo de Veracruz. En Comisión para la Conmemoración del Bicentenario de la Independencia Nacional y del Centenario de la Revolución Mexicana. (Eds.). Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural del estado de Veracruz (Tomo 1, Patrimonio Natural, pp. 203-226). Xalapa, Veracruz, México: Gobierno del estado de Veracruz.
- FAO. (2007). La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas. Roma, Italia: Autor.
- FAO. (2010). La microcuenca como ámbito de planificación de los recursos naturales. Recuperado de <http://www.fao.org/climatechange/30329-07fbeat2365b50c707fe5ed283868f23d.pdf>
- Gobierno del Estado de Veracruz. (2011). Plan veracruzano de desarrollo 2011-2016. Xalapa, Veracruz, México: Autor.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342, 850-853.
- INEGI. (2010). Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica escala 1:50 000, Edición 2.0. México, DF: Dirección General de Geografía y Medio Ambiente.
- INEGI. (2013). Marco geoestadístico 2013. Versión 6. México: Autor. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx
- SEDEMA. (10 de enero de 2014). Espacios Naturales Protegidos. Recuperado de <http://www.veracruz.gob.mx/medioambiente/servicio/anps/>
- SEPC (2014). La gestión del riesgo por deslizamientos de laderas en el estado de Veracruz, durante el 2013. Xalapa, Veracruz, México: Autor.

CAPÍTULO 10

Rehabilitación de laderas a orilla de carreteras en México

Noel Riaño Ramírez

Ingeniería para el Manejo, Restauración y Conservación de Ecosistemas S. de R. L. de C. V.

Resumen

Las carreteras son las venas de la sociedad, por ellas circulan las personas y los productos que se requieren para su desarrollo. Según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en México existe una alta dependencia del transporte carretero porque a través de los 374,000 km de carreteras distribuidas y pavimentadas con diferentes materiales se mueve 55% de la carga y 96% de los pasajeros. Independientemente de las características de las carreteras, tanto ubicación y dimensiones, su construcción siempre causará un impacto en el medio ambiente, particularmente en la configuración del terreno.

Debido a las características topográficas del país (en su mayoría, terrenos montañosos con pendientes suaves a muy fuertes) la inserción de una carretera siempre generará taludes artificiales. Si éstos no se estabilizan adecuadamente podrían desplazarse hacia las zonas bajas y dañar al entorno natural y/o a la población civil. Al impacto que significa la construcción de una carretera se suman otros que se pueden generar si los taludes de éstas no son estables, por eso se deben realizar medidas de prevención, mitigación y restauración para disminuir el riesgo de deslave. Dichas medidas deben incluirse desde la planeación del proyecto y adecuarse durante la ejecución y mantenimiento de la carretera. Algunas medidas son, por ejemplo,

configurar el terreno con una pendiente suave y utilizar materiales inertes como concreto lanzado o gaviones, además de materiales vivos como plantaciones de árboles, arbustos, hierbas o la colocación de pasto en rollo, y la combinación de ambos materiales.

Palabras clave: estudios de impacto ambiental, taludes, prevención, mitigación, restauración ecológica.

Introducción

Se considera que las carreteras representan uno de los factores principales para el desarrollo de un país. Existen en México, aproximadamente, 374,000 km de vías, distribuidas en libres y de cuota. De acuerdo con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 67% del movimiento doméstico de carga se hace por carretera y 99% de los pasajeros se desplaza por este medio (SCT, 2015). Las carreteras son de diferentes tipos: rurales, municipales, estatales y nacionales, algunas están revestidas, otras no. La tecnología para la construcción también es muy diferente; algunas carreteras todavía fueron construidas con herramientas manuales, mientras que en otras, muy modernas, se utilizó la maquinaria más avanzada. Sin embargo, cualquiera que haya sido el método de construcción y sus dimensiones, todas tienen taludes en algún lugar de su trazo, ya que buena parte del territorio del país se caracteriza por ser montañoso.

En todas las carreteras se busca la ruta más corta entre dos puntos, con una pendiente que permita a los vehículos correr a una velocidad que reduzca el tiempo de viaje, por eso hay carreteras donde la señalización indica que la velocidad máxima puede ser 30, 40, 60, 90 o 110 km/h. Para construir las de tal modo que alcancen esas velocidades, es necesario que haya una geometría de ancho, ésta se consigue con cortes en los cuales el terreno se encuentra a nivel superior o con terraplenes (relleno) cuando está a un nivel inferior. Lo más importante es construir una carretera segura en cuanto a su geometría, con taludes estables en donde no haya derrumbes que afecten la circulación de los vehículos y/o pongan en riesgo la vida de los usuarios.

Marco legal ambiental en el sector carretero

La construcción de todos los proyectos de infraestructura carretera

está regulada por leyes, reglamentos y normas ambientales oficiales mexicanas, independientemente de si tienen importancia regional, estatal, nacional o internacional. El estudio de impacto ambiental y forestal para cambio de uso de suelo (cuando hay suelos con vegetación forestal) es básico para conocer la dimensión, permanencia e intensidad de los impactos ambientales y socioeconómicos.

A continuación, se enlistan algunos de los ordenamientos legales que deben atenderse en los proyectos carreteros de importancia nacional para obtener los permisos correspondientes de impacto ambiental y cambio de uso de suelo.

1. *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente* (LEGEPA) y su reglamento en materia de impacto ambiental. Indica el procedimiento para obtener la autorización en materia de impacto ambiental (DOF, 1988).

2. *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable* (LGDFS) y su reglamento. Señala el procedimiento para obtener la autorización para carreteras que afectarán terrenos que tienen vegetación forestal. (DOF, 2003).

3. *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010*. Contiene la lista de especies de plantas y animales que tienen alguna protección especial, están en peligro de extinción, son de distribución restringida o sólo viven en sitios muy particulares del país, por ejemplo, la mariposa monarca (DOF, 2010).

En el caso de los proyectos carreteros de competencia estatal, la autorización en materia de impacto ambiental se puede obtener en la secretaría de medio ambiente del estado en el que se desarrollen; pero si hay vegetación forestal, automáticamente se convierte en un proyecto de competencia federal. De la misma manera, si los proyectos carreteros se encuentran dentro de Áreas Naturales Protegidas (ANP) o en terrenos federales, el permiso debe tramitarse en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

a) ¿Qué se debe presentar para obtener el permiso en materia de impacto ambiental?

