



Revista Mexicana de Ciencias

Geológicas

ISSN: 1026-8774

rmcg@geociencias.unam.mx

Universidad Nacional Autónoma de
México
México

Salinas-Jasso, Jorge A.; Salinas-Jasso, Ricardo A.; Montalvo-Arrieta, Juan C.; Alva-Niño,
Efraín

Inventario de movimientos en masa en el sector sur de la Saliente de Monterrey. Caso de
estudio: cañón Santa Rosa, Nuevo León, noreste de México

Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 34, núm. 3, 2017, pp. 182-198

Universidad Nacional Autónoma de México
Querétaro, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57253651003>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Inventario de movimientos en masa en el sector sur de la Saliente de Monterrey. Caso de estudio: cañón Santa Rosa, Nuevo León, noreste de México

Jorge A. Salinas-Jasso, Ricardo A. Salinas-Jasso, Juan C. Montalvo-Arrieta y Efraín Alva-Niño

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra,
Ex-Hacienda de Guadalupe km 8, Carr. Linares – Cerro Prieto, Linares, N.L., 67700, México.
*jmONTALVOA87@gmail.com

RESUMEN

Se presenta un inventario de movimientos en masa dentro de la Saliente de Monterrey en el cañón Santa Rosa, comprendido entre los municipios de Linares e Iturbide en el Estado de Nuevo León. Distintas tipologías de movimientos en masa fueron documentadas a partir de trabajo de campo, análisis e interpretación de imágenes satelitales así como escenas del acervo histórico de la plataforma *Google Earth*. La información recabada para los últimos 30 años identifica 429 eventos, destacando caídos, deslizamientos y flujos como las principales tipologías de movimientos en masa en la región, principalmente condicionados al patrón geológico-estructural. La mayoría de los eventos registrados han sido detonados por precipitaciones extremas relacionadas con huracanes y tormentas tropicales. Sin embargo, el marcado incremento de sismicidad en el noreste de México permite proponer a esta actividad como un segundo agente detonante de la inestabilidad de laderas regionalmente. El inventario generado sirve como base para la evaluación del riesgo por movimientos en masa en la región. Así mismo, la metodología empleada puede ser extrapolada a zonas vecinas donde la problemática de inestabilidades de ladera es recurrente pero carente de estudios científicos.

Palabras clave: inventario; movimientos en masa; noreste de México; Sierra Madre Oriental; precipitaciones extraordinarias; sismicidad.

ABSTRACT

We present a landslide inventory for the Santa Rosa Canyon in the Monterrey Salient, between Linares and Iturbide in Nuevo León state. A total of 429 landslides were documented from field investigation, analysis and interpretation of satellite imagery and historical data from Google Earth platform for the last 30 years. Falls, slides and flows are the most typical landslides, mainly related to extraordinary rainfalls from hurricanes and tropical storms. Moreover, an overall increase in seismicity in northeastern Mexico may indicate this activity as the second most important factor triggering slope instabilities. This inventory could be used in detailed landslide risk assessment studies in the region, and the methodology may be extrapolated to neighboring areas with recurrent landslides and a lack of scientific studies.

Key words: inventory; landslides; northeastern Mexico; Sierra Madre Oriental; extraordinary rainfall; seismicity.

INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa se caracterizan por el desplazamiento descendente de masas de roca, suelo o detritos en una ladera bajo la influencia de la fuerza de gravedad (Cruden y Varnes, 1996). Generalmente, las laderas se encuentran en un estado de equilibrio bajo las condiciones geológicas, hidrológicas y climatológicas que imperan en una región, lo cual se ve reflejado en reajustes lentos en la estabilidad de la ladera (González de Vallejo *et al.*, 2002). La influencia de agentes externos como precipitaciones, sismicidad, vulcanismo y actividades antropogénicas acelera la ocurrencia del fenómeno en períodos de tiempo relativamente cortos (Guzzetti *et al.*, 2012; Dikau, 2013). Anualmente, los movimientos en masa causan pérdidas millonarias y una gran cantidad de muertes alrededor del mundo, siendo los países en vías de desarrollo las zonas más afectadas globalmente (Alexander, 2005; Kirschbaum *et al.*, 2015; Sepúlveda y Petley, 2015). El impacto en la sociedad, notoriamente negativo, se ha incrementado debido al crecimiento de centros urbanos en zonas altamente susceptibles a la inestabilidad de laderas. Este hecho requiere la evaluación del peligro potencial relacionado con la inestabilidad de ladera en términos de exposición y vulnerabilidad social con el fin de contrarrestar los efectos adversos asociados a estos eventos (Dai *et al.*, 2002; Corominas *et al.*, 2014). Los inventarios de movimientos en masa (IMM) representan mapas temáticos donde sobre una base cartográfica se ilustra la distribución regional y características de los eventos documentados, constituyendo información prioritaria para la implementación de evaluaciones de riesgo (Malamud *et al.*, 2004; Guzzetti *et al.*, 2012). Generalmente, los IMM presentan de manera sistemática la cantidad, ubicación, tipo, estado de actividad, área de afectación, volumen de material desplazado, factores condicionantes principales y detonantes importantes en la generación de movimientos en masa (Fell *et al.*, 2008; Guzzetti *et al.*, 2012). La calidad del IMM dependerá del objetivo y recursos disponibles para su elaboración (Galli *et al.*, 2008). Fell *et al.* (2008) especifican que las escalas óptimas de los IMM varían entre 1:25,000 y 1:250,000. Diversas actividades son implementadas para la elaboración de IMM. Investigaciones de campo, digitalización de mapas físicos a formatos vectoriales, interpretación visual y semiautomática de fotografías aéreas e imágenes satelitales, así como análisis de modelos digitales de elevación constituyen los métodos más recurrentes en la preparación de IMM (Van Den Eeckhaut *et al.*, 2005; Guzzetti *et al.*, 2012; Xu, 2015). Registros históricos de crónicas y relatos populares, reportes en medios de comunicación así como publicaciones científicas constituyen valiosa información de entrada para la generación de IMM.

(Alcántara-Ayala y Murillo-García, 2008; Kirschbaum *et al.*, 2015; Valenzuela *et al.*, 2017). La carencia de una metodología globalmente aceptada para la elaboración de IMM ha llevado al desarrollo de distintos esquemas de documentación dependiendo la finalidad para la cual sea elaborado el IMM (Keefer, 1984; Van Den Eeckhaut y Hervás, 2012; Guzzetti *et al.*, 2012; Kirschbaum *et al.*, 2015; Xu, 2015; CRED 2017). Esta situación se ve reflejada en México, pese a ser uno de los países líderes en investigación referente a inestabilidades de ladera en América Latina (Sepúlveda y Petley, 2015). Alcántara Ayala y Murillo García (2008) presentan una propuesta para la elaboración de un inventario nacional de movimientos en masa basada en la documentación de la ubicación, tipología, geología, geometría, estado de actividad, condiciones hidrológicas, características físico-mecánicas de los materiales, causas y afectaciones para cada uno de los movimientos en masa identificados. Otros análisis desarrollados en el país se han centrado en evaluaciones regionales de susceptibilidad y zonificación de peligro a partir de casos particulares e IMM (Capra *et al.*, 2003; Alcántara-Ayala, 2004; Lugo-Hubp *et al.*, 2005; García-Palomo *et al.*, 2006; Keefer *et al.*, 2006; Hernández-Madrigal *et al.*, 2007; Ochoa-Tejeda y Parrot, 2007; Hernández-Madrigal *et al.*, 2011; Sánchez-Núñez *et al.*, 2012; Muñiz-Jauregui y Hernández-Madrigal, 2012; Legorreta-Paulín *et al.*, 2014; Murillo-García *et al.*, 2015).

En este artículo y como fase inicial de la evaluación del peligro por movimientos en masa en la zona centro-sur del estado de Nuevo León, se presenta un inventario de movimientos en masa en mapas escala 1:100,000 para el cañón Santa Rosa (CSR) en el tramo que comunica los municipios de Linares e Iturbide. A partir de trabajo de campo e interpretación visual de imágenes satelitales Landsat así como del archivo histórico de *Google Earth* se identificaron movimientos en masa ocurridos durante los últimos 30 años en el CSR. Los eventos fueron clasificados según la propuesta de Varnes (1978), reportando la ubicación, tipo, condicionantes y detonantes principales para los eventos reportados en la región. El estado de actividad, área de afectación y volumen no es reportado debido a la falta de información para la totalidad de los eventos identificados. La mayoría de los eventos registrados han sido desencadenados por precipitaciones extremas asociadas a huracanes y tormentas tropicales provenientes del Golfo de México y con alta recurrencia en la zona de estudio. Sin embargo, el marcado incremento de sismicidad en el noreste de México presenta el marco para proponer a esta actividad como el segundo detonante potencial de inestabilidad de laderas a nivel regional. La terminología referente a evaluaciones de riesgos por movimientos en masa utilizada en este trabajo es referida a las definiciones propuestas por CENAPRED (2014).