Se debe elaborar un estudio denominado Manifestación de Impacto Ambiental (MIA), el cual debe ajustarse a los puntos que indica la LEGEPA y su reglamento en los Art. 12° y 13°. La MIA debe informar lo siguientes puntos: ubicación, descripción del proyecto y del entorno en donde se ubicará el proyecto, identificación y evaluación de los impactos, medidas propuestas para prevenir, mitigar, restaurar o compensar los aspectos negativos del proyecto, así como los posibles escenarios.

b) ¿En qué consiste el permiso en materia de impacto ambiental?

Comúnmente se le conoce como Resolutivo de Impacto Ambiental (RIA), en el cual la autoridad que lo emite señala en qué términos autoriza la construcción y operación del proyecto. Ningún proyecto se autoriza sin condiciones. A pesar de que en la MIA se muestran una serie de medidas, la autoridad ambiental siempre requerirá de otras que respalden el cumplimiento total de los aspectos legales.

También es posible que se niegue la solicitud; si la autoridad detecta que se pone en riesgo el equilibrio ecológico puede determinar que el proyecto no es factible. Es muy importante mencionar que este trámite se realiza en un promedio de tres a cuatro meses.

Si la información en la MIA es de calidad y proporciona suficientes herramientas para que el evaluador de la autoridad ambiental entienda el proyecto, identifique plenamente los impactos ambientales y se convenza de que las medidas propuestas son las más adecuadas y cumplen con la legislación ambiental, la autorización puede darse en 60 días hábiles, mínimo; en caso contrario, sería necesario presentar información complementaria y el período de evaluación se extendería.

Por eso, durante la etapa de planeación de un proyecto carretero se debe hacer el estudio de impacto ambiental y tramitar el permiso correspondiente seis meses antes de iniciar las obras de construcción.

c) ¿En qué consiste el permiso de cambio de uso de suelo?

Para solicitar este permiso se debe presentar un Estudio Técnico Justificativo (ETJ) con el contenido que marca la LGDFS y su reglamento, este estudio, además de incluir la ubicación y descripción

del proyecto, debe contener la descripción de la cuenca hidrológico-forestal, así como la cuantificación y valoración de los recursos forestales que se removerán, entre otros aspectos. A diferencia del estudio de impacto ambiental, el ETJ sólo se enfoca en los predios donde el trazo de la carretera tiene vegetación forestal, concepto que viene descrito en la citada ley.

Quien promueva el permiso debe ser el propietario de dichos predios, esto puede ser un problema durante el trámite porque, generalmente, las leyes de la tenencia de la tierra y los múltiples problemas derivados de ella retrasan los procesos para obtener los predios.

Sólo los profesionales que tengan el Registro Nacional Forestal pueden realizar el ETJ, mientras que cualquier profesional en ciencias biológicas-forestales o áreas afines con experiencia en el tema puede realizar la MIA.

La autorización en materia de cambio de uso de suelo es un documento que emite la SEMARNAT, en él se indican, con coordenadas, los predios en donde la secretaría autoriza eliminar la vegetación y construir el proyecto. El permiso especifica los criterios para derribar los árboles, presenta un inventario de especies y los volúmenes de madera que se obtendrán, así como las mediciones de flora, fauna, suelo y agua de cada zona.

Antes de que se emita la autorización, en caso de que sí se expida, quien promueve el proyecto deberá depositar, en el Fondo Forestal Mexicano (FFM), la cantidad monetaria correspondiente a la actividad de compensación ambiental en una superficie de tamaño similar o mayor a la afectada por el proyecto.

El periodo para tramitar el permiso correspondiente es muy similar al de impacto ambiental, por eso, también debe iniciarse, al menos, seis meses antes de la construcción de la carretera.

Programas de protección ambiental

En ambos tipos de autorización se requiere la presentación y ejecución de programas de protección a los componentes principales como flora, fauna, suelo, agua y programas de manejo de residuos, emergencias y de seguimiento al cumplimiento de todos los términos y condiciones establecidas. Adicionalmente, se requieren otros programas de compensación ambiental como los de reforestación,

prevención, control y combate de incendios forestales, educación ambiental, entre otros. Algunos de los cuales están directamente relacionados con la estabilidad de laderas que se describen en el siguiente punto.

Actividades de estabilidad de laderas

Las laderas de las carreteras son creadas artificialmente al cortar el terreno o formar terraplenes y al alcanzar el nivel de pendiente que se requiere para permitir una circulación de alta velocidad. En el siguiente esquema se muestra la configuración de un terreno, en donde es necesario hacer el corte de un lado y conformar un terraplén en el otro (Figura 1).

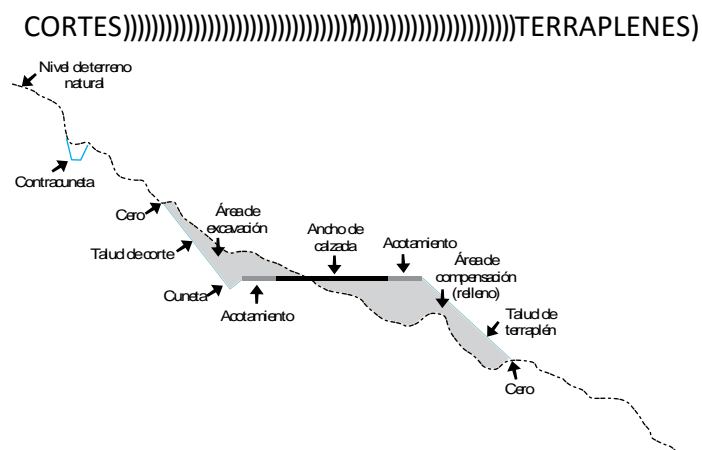


Figura 1. Perfil mixto de una sección de carretera con taludes (Riaño, 2011).

El tipo de suelo, la pendiente, las dimensiones de las carreteras y otros factores influyen en su estabilidad. Por eso, se deben tomar medidas con materiales inertes y vivos para disminuir el riesgo de colapso. A continuación, se describen las medidas que deben considerarse en cada etapa del proyecto.

a) Etapa de preparación

En realidad, no existe una receta para el diseño de los taludes, éste dependerá del tipo de carretera que se desea construir y de factores

económicos, topográficos y geológicos. Por eso, es muy importante realizar estudios de factibilidad técnica, económica y ambiental para definir el trazo y las características geométricas de una carretera.