ÁREA DE ESTUDIO

Localización

El CSR se encuentra localizado entre los municipios de Linares e Iturbide, en la parte central del estado de Nuevo León (Figura 1), con una superficie aproximada de 77 km². La única vía de acceso es a través de la Carretera Nacional #58, la cual comunica el noreste del país con el Altiplano Mexicano y que constantemente se ve afectada por bloqueos de tramos carreteros debido a inestabilidades de laderas. El área de estudio presenta cambios topográficos muy marcados con pendientes que oscilan entre 0 y 15° en valles intramontanos, hasta desfiladeros con inclinaciones >70°. La temperatura promedio es de 18 °C de acuerdo con el registro histórico de dos estaciones climatológicas operadas por CONAGUA dentro del CSR: Santa Rosa (ID 19193) e Iturbide (ID 19027) (Figura 1). De acuerdo con el INEGI, la zona de estudio presenta un clima templado subhúmedo.

Marco geológico

El CSR se ubica en el sector sur de la Saliente de Monterrey (Padilla y Sánchez, 1985), rasgo estructural englobado dentro de la Sierra Madre Oriental (SMO) que se caracteriza por una secuencia sedimentaria marina compuesta de evaporitas, facies clásticas y carbonatadas del Mesozoico depositadas discordantemente sobre un basamento Precámbrico–Paleozoico. Ambos complejos litoestratigráficos fueron deformados durante la Orogenia Laramide en el Cretácico Tardío, lo cual se ha relacionado con cambios en el ángulo de subducción en el Pacífico de la placa Farallón y la acreción de terrenos tectonoestratigráficos (Goldhammer, 1999; Eguiluz de Antuñano *et al.*, 2000; Zhou *et al.*, 2006). El CSR se encuentra en el frente tectónico de la SMO, donde se expone un abrupto contraste topográfico entre el frente montañoso con elevaciones de hasta 2,400 m s.n.m. y un marcado descenso hacia el oriente en la Planicie Costera del Golfo de México (600 m s.n.m.). El área de estudio se caracteriza por pliegues apretados y elongados que se encuentran recostados, con planos axiales buzantes hacia el SW y vergencias dominantes hacia el NNE (Figura 1). A su vez, los pliegues se encuentran disectados por fallas inversas de bajo ángulo que sobreponen rocas del Jurásico Superior (cabalgadura principal) y Cretácico Inferior (cabalgadura secundaria) por encima de una secuencia predominantemente clástica del Cretácico Superior (Chávez Cabello *et al.*, 2011). La presencia de fallas laterales son recurrentes hacia el frente del cañón. Las crestas montañosas se encuentran coronadas por calizas masivas intercaladas con horizontes de margas, lutitas y nódulos de pedernal representando los relieves más escarpados. Lomeríos suaves constituidos por areniscas de grano medio, limolitas y lutitas con foliación bien desarrollada sobresalen en el núcleo de amplios sinclinales. Sobreyaciendo de manera discordante a estos materiales se encuentran brechas sedimentarias así como depósitos aluviales y coluviales no cementados del Cuaternario, constituidos principalmente por clastos de gravas y bloques angulosos soportados por una matriz de grano fino.

Marco sismotectónico

Debido a su ubicación distante respecto a la margen activa en la porción suroccidental de México, la falta de sismicidad periódica y el registro instrumental histórico, el noreste de México es considerado como una zona de baja actividad sísmica. Reportes de sismicidad histórica han sido documentados a partir de crónicas y relatos históricos (García Acosta y Suárez Reynoso, 1996; Galván-Ramírez y Montalvo-Arrieta, 2008). La sismicidad en el noreste de México ha sido relacionada con reactivaciones de paleoestructuras corticales y zonas de sutura continental (Ramos-Zúñiga *et al.*, 2012). La sismicidad documentada dentro de la Sierra Madre Oriental es de baja a moderada magnitud (Figura 2). Algunos de estos sismos han sido percibidos en centros urbanos localizados a lo largo de la cadena montañosa (Montalvo-Arrieta *et al.*, 2015). En la proximidad al CSR, la actividad sísmica recientemente registrada y de mayor intensidad se asocia con 63 sismos que ocurrieron en el frente tectónico de la SMO de julio a diciembre del 2012, con magnitudes en el rango de $2.8 \leq M \leq 3.6$ e hipocentros a 8 ± 5 km de profundidad (Gómez-Arredondo *et al.*, 2016). El mayor número de eventos, así como las magnitudes más grandes de toda la secuencia ($M \leq 3.6$) ocurrieron en la primera fase del enjambre, durante los meses de julio y agosto. Pese a su baja magnitud, varios de los eventos fueron percibidos por habitantes de comunidades rurales asentadas dentro del CSR, incluso reportando daños menores en casas y propiedades (Gómez-Arredondo *et al.*, 2016; datos nuestros no publicados). Se han propuesto potenciales sismos de mayor magnitud ($M \geq 6.5$) a partir de la documentación de catálogos sísmicos (Galván-Ramírez y Montalvo-Arrieta, 2008; Zúñiga *et al.*, 2017) y reactivaciones de fallas del basamento (Ramos-Zúñiga *et al.*, 2012). Sismos de estas magnitudes provocarían una gran cantidad de movimientos en masa catastróficos,

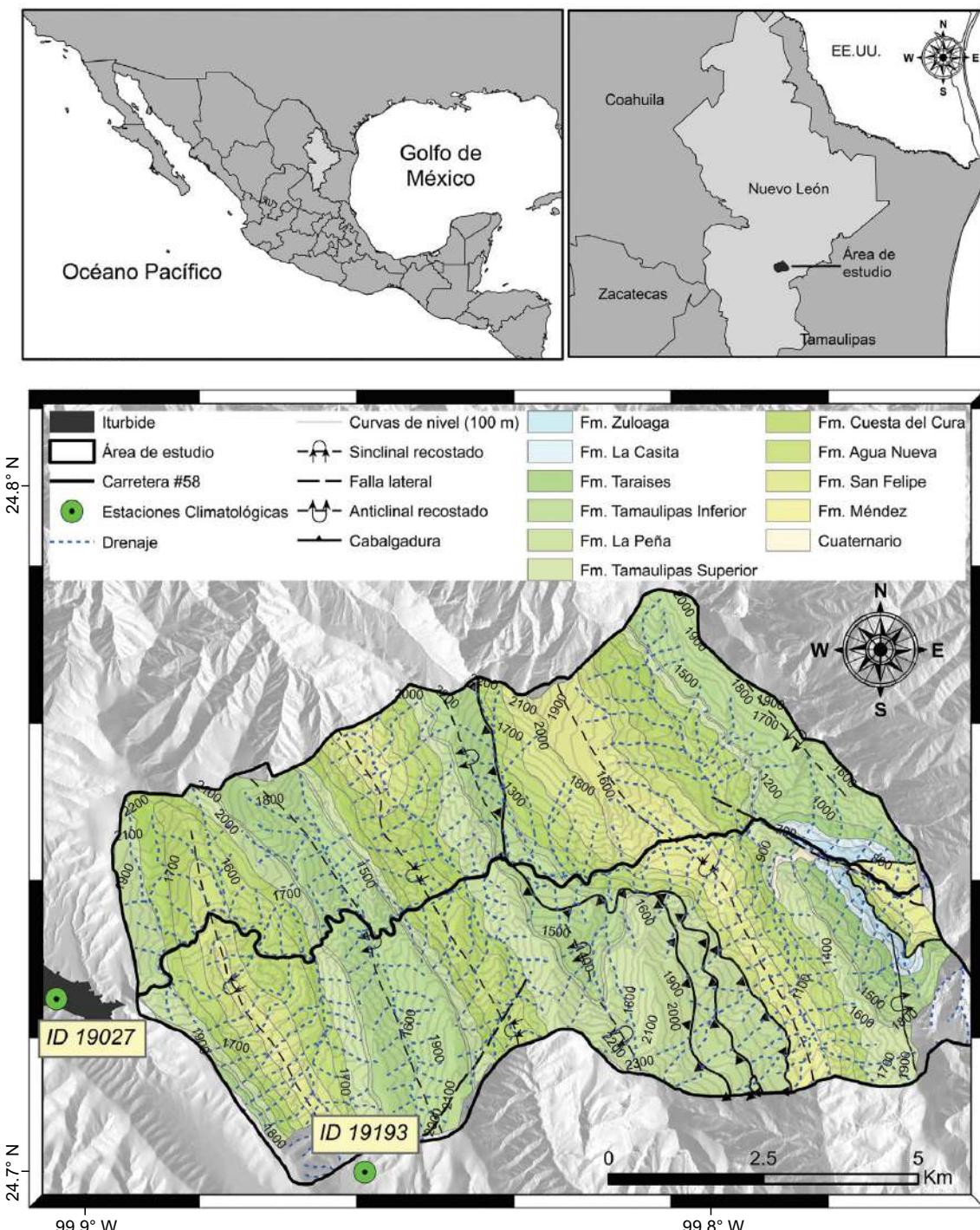


Figura 1. Localización y mapa geológico del área de estudio. Estaciones climatológicas ID 19027 Iturbide; ID 19193 Santa Rosa. Adaptado de las Cartas Geológicas-Mineras Hualahuises G14-C57 (SGM, 2015) e Iturbide G14-C67 (SGM, 2010).

serias afectaciones a la infraestructura civil e incluso pérdida de vidas en varias ciudades asentadas sobre las zonas montañosas (*e.g.*, área metropolitana de Monterrey; Salinas-Jasso *et al.*, 2017).