Desde el punto de vista económico, la adquisición de un mayor derecho de vía tiene implicaciones diferentes. Por una parte, se requiere de mayor inversión para la compra de los terrenos, pero esto permite al diseñador del proyecto plantear taludes con menor pendiente y mayor extensión, lo cual tiene que garantizar un menor riesgo de colapso. Desde el punto de vista topográfico, en zonas montañosas, los taludes siempre tendrán pendientes de medias a fuertes; sin embargo, aunque se adquiriera un amplio derecho de vía, en algunos casos quedan paredes verticales, por lo que el riesgo de derrumbe puede ser mayor. El aspecto geológico es muy importante porque también define la pendiente que deben tener los taludes y el tipo de mantenimiento que requieren para tener estabilidad, a un costo razonable.

b) Datos importantes desde la planeación

Generalmente, a los proyectos carreteros se les hacen modificaciones por diversos factores, como los mencionados anteriormente. De alguna u otra manera, siempre habrá una adaptación geométrica que modifica, elimina o suma cortes; terraplenes, túneles, puentes, obras de drenaje, cunetas, contracunetas, lavaderos, accesos, rampas de frenado, entre otros. Como consecuencia se puede incrementar o disminuir la superficie de taludes. Además, desde el inicio del proyecto, hay que conocer un aproximado de la superficie de taludes en m^2 o ha, también cuál es su longitud, cuál su pendiente y cuál es la dinámica que tiene el tipo de material, ya que estos son factores de riesgo de deslave. Una vez que se conocen esas características, se deben revisar las posibles técnicas para dar estabilidad al talud en caso de que se colapse, las más comunes son: el uso de material inerte y el uso de vegetación, para lo cual es importante conocer las posibles especies que se pueden utilizar y, si hay disponibilidad de plantas, qué comportamiento pueden tener y si serán efectivas o no.

c) Actividades previas

Antes de iniciar la construcción se debe hacer el rescate de plantas, desmonte y despalme:

Rescate. Las plantas que se rescatan sirven para cubrir las áreas que fueron afectadas durante la construcción, particularmente en los taludes. Hay que revisar qué especies conviene rescatar (de acuerdo con las especies que están protegidas por la *Norma Oficial Mexicana NOM-059*) las que tienen importancia ecológica o las que son de rápido crecimiento y que pueden desarrollarse en sitios modificados por la construcción. El rescate puede ser de plantas completas, esquejes o semillas para reproducirlas en un vivero, estas plantas podrán ser utilizadas en los trabajos de restauración una vez que el derecho de vía ya no sea afectado por la construcción.

Desmonte. Debe realizarse en el área mínima que requirió el proyecto y está autorizado por los resolutiveos de la MIA o cambio de uso de suelo. Lo conveniente es que se realice en la temporada de seca para evitar una fuerte erosión por el efecto de la lluvia, además debe respetarse la vegetación que se encuentra en los arroyos y en la periferia de los cuerpos de agua. Los productos forestales maderables se pueden entregar a los propietarios como una medida de compensación social y los residuos se pueden picar para que se integren al suelo.

Despalme. Esta actividad se refiere a la extracción de la capa vegetal, generalmente, los primeros 30 cm. El grosor depende de las características del suelo. Se debe tener cuidado de no revolverlo con las capas más profundas para no modificar las características físicas, químicas y biológicas. Este suelo se puede acomodar en las áreas libres del derecho de vía para su posterior dispersión en los taludes y áreas afectadas para que las semillas mezcladas en este tipo de suelo germinen e inicien el proceso de colonización de la vegetación.

Etapas de construcción

Durante la etapa de construcción es muy importante considerar las siguientes recomendaciones durante la excavación:

1. Iniciar la excavación de arriba abajo.
2. No acomodar los materiales en sitios con fuerte pendiente, en donde el riesgo de movimiento del material es alto.

3. Estabilizar el material y dejar siempre una pendiente natural de reposo.
4. No colocar material en cauces de ríos y arroyos, ni cerca de cuerpos de agua porque, además de azolvarlos, afecta a las plantas y animales. Es un riesgo para la población que habita en su periferia porque se pueden formar avalanchas de lodo.

En regiones montañosas, la falta de espacios adecuados para colocar el material puede convertirse en un verdadero problema ambiental y socioeconómico porque el movimiento del material puede provocar un deslave. Acarrear este material a regiones en donde hay mayor cantidad de terrenos planos puede generar un sobre costo de la obra, ya que, generalmente, esta es la actividad más cara en la construcción de una carretera. Para cubrir y/o estabilizar los taludes se realizan algunas de las siguientes actividades:

a) Plantación de árboles

Comúnmente, esta actividad es la última de la etapa de construcción. Se realiza cuando la carretera rebasa 90% de la obra, las áreas libres del derecho de vía ya no serán afectadas, el terreno ya está conformado, la capa de suelo despalmado ha sido reintegrada y no se requiere construir obras complementarias como cunetas, contracunetas y lavaderos, entre otros. La plantación de los árboles se puede realizar al mismo tiempo que se construye y las especies que se utilizarán deben estar protegidas por la *Norma Oficial Mexicana NOM-069*, ser de rápido crecimiento, tener importancia ecológica y que ayuden a otras especies a establecerse, es decir, que proporcionen condiciones para aquellas que, por ejemplo, requieren de cierta cantidad de sombra, mayor humedad en el suelo, protección del viento, entre otros factores ambientales. Es importante recordar que sólo deben utilizarse árboles de especies nativas.

Se debe realizar un diseño que permita la combinación de las especies y su interacción con la carretera, por ejemplo, siempre se debe tomar en cuenta una distancia mínima de 3 a 5 m según la especie; para regiones tropicales hay que asegurarse que especies como *Enterolobium cyclocarpum* (parota) no se planten a menos de 5 m de la carretera, ya que sus grandes raíces pueden afectar el pavimento; también debe ubicarse una planta de rápido crecimiento a pocos

metros de una de menor y no se debe colocar una planta cerca de instalaciones que puedan ser afectadas por las ramas o raíces.

Por eso, es muy importante que profesionales del área de ciencias biológicas-forestales, que conozcan la diversidad de especies y su biología, realicen estas actividades para evitar daños a la carretera y estabilizar los taludes. No se recomienda que se planten árboles de gran porte en taludes de pendientes fuertes, ya que también es un riesgo de seguridad para los usuarios por posibles caídas de ramas o del mismo árbol. En algunos casos se recomienda la plantación de árboles de portes pequeños que, por sus propiedades, mejoran el suelo, como es el caso de las leguminosas. Es conveniente realizar esta actividad sólo en temporada de lluvias para evitar costos por riego, además esto disminuye la mortalidad de las plantas. En esta parte es cuando se recomienda también la reubicación de las plantas rescatadas en la etapa de preparación.

b) Colocación de pasto en tepes o semillas

El pasto se puede colocar de dos maneras, mediante la dispersión de semillas al voleo o con la colocación de pasto en rollo. Éste último se sujeta con estacas y se empieza de arriba abajo, se puede ir colocando desde el momento en que la maquinaria ha terminado de perfilar el talud, antes de que el suelo pierda humedad.