Régimen hidrológico

El área de estudio se ubica dentro de la Región Hidrológica No. 25 San Fernando - Soto La Marina, con una precipitación media anual aproximada de 700 mm. El patrón de drenaje, condicionado por la

intensidad de fracturamiento intraformacional, presenta un arreglo rectangular - enrejado y encauzado hacia el arroyo Santa Rosa, el cual cruza el CSR en dirección Oeste-Este hasta descargar en la Planicie Costera del Golfo de México. El sistema de drenaje presenta su mayor caudal durante los períodos de lluvia, principalmente a finales de julio y extendiéndose hasta inicios de octubre, aunque eventos ocasionales ocurren entre mayo y junio (Figura 3). Históricamente, septiembre registra la mayor acumulación mensual de precipitación con cerca de

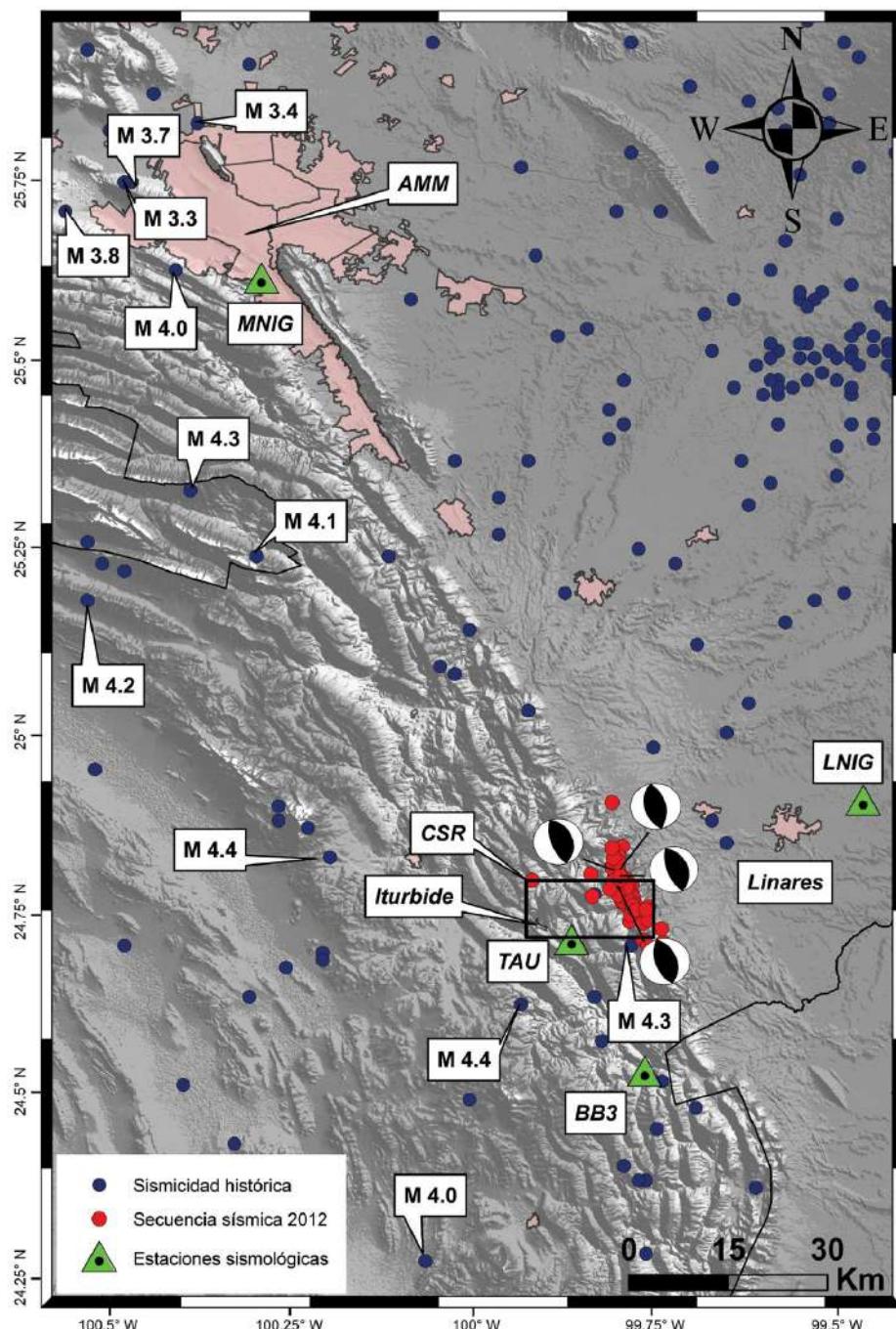


Figura 2. Sismicidad histórica a lo largo de la Sierra Madre Oriental (puntos azules). Los sismos más grandes cerca del área metropolitana de Monterrey (AMM) también son definidos. Los puntos rojos marcan la ubicación epicentral para la secuencia sísmica ocurrida de julio a diciembre de 2012. Los mecanismos focales fueron obtenidos por Gómez-Arredondo *et al.* (2016). Estaciones sismológicas: LNIG, Linares; MNIG, Monterrey; TAU, Bosque Escuela; y BB3, Camarones.

un tercio de la precipitación anual registrada, lapso en que se presenta la mayor cantidad de tormentas y huracanes en el hemisferio norte y que guarda estrecha relación con la ocurrencia de movimientos en masa en América del Norte (Kirschbaum *et al.