Es importante mencionar que siempre deben elegirse especies nativas. Aunque es común el uso de especies de otros países, con alta capacidad de adaptación a sitios afectados, siempre es mejor optar por las especies nativas.

Una consecuencia de la colocación del pasto en rollo es que al momento de extraerlo, también se extrae la capa superficial del suelo, que generalmente es la más fértil, por lo que el terreno queda con menores capacidades productivas.

c) Hidrosiembra

La hidrosiembra es una mezcla de hidrogel y semillas que se puede coleccionar en el área de desarrollo del proyecto. Estas semillas pueden ser de árboles, arbustos y hierbas. Existen hidrosembradoras de varias capacidades, habitualmente es un tanque dentro del cual se hace la mezcla y que, a través de una bomba y una manguera, riega el hidrogel

sobre el talud. Una ventaja es que, rápidamente, se cubren taludes muy altos y de fuertes pendientes, en donde las maniobras con personas son de alto riesgo. El hidrogel tiene la característica de absorber agua y la proporciona, paulatinamente, a las raíces de las plantas, se le pueden agregar otras sustancias para que haya más nutrientes en el suelo o para el control de enfermedades, también proporciona aireación al suelo, aumenta la capacidad de infiltración y reduce la compactación que genera la maquinaria sobre el talud, entre otras propiedades. Por lo común se usan especies exóticas, muchas veces por el desconocimiento de las especies nativas y la disponibilidad de semillas, lo cual constituye un problema.

d) Construcción de cunetas y contracunetas

Las cunetas son canales que se construyen en la base de los taludes para que el agua se encauce al sistema de drenaje, están hechas de concreto para que no se erosione el suelo, evitan que el agua se infiltre hacia la pavimentación de la carretera y se produzcan daños por hundimientos o deslaves cuando se encuentra en terrenos montañosos. Las contracunetas son canales que se realizan agua arriba del talud para encauzar la lluvia hacia los cauces, evitar que se disperse por todo el talud y lo erosione. Por lo general, son hechos de concreto, con inserción de pequeñas piedras o tabiques para disminuir la velocidad del agua. De esta manera se considera que, al disminuir la humedad en el talud, el riesgo de colapso se reduce.

e) Construcción de bermas o terrazas

Las bermas o terrazas son terraplenes construidos en el sentido perpendicular de la pendiente del terreno, además se combinan con bordos y canales. Su objetivo es disminuir la erosión y encauzar el agua hacia sitios donde el suelo está protegido con vegetación. Su dimensión dependerá de la pendiente y longitud del talud, asimismo al desalojar en éste último el excedente de agua de lluvia, se disminuye el poder erosivo sobre él. La longitud del talud y el cálculo del volumen de agua constituyen dos factores que determinan el número de bermas o terrazas que se realizarán.

f) Gaviones

Los gaviones son cubos con malla de triple torsión, se rellenan de piedras de diferentes tamaños, se colocan al pie de la ladera para que conformen una pared, y el objetivo de esta construcción es detener los materiales que se sueltan de los taludes, en particular, cuando es una mezcla de roca con suelo y se mueven en masa. Los gaviones pueden tener diferentes dimensiones y su número dependerá de la dimensión del área en donde se desea contener los materiales. Su efectividad para detener rocas de gran tamaño en laderas muy inestables está comprobada. Un ejemplo de esto es la carretera de cuota de Tehuacán a Oaxaca. Uno de los aspectos negativos de este tipo de obra es la afectación que causa a la calidad paisajística por la inserción de materiales artificiales en los taludes cubiertos por vegetación.

g) Concreto lanzado

Para dar estabilidad a los taludes, los constructores utilizan la técnica del concreto lanzado, la cual se complementa con la colocación de tubos y anclas para drenar el agua. De esta manera, el agua se colecta a través de los tubos y corre hacia afuera del suelo, además cae sobre una superficie cubierta de concreto para evitar la erosión del talud; al mismo tiempo, disminuye la humedad dentro del suelo. Este tipo de técnica se usa en terrenos donde hay mucho material suelto que, si llega a caer, puede causar accidentes a los usuarios en terrenos con fuertes pendientes y entrada de túneles.

h) Mallas

Existen mallas sintéticas y de origen natural, como las hechas con fibra de coco, para proteger el suelo de la erosión. Se colocan sobre el terreno que se desea cubrir y se sujetan al suelo, generalmente, con varillas. Su efectividad dependerá de la densidad y objetivo de las mismas. Pueden utilizarse para la estabilidad del talud y/o para mantener un paisaje homogéneo (en algunos casos, son de color verde para que se mimeticen con la vegetación). Estas mallas se consideran de más bajo costo que otras técnicas de estabilización que usan concreto, además, en algunos casos, cuando no son muy densas, se pueden colocar semillas de hierbas y arbustos para que germinen;

además se debe tener cuidado en el diámetro de apertura para que el tallo de las plantas no las rompan y pierdan su funcionalidad.

i) Otros materiales

En algunos casos se pretende contener el posible movimiento de los taludes, cuando hay algún riesgo de derrumbe, con muros de concreto o metal. El grosor depende de la cantidad y fuerza que tenga el material. A diferencia de las técnicas anteriores, estos muros no son permeables, por lo que en zonas de alta precipitación pueden acumular agua. Desde el punto de vista paisajístico, tienen un impacto porque no son de material natural y difieren de los colores de la vegetación que se llega a desarrollar en los taludes. Una forma de disminuir este impacto es colocando plantas de enredaderas en la parte de arriba del muro para que éstas lo cubran poco a poco.

Etapa de mantenimiento

Los taludes requieren mantenimiento para prevenir caídas de material y deslaves que puedan dañar a los usuarios y cortar la circulación vehicular en las carreteras. Una parte del mantenimiento de los taludes consiste en monitorearlos para conocer cómo se está comportando el suelo; ya que modificar la configuración del terreno, en consecuencia, cambia los flujos de agua subterránea, la humedad del suelo, la vegetación que está por arriba y sobre el talud, además, el suelo sufre de presión para estabilizarse. En caso de observar movimientos de suelo en los taludes, se debe realizar una modificación para disminuir la pendiente, no importa si por eso se extiende unos metros más el derecho de vía, adicionalmente se puede mejorar la estabilidad del talud con algunas de las técnicas descritas anteriormente.