*, 2015). Debido a su ubicación geográfica, el CSR se encuentra expuesto al impacto recurrente de huracanes y tormentas tropicales provenientes del océano Atlántico. Durante los últimos 120 años, 45 fenómenos hidrometeorológicos impactaron el noreste de México (Jáuregui, 2003; Montalvo-Arrieta *et al.*, 2009). El fenómeno que más destaca por la cantidad de lluvia precipitada es el huracán Alex en 2010. Aunque menos intenso que el

huracán Gilberto en 1988 (categoría 3) y el cual es considerado como uno de los ciclones tropicales más devastadores en el siglo XX, las precipitaciones ocasionadas por el huracán Alex superaron los registros históricos de lluvia acumulada. En el CSR, CONAGUA registró en las estaciones 19027 y 19193 acumulaciones de 336 mm y 312 mm en un lapso de 24 horas, respectivamente (CONAGUA 2016). La Tabla 1 muestra el registro de las precipitaciones descargadas en un lapso de 24 horas para cada uno de los meteoros que han impactado el CSR durante los últimos 30 años. Para algunos de los eventos, las precipitaciones registradas superan los umbrales de precipitación >100 mm

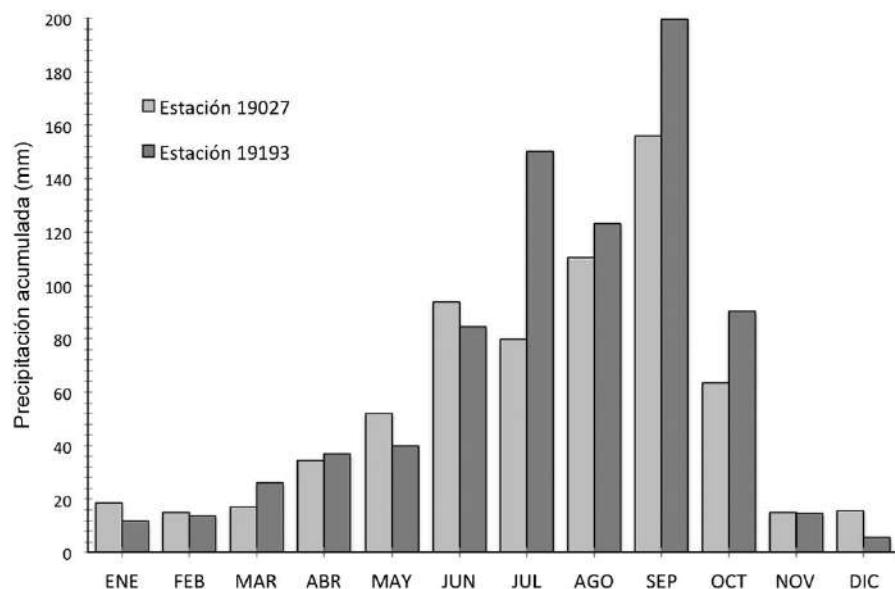


Figura 3. Registros de precipitación media mensual acumulada para las estaciones 19027 Iturbide y 19193 Santa Rosa. Datos recolectados por CONAGUA para el lapso 1951-2014 (CONAGUA, 2016).

propuestos a nivel global (Caine, 1980; Gostelow 1996; Aleotti, 2004) y regional >200 mm (Montalvo-Arrieta *et al.*, 2009) como acumulación crítica y desencadenante de deslizamientos someros (espesor <3 m) y flujos de detritos.

Antecedentes de inestabilidad de laderas

La documentación de movimientos en masa en el CSR es escasa (*e.g.*, Pedraza Rodríguez 1997; datos nuestros no publicados). Los medios de comunicación han hecho una notable aportación a la documentación de eventos regionales, aunque sus notas se han limitado a aquellos eventos que han afectado la Carretera #58. La información más completa es la reportada por INEGI en la plataforma Mapa Digital de México, la cual documenta y almacena reportes de movimientos en masa para todo el país (INEGI, 2017). Para el área de estudio, INEGI reporta 75 movimientos en masa. Cada evento presenta una estructura donde se puede consultar la ubicación geográfica (coordenadas en grados decimales), municipio o localidad de referencia, tipología y material involucrado en el evento, así como el factor detonante. Para algunos casos, el volumen involucrado y reportes de afectación están disponibles. Para todos los eventos registrados por INEGI para el CSR se reporta como agente desencadenante eventos hidrometeorológicos. Sin embargo, no existe reporte de fecha de ocurrencia o del registro del dato, lo cual impide relacionar el movimiento en masa con algún evento de precipitación en particular. La mayoría de las inestabilidades de ladera reportadas por el INEGI (85 %) se encuentran distribuidas a lo largo del arroyo Santa Rosa y en algunos casos paralelos a la Carretera Federal #58. Sólo el 15 % de los eventos se encuentran a lo largo de los tributarios, representación subestimada de la influencia de escorrentías en la generación/reactivación de movimientos en masa. Las tipologías predominantes en orden decreciente reportadas por INEGI son flujos (67 %), caídos (22 %) y deslizamientos (11 %). CENAPRED cuenta con el Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas, sistema que presenta una zonación nacional de la ocurrencia de movimientos en masa. La zona de estudio se encuentra dentro de la región denominada "Golfo Norte", sin embargo, no se presentan mayores detalles. Se han realizado caracterizaciones de paleo movimientos en masa dentro del CSR y en áreas aledañas (Chapa Guerrero, 1996; Medina Barrera,

1996). La presencia de paleo movimientos en masa (*e.g.*, El Calabozo) y la formación de paleolagos intermontanos a lo largo del cauce del arroyo Santa Rosa (*e.g.*, Los Pinos) supone procesos geomorfológicos mayores en el pasado, hipotéticamente durante el Plioceno, bajo condiciones climatológicas de alta humedad distintas a las actuales (Pedraza Rodríguez 1997; Ruiz y Werner, 1997). Para estos eventos se han propuesto detonantes hidrometeorológicos, descartando la sismicidad como agente potencial. Se han documentado 59 movimientos en masa inducidos por la secuencia sísmica ocurrida durante julio a diciembre del 2012 (Tabla 2), a partir del análisis de imágenes satelitales de alta resolución SPOT 5 así como trabajo de campo (datos nuestros no publicados). Ese trabajo constituye la única evidencia de movimientos en masa inducidos por sismicidad en el noreste de México. Durante esta actividad sísmica, las tipologías predominantes fueron caídos y deslizamientos someros. La mayor cantidad de los eventos ocurrieron en pendientes >35° y cerca de crestas topográficas, por lo que la influencia de los efectos topográficos puede ser sustentada (Ashford *et al.*, 1997).

Los daños asociados con los movimientos en masa se relacionan con la obstrucción parcial e incluso destrucción de tramos a lo largo de la Carretera Federal #58, acentuándose durante la temporada de lluvias y quedando constatado en reportes periodísticos. Un caso sobresaliente fue el colapso del mural conocido como "Los Altares"

Tabla 1. Datos de precipitación acumulada para cuatro huracanes que han impactado el CSR en los últimos 30 años: Gilberto (1988), Erika (2003), Emily (2005) y Alex (2010). El año de ocurrencia, la categoría cuando el hidromетеoro impactó en tierra firme y la precipitación acumulada en un lapso de 24 horas en las estaciones climatológicas localizadas en el área de estudio, son presentados.

Huracán	Año	Categoría Saffir-Simpson	Precipitación acumulada en 24 horas	
			19193	19027
Gilberto	1988	4	Sin registro	252 mm
Erika	2003	1	158 mm	231 mm
Emily	2005	3	180 mm	158 mm
Alex	2010	2	312 mm	336 mm

Tabla 2. Lista de sismos detonantes de movimientos en masa en el CSR durante la fase inicial del enjambre sísmico ocurrido en el año 2012 (Servicio Sismológico Nacional, 2016; Gómez Arredondo *et al.*, 2016).