Otra consideración importante en el proceso de restauración y mantenimiento de taludes es la selección de la vegetación. La de tipo arbórea, principalmente, resulta controversial debido a que puede incrementar o disminuir el riesgo de derrumbes en los taludes de las carreteras. Si se utilizan especies de árboles que tienen un desarrollo radicular muy grande y profundo, el anclaje es mayor y ayuda a la estabilidad del talud, pero si se emplean especies arbóreas con raíces

de crecimiento superficial, éstas pueden caer sobre la carretera cuando haya vientos fuertes o lluvias muy intensas. En el caso de especies arbustivas y herbáceas, no existe este problema debido a dos características: sus raíces son finas y el tamaño de las plantas no representa riesgo de caer sobre los usuarios y causar accidentes.

Conclusiones

Al hacer un análisis de las técnicas descritas anteriormente, concluimos que, derivado de la diversidad de características físicas, geográficas, sociales y económicas de México, la necesidad y las características de las carreteras también serán diferentes, en consecuencia, los taludes en cortes y terraplenes requerirán de una amplia variedad de técnicas de estabilización. Éstas pueden utilizar materiales inertes o mezclados con el uso y manejo de la vegetación, en la cual se considera la utilización de especies nativas de árboles, arbustos, hierbas y pastos enredaderas.

Finalmente, se hace hincapié en que las laderas o taludes que resultan de la construcción de una carretera siempre requerirán de mantenimiento para evitar daños a la misma estructura y a la población que las utiliza.

Referencias

- Diario Oficial de la Federación. (2005). Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. México, D.F. Recuperado de http://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/protocolo/LGE_EPA.pdf
- Diario Oficial de la Federación. (2005). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. México, D.F. Recuperado de <http://www.metro.df.gob.mx/transparencia/imagenes/fr1/normaplicable/2014/1/lgeepa14012014.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (2010). NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres. Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. México, D.F. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5173091&fecha=30/12/2010
- Riño, N. (2011). Protección y conservación ambiental en autopistas México-Tuxpan y México-Pachuca. México D.F.: Fideicomiso Autopistas y Puentes del Golfo Centro.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2015). Recuperado de www.sct.go.mx

CAPÍTULO 11

Inestabilidad de laderas-taller de trabajo

Leonor Jiménez¹, Katrin Sieron², Beatriz Marín¹ y Ana María Alarcón Ferreira³

¹Instituto de Ecología A. C.

²Centro de Ciencias de la Tierra y Universidad Veracruzana

³Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz

Introducción

Durante la reunión del 1er Foro “Inestabilidad de laderas en el estado de Veracruz: necesidades de investigación y búsqueda de soluciones”, se presentaron diversas aproximaciones locales, nacionales e internacionales de la problemática. Sin embargo, debido a la necesidad de identificar e integrar las cuestiones clave en el sector académico y operativo local para el estado de Veracruz, también se desarrolló un taller de trabajo multidisciplinario, paralelo a este foro. En el taller participaron 20 representantes de instituciones académicas y dependencias del gobierno federal y estatal (Figura 1, Anexo 1) involucrados en la conservación de suelos y en la atención de la problemática de inestabilidad de laderas. En el taller se debatió sobre acciones concretas, en materia de inestabilidad de laderas, que contribuyan a mitigar este problema en el estado de Veracruz.

Los objetivos específicos planteados en este taller fueron los siguientes:

1. Identificar las principales problemáticas, necesidades y posibles soluciones asociadas a la conservación de suelo y a los procesos de remoción en masa (PRM).

2. Generar sinergias entre grupos especializados, encaminadas a tomar acciones conjuntas a través de un grupo consultor.
3. Elaborar una agenda a corto, mediano y largo plazo de acciones prioritarias que marquen una línea de acción en los diversos campos de investigación, gestión y operación, con respecto de la conservación de suelo y la prevención de riesgos asociados a los PRM.

En este capítulo se sintetizan las principales acciones, identificadas como prioritarias, para la detección, evaluación, prevención y restauración de la inestabilidad de laderas.



Figura 1. Participantes del taller y personal de apoyo logístico durante la visita prospectiva. De izquierda a derecha: Ramón Pérez, Noel Riaño, Katrin Sieron, Alexia Stokes, Leonor Jiménez, Leobardo Domínguez, Andrea Valdés, Guillermo Angeles, Andrés de la Rosa, Ana María Alarcón, Luis Daniel Barrajas, Isabelle Barois, Daniel Geissert, Lawrence Walker, Mónica Martínez, Pasquinel de la Fraga, Alfonso Rivas, Óscar Gómez y Juan Carlos García

Visita prospectiva

Con el objetivo de observar y generar una discusión sobre las condiciones locales de los ecosistemas a orilla de la carretera, con respecto de su vegetación, sus taludes, suelos y medidas de remediación ante la erosión, llevamos a cabo una visita prospectiva en el tramo carretero del libramiento Xalapa-Coatepec-El Grande, de los municipios de Xalapa y Coatepec (Figura 2).

El área visitada se encuentra dentro del Campo Volcánico de Xalapa (Rodríguez, Morales, Layer y González, 2010; González, 2005), al este del Cofre de Perote y cerca de los límites con la Planicie Costera del Golfo (González, 2005). El basamento del área es de rocas calcáreas del Cretácico, estas rocas corresponden a calizas arrecifales, calizas arcillosas y calizas bioclásticas parcialmente recristalizadas (GYMSA, 1987). Particularmente, en el área del recorrido de campo se encuentran tres unidades litológicas, todas del Cuaternario: ignimbrita Xáltipan, Campo Volcánico de Xalapa y depósitos de aluvión (González, 2005). El suelo en esta área es de tipo arcillo-limoso, con depósitos piroclásticos y lava basáltica muy alterada. El ecosistema original en la zona es bosque mesófilo de montaña, sin embargo, el cambio de uso de suelo ha generado un paisaje, a orilla de carretera, mezclado con cultivos de caña de azúcar, café de sombra y parches de bosque en diferentes etapas sucesionales (Williams, 2007).

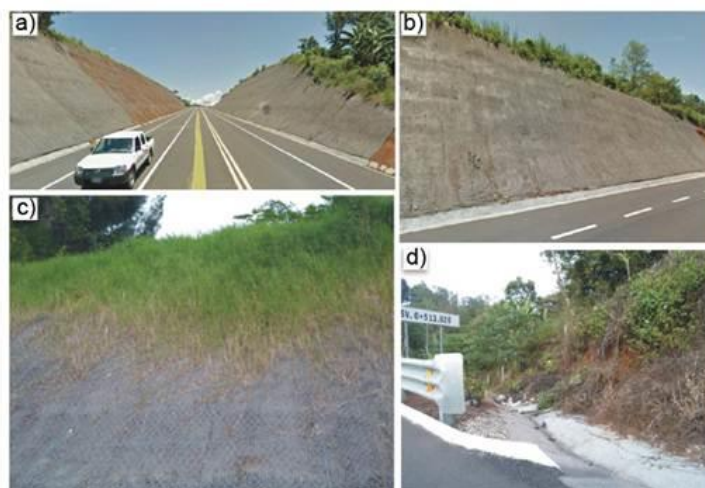


Figura 2. Salida prospectiva de taludes a orilla de carretera dentro del libramiento Xalapa-Coatepec-El Grande. a) cortes carreteros con pendientes de más de 30°. b) vegetación que cubre parte del talud. c) talud cubierto con malla. d) cuneta para desviar el escurrimiento de agua de la carretera.

A lo largo del recorrido se observaron diversos cortes carreteros que forman taludes de hasta 5 m de alto y pendientes de más de 30° (Figura 2a y b). Se identificaron tres posibles tipos de movimientos en estos taludes: caída libre de material (desprendimientos o derrumbes), flujos de diferente naturaleza y deslizamientos de pequeña escala. Las posibles causas que podrían condicionar los PRM en este lugar son: intemperismo, erosión, precipitaciones, deforestación, escorrentía, la pendiente, la modificación del terreno, entre otros. La dirección de flujo del material en caso de PRM ocurriría hacia el interior de la carretera. Las obras de mitigación observadas fueron, principalmente, el recubrimiento de los taludes con malla y la instalación de cunetas para la conducción de agua (Figura 2c y d).

Seis acciones prioritarias para el estado de Veracruz

A continuación, se describen las seis acciones prioritarias determinadas a partir de las experiencias e intereses de todos los participantes del taller. La visión obtenida en la visita prospectiva

permitió al grupo identificar las posibilidades de colaboración y/o cooperación entre la academia y las dependencias gubernamentales.

a) Inventario estatal y nacional de los procesos de remoción en masa

La integración estandarizada de datos sobre la ocurrencia de PRM en el territorio mexicano es una necesidad prioritaria para identificar y analizar cuáles son las regiones geográficas, en donde se presentan estos fenómenos, su frecuencia y los posibles factores que los detonan.

Hasta hace poco, México no contaba con una base de datos o inventario que concentrara toda la información disgregada en artículos, noticias, revistas y otros documentos. Sin embargo, recientemente, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) tomó la iniciativa de construir el inventario nacional de fenómenos geológicos (Capítulo 5). Éste ha generado una plataforma para concentrar toda la información de cada estado sobre el registro de los PRM.

En el taller de trabajo se identificó la necesidad de una guía de “captura estándar de datos”, a fin de que todas las instancias gubernamentales, académicas y particulares puedan nutrir el inventario con los mismos criterios usados en la elaboración de los atlas estatales y municipales de peligros y riesgos (CENAPRED, 2006). También se propuso que instituciones como el Servicio Geológico Mexicano (SGM), el INEGI, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y sus filiales en los estados, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y las unidades estatales y locales de Protección Civil colaboren en esta tarea para potenciar el avance en la construcción del inventario estatal y nacional de PRM, así como para garantizar el acceso interinstitucional a esta información.

b) Estandarización de metodologías de evaluación de los procesos de remoción en masa

Dónde y cuándo se producen los PRM, con qué frecuencia ocurren, qué tan grande será el próximo evento, qué tan rápido viajarán y qué tan lejos llegarán son preguntas que se tratan de contestar con diferentes estrategias metodológicas. La finalidad es conocer la

probabilidad numérica de ocurrencia de los PRM o describir su impacto (Dai, Lee y Ngai, 2002).

En términos generales, estas metodologías operan para estimar la susceptibilidad, el peligro (probabilidad de ocurrencia o impacto) y el riesgo asociado a los PRM (Baum *et al.*, 2014; Dai *et al.*, 2002). Las primeras aproximaciones metodológicas consistieron en el mapeo de PRM y de áreas locales susceptibles a ellos (Varnes, 1981). Luego, en los setenta se iniciaron estudios regionales de susceptibilidad con el uso de computadoras, basados en el análisis de las características del terreno, de su geología (usando mapas) o en la evaluación numérica de factores contribuyentes (Baum *et al.*, 2014).

Actualmente, los avances en computación, sistemas de información geográfica (SIG) y sensores remotos han permitido un análisis más completo de la susceptibilidad y del peligro asociado a los PRM, a través de cuatro tipos de modelos principales: modelos probabilísticos basados en un inventario, modelos estadísticos, modelos determinísticos y modelos heurísticos (Soeters y Van Westen, 1996).

Sin embargo, las variaciones en la metodología, desde la obtención y registro de datos hasta la modelación, son muy diversas. Ante esta gran variación, surge la necesidad de estandarizar una metodología que permita a cualquier servidor público, académico, institución o particular tomar los datos básicos necesarios para la caracterización de los PRM. El ajuste de una metodología unificada evitará los datos sesgados, poco confiables o incompletos. Para concretar este ajuste es necesario que instituciones como el INEGI, la CONAGUA, el SGM y la Secretaría de Protección Civil (PC) colaboren en la construcción de una metodología unificada para la toma de medidas imprescindibles, previamente identificadas por colegas del sector académico (por ejemplo, del Centro de Ciencias de la Tierra, la Universidad Veracruzana, el Instituto de Geografía y la Universidad Autónoma de México).

c) Evaluación del peligro y atención a emergencias

La evaluación del peligro por inestabilidad de laderas requiere del conocimiento, análisis e interacción de las variables que determinan el grado de estabilidad de una ladera (susceptibilidad), así como del conocimiento y la estimación de la intensidad de los factores que

detonan o desencadenan los movimientos. En el estado de Veracruz, como en el resto del país, la instrumentación de laderas, es decir, la instalación de equipos e instrumentos de medición para monitorear el comportamiento del suelo, es escasa o nula. De igual manera, en caso de PRM de alto impacto, los recursos humanos capacitados en la evaluación del riesgo y en la atención a emergencias son limitados (ver inciso e).

En el taller se identificó como prioritaria la integración institucional de gobierno y academia para generar programas y proyectos de equipamiento instrumental en el monitoreo y evaluación de laderas susceptibles a sufrir PRM. También se propuso generar estrategias para alertar de manera oportuna a la comunidad cuando se detecten manifestaciones de inestabilidad. En cuanto a la atención de emergencias, tema en el que ya participan la PC y el CENAPRED, se planteó la colaboración con otras dependencias (por ejemplo, con el SGM) para apoyar en las evaluaciones técnicas de los PRM, especialmente, durante la temporada de lluvias, cuando la incidencia del fenómeno aumenta y se requiere de personal especializado.

Finalmente, se reconoce que para enfrentar situaciones de emergencias y desastres relacionadas con los PRM, se requiere de una asesoría integral a través de un comité consultor (ver inciso f). Este comité deberá formarse con los especialistas en geotecnia, ingeniería, geología, vialidad, urbanismo, meteorología y ecología con amplio conocimiento de las condiciones locales del estado de Veracruz.

d) Búsqueda de alternativas biológicas para reforzar la estabilidad del suelo

La estabilidad del suelo y el control de la erosión superficial pueden reforzarse, en muchos casos, con alternativas biológicas que generen mayor estabilidad en los agregados del suelo, que mejoren el sistema hidráulico, e incluso, establezcan estructuras de anclaje y resistencia mecánica (Stokes *et al.*, 2012). La investigación en materia de la sucesión ecológica, la restauración de ecosistemas perturbados, la diversidad de la fauna subterránea y la calidad del suelo e hidroedafología son parte esencial del trabajo del sector académico que participó en el taller. En opinión de los académicos de México, del Instituto de Ecología (INECOL), Estados Unidos, de la Universidad de Nevada (U. de Nevada) y Francia, del Instituto de

Investigación Agrícola (INRA), para abordar el estudio de alternativas biológicas que ayuden a la estabilidad de laderas será necesario considerar las condiciones climáticas, edáficas y de manejo, específicas en el estado de Veracruz. En resumen, se identificó el interés por desarrollar estudios encaminados a:

- La identificación de vegetación nativa que dispara los procesos sucesionales de las laderas después de PRM.
- La identificación de características fisiológicas, biomecánicas y de resistencia de los sistemas radiculares de plantas capaces de supervivir en ambientes altamente perturbados.
- La descripción y monitoreo de microorganismos del suelo que propician una mayor infiltración y conductividad del agua, además de promover la agregación de las partículas del suelo.
- La descripción de las características físico-químicas del suelo, de la infiltración y conductividad del agua y de los aspectos de geomorfología, hidroedafología y calidad de suelo que influyen o determinan la susceptibilidad de que ocurran PRM.

e) Educación y capacitación

Uno de los principales problemas identificados fue la falta de educación integral en aspectos como:

- Qué son los PRM, qué tipos hay y qué factores los detonan.
- Qué métodos pueden ser utilizados para evaluar y monitorear PRM.
- Cuáles son las alternativas en materia de ingeniería civil y bioingeniería que se pueden usar para estabilizar laderas.
- Cuáles son las características de una ladera ecológicamente restaurada y físicamente estable.
- Qué alternativas de restauración y estabilización de laderas son viables en el contexto de la legislación urbana.
- Qué hacer en materia de protección civil para atender el riesgo de PRM.

Ante esta problemática se propone la participación de expertos en el ámbito académico de la restauración ecológica, geología,

edafología, ingeniería civil y legislación para generar un programa curricular que contemple la capacitación en los temas anteriormente mencionados. Dado que muchos de los interesados en recibir esta capacitación trabajan en dependencias gubernamentales con escasas posibilidades de capacitación, también se propuso desarrollar programas de educación en línea con plataformas gratuitas (por ejemplo Moodle). Esta estrategia permitiría la formación de recursos humanos y educativos sobre la estabilidad de laderas y la rehabilitación de ecosistemas dañados por los PRM, además facilitaría actualizar el conocimiento vigente que muchas veces es poco accesible y que sólo se encuentra en revistas especializadas.

f) Formación de grupos de trabajo interdisciplinario

La formación de grupos de trabajo es un mecanismo idóneo para propiciar sinergias en la generación de conocimiento, pues facilita, entre otras cosas, la colaboración nacional e internacional, fomenta el trabajo multidisciplinario, permite compartir infraestructura tecnológica, provee la capacitación, promueve la movilidad de investigadores, tecnólogos y estudiantes, articula conocimientos y habilidades y hace promoción de la interacción del sector productivo, privado, civil y público, vinculados en el diseño e implementación de los proyectos.

Los participantes del taller identificaron como necesidad prioritaria formar una comunidad consultiva en materia de estabilidad de laderas. Este grupo podría lograr una red formalmente constituida y reconocida que permita plantear proyectos a largo y mediano plazo en materia de investigación, educación, consultoría y obtención de recursos, asimismo, dado que sería interdisciplinario podría promover reuniones académicas, por ejemplo, la siguiente edición de este foro estatal sobre estabilidad de laderas, en la que participen expertos nacionales e internacionales con quienes se intercambie información teórica y metodológica o se establezcan nuevos proyectos de colaboración.

Conclusiones

Como se expone en las secciones anteriores, gran parte de las necesidades y soluciones en materia de inestabilidad de laderas

depende de la colaboración institucional que permita plantear acciones transversales con los grupos especializados ya existentes. Dichas acciones generan una agenda a corto, mediano y largo plazo, cuyo cumplimiento dependerá de establecer sinergias entre gobierno, academia y población. Para concluir se presenta la agenda de acciones y la propuesta de cómo ejecutarlas en los diversos plazos.

Acciones a corto plazo:

- Asesoría a nivel personal (con directorio) a través de blogs, cursos o plataformas con información.
- Formación de grupos de colaboración (antes, durante, después de PRM).

Acciones a mediano plazo:

- Inventario estatal de PRM.
- Generación de métodos formales y estandarizados de evaluación.
- Gestión de un grupo consultor.
- Elaboración de proyectos de investigación y gestión especializados y multidisciplinarios.

Acciones a largo plazo:

- Creación de una red temática de estudio, comunicación y colaboración en materia de estabilidad de laderas.
- Elaboración de una plataforma para la educación y capacitación en materia de PRM en Veracruz.

Referencias

- Baum, R.L., Schulz, W.H., Brien, D.L., Burns, W.J., Reid, M.E. y Godt, J.W. (2014). Plenary: progress in regional landslide hazard assessment—examples from the USA. En K. Sassa, P. Canuti y Y. Yin. (Eds.). *Landslide science for a safer geoenvironment* (Vol.1) (pp. 21-36). doi 10.1007/978-3-319-04999-1
- Dai, F.C., Lee, C.F. y Ngai, Y.Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Eng. Geol.* 64, 65-87.
- González, E. (2005). El vulcanismo monogenético de la región de Xalapa, Veracruz. Geomorfología, petrología y génesis. pp. 6-20. Tesis de maestría. UNAM, México.
- GYMSA. (1987). Estudios de planeación regional, exploración geológica-petrolera de tipo tectónico. Prospecto Huatusco-Jalapa. Estado de Veracruz. (Proyecto realizado por PEMEX). Inédito.

- Rodríguez, S.R., Morales, W., Layer, P. y González, E. (2010). A quaternary monogenetic volcanic field in the Xalapa region, eastern trans-Mexican volcanic belt: Geology, distribution and morphology of the volcanic vents. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 197, 49-166.
- Soeters, R. y Van Westen, C.J. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation. En A.K. Turner y R.L. Schuster (Eds.) *Landslides, investigations and mitigation* (Special Report No. 247) (pp. 129-177). Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press.
- Stokes, A., Barot, S., Lata, J. C., Lacroix, G., Jones, C. G., y Mitsch, W. J. (2012). Ecological engineering: from concepts to applications. *Ecological Engineering*, 45, 1-4.
- Varnes, D.J. (1981). The principles and practice of landslide hazard zonation. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 23, 13-14.
- Williams, G. (2007). *El bosque de niebla del centro de Veracruz: Ecología, Historia y destinos en tiempos de fragmentación y cambio climático*. Xalapa, Veracruz, México: CONABIO-Instituto de Ecología, AC.

Anexo 1. Participantes del taller de trabajo paralelo al Foro.

NOMBRE	INSTITUCION	CORREO ELECTRÓNICO
1. Daniel Geissert Kientz	Instituto de Ecología A.C.	daniel.geissert@inecol.mx
2. Fabiola López Barrera	Instituto de Ecología A.C.	fabiola.lopez@inecol.mx
3. Isabelle Barois Boulan	Instituto de Ecología A.C.	isabelle.barois@inecol.mx
4. Beatriz Marín Castro	Instituto de Ecología A.C.	beatriz.marin@gmail.com
5. Guillermo Angeles	Instituto de Ecología A.C.	guillermo.angeles@inecol.mx
6. María Leonor Jiménez Valdés	Instituto de Ecología A.C.	leonorjimenez2004@gmail.com
7. Lawrence Walker	Universidad de Nevada, USA	walker@unlv.nevada.edu
8. Noel Riaño	Consultoría	noelrr78@gmail.com
9. Mónica Martínez	INEGI	monica.martinezm@inegi.org.mx
10. Andrés de la Rosa Portilla	SEDEMA, Veracruz	delarosaportilla@gmail.com
11. Luis Manuel Barrajas	Servicio Geológico Mexicano	
12. Leobardo Domínguez	CENAPRED	ldm@cenapred.unam.mx
13. Andrea Valdés	Colegio de Veracruz	valdesandrea@hotmail.com
14. Katrin Sieron	Centro de Ciencias de la Tierra, UV	ksieron@gmail.com
15. Ana María Alarcón Ferreira	Secretaría de Protección Civil, Veracruz	instr_volcanic@yahoo.com.mx
16. Pasquinel de la Fraga	Secretaría de Protección Civil, Veracruz	paski23@hotmail.com
17. Horacio Tapia	LANIA	horaciotmc@gmail.com
18. Franny G. Murillo	Instituto de Geografía, UNAM	fran.79v@gmail.com
19. Oscar Gómez	CONAMP	oscar.gomez@conanp.gob.mx
20. Alexia Stokes	INRA	alexia.stokes@cirad.fr

CONCLUSIONES

Guillermo Angeles y Leonor Jiménez
Instituto de Ecología A. C.

Los movimientos de terreno (MM) o procesos de remoción en masa (PRM) se han convertido en un problema muy serio, especialmente en ambientes montañosos en los que la alta precipitación y actividad sísmica ponen en riesgo la estabilidad de laderas. A pesar de que los PRM pueden ocurrir como resultado de procesos naturales, muchos de éstos pueden evitarse con una planeación adecuada y con la implementación de diferentes técnicas biológicas y de ingeniería que están a nuestro alcance.

Este libro de memorias es resultado del 1er Foro “Inestabilidad de laderas en el estado de Veracruz: necesidades de investigación y búsqueda de soluciones”, en el cual se presentaron diversas aproximaciones locales, nacionales e internacionales de la problemática. Este foro nos ha dejado una gran experiencia en cuanto a aspectos teóricos y prácticos sobre el tema de los PRM, lo que nos ha permitido intercambiar experiencias con quienes están trabajando en este tema desde las secretarías de estado, institutos nacionales y la academia, para obtener una perspectiva sobre el trabajo que precisa ser atendido. Finalmente, este foro también nos ha dejado una lista de tareas para el futuro: una de las cosas más valiosas y de efecto inmediato es el impacto directo en la investigación y en la planeación de acciones a corto, mediano y largo plazo de una serie de lecciones aprendidas y ubicadas en la realidad del territorio veracruzano. A continuación, enlistamos algunas de éstas que consideramos de mayor relevancia.

1. Es necesario el análisis y aclaración de conceptos que se

refieren a los PRM (ver Alcántara, 2000). La desinformación, no sólo en la terminología sino en la concepción de los diferentes PRM, nos puede llevar a un diagnóstico erróneo del análisis del peligro en una ladera. Definir con claridad el mecanismo de movimiento, el tipo y el volumen de material involucrado, nos llevará con mayor certeza a la(s) estrategia(s) que usaremos para estabilizar una ladera.

2. Aunque los PRM son fenómenos naturales, una gran parte de ellos son desencadenados por acciones del hombre, que van desde la simple acción de remover la vegetación hasta las acciones de obra e infraestructura sin la debida planeación.
3. Los PRM aún no son totalmente predecibles, por lo que es necesario encaminar esfuerzos en la investigación que permitan plantear modelos multifactoriales y que consideren las características físicas, geológicas, climáticas y bióticas de cada lugar.
4. Es muy importante hacer un llamado de atención para tomar medidas de prevención del riesgo. Esto aumentará la seguridad de la población humana y de los ecosistemas, además, dichas medidas serán mucho menos costosas que las acciones de remediación de daños.
5. La estabilidad de laderas es un proceso en el que intervienen fenómenos físicos (la gravedad, las precipitaciones, los vientos, las hidrología, etc.) y biológicos (tipo y abundancia de vegetación y organismos del suelo). Por lo tanto, para dar estabilidad a un talud o ladera sería necesario recurrir a obras de ingeniería civil con estrecha participación de científicos de la vida como biólogos, agrónomos, edafólogos, pedólogos, etc., que ofrezcan una combinación de soluciones adecuadas a cada circunstancia.

El esfuerzo por compilar de manera escrita las memorias de este foro subyace en el interés de contar con una herramienta de consulta de primera mano para toda persona que tenga que ver con la prevención de desastres, planeación de nuevas rutas de comunicación terrestre o de obras que alteren la estabilidad de los suelos, estudios de impacto ambiental, planes de reforestación y aforestación, etc. Esperamos que en nuestro estado este foro signifique un primer paso en la búsqueda de soluciones para la inestabilidad de laderas.

Referencias

- Alcántara, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos de terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 41,7-25.