Fecha	Latitud Norte	Longitud Oeste	Hora	Magnitud	Profundidad km
15/07/2012	24.782°	99.779°	19:46:01	3.3	20
21/07/2012	24.704°	99.737°	13:32:07	3.3	20
22/07/2012	24.895°	99.806°	09:58:17	3.3	34
22/07/2012	24.803°	99.797°	10:07:25	3.6	20
22/07/2012	24.795°	99.795°	12:31:31	3.4	11
23/07/2012	24.777°	99.789°	03:27:12	3.6	20
23/07/2012	24.808°	99.806°	05:11:00	3.0	20
23/07/2012	24.787°	99.797°	06:24:32	3.3	20
23/07/2012	24.753°	99.756°	11:09:41	3.2	20
23/07/2012	24.774°	99.787°	12:34:14	3.3	20
23/07/2012	24.835°	99.792°	12:41:35	3.4	20
23/07/2012	24.77°	99.779°	20:16:31	3.5	20
23/07/2012	24.777°	99.79°	22:07:31	3.6	20
24/07/2012	24.759°	99.793°	06:03:49	3.5	20
24/07/2012	24.78°	99.797°	06:25:47	3.4	38
24/07/2012	24.822°	99.797°	07:48:30	3.1	20
24/07/2012	24.796°	99.802°	09:30:41	3.0	20
24/07/2012	24.806°	99.806°	11:27:18	3.4	28
24/07/2012	24.79°	99.789°	13:23:55	3.5	20
24/07/2012	24.772°	99.793°	19:01:39	3.2	20
24/07/2012	24.754°	99.786°	23:54:17	3.6	4
25/07/2012	24.733°	99.782°	01:22:26	3.5	20
25/07/2012	24.767°	99.792°	11:03:50	3.4	20
25/07/2012	24.755°	99.788°	15:52:00	3.5	20
25/07/2012	24.742°	99.781°	16:47:44	3.4	20
25/07/2012	24.76°	99.79°	19:28:05	3.5	20
29/07/2012	24.761°	99.781°	09:49:07	3.5	20
29/07/2012	24.813°	99.797°	10:35:27	3.4	20
29/07/2012	24.765°	99.777°	10:38:04	3.5	20
29/07/2012	24.782°	99.793°	11:41:06	3.5	20
29/07/2012	24.74°	99.767°	11:50:37	3.4	20
29/07/2012	24.776°	99.788°	18:39:27	3.4	20
29/07/2012	24.786°	99.794°	18:43:40	3.5	20
02/08/2012	24.756°	99.775°	01:53:43	3.2	10
02/08/2012	24.7516°	99.771°	02:33:49	3.2	10
02/08/2012	24.671°	99.712°	06:51:04	3.0	5
02/08/2012	24.7375°	99.766°	07:41:20	2.9	20
02/08/2012	24.8195°	99.804°	08:29:50	3.0	20
02/08/2012	24.766°	99.786°	08:53:26	3.0	20
02/08/2012	24.833°	99.806°	09:27:16	2.9	20
03/08/2012	24.784°	99.784°	00:47:13	3.0	20
03/08/2012	24.791°	99.787°	00:51:11	3.1	20
03/08/2012	24.754°	99.778°	01:52:07	3.0	5
03/08/2012	24.693°	99.728°	01:56:10	3.2	19.5
05/08/2012	24.748°	99.774°	01:54:56	3.0	20
06/08/2012	24.7303°	99.764°	03:10:57	2.8	20
06/08/2012	24.7895°	99.791°	03:17:53	3.0	20
09/08/2012	24.748°	99.757°	18:42:37	3.2	20
10/08/2012	24.779°	99.786°	06:28:40	3.1	20

en junio 2002 después de lluvias torrenciales. Este evento provocó el cierre de la carretera y afectación del paraje turístico adjunto a la zona de desprendimiento. El monumento tallado en piedra colapsó parcialmente debido a la presión intersticial producida por la infiltración del agua en el sustrato rocoso (Figura 4). La apertura de los sistemas de fracturas paralelos a la superficie de la ladera, las oquedades producidas durante la misma elaboración del mural y la acumulación de agua debido a precipitaciones predispusieron la ocurrencia de este evento. Finalmente, el muro colapsó en su totalidad después de las lluvias generadas por el huracán Alex en el 2010.

METODOLOGÍA

Investigación de campo

Desde el año 2012 se han realizado varias visitas de campo a la zona de estudio con el fin de identificar de manera directa movimientos en masa y reconocer futuras zonas potenciales a inestabilidades de ladera. Las principales rutas de investigación se han trazado a lo largo de la Carretera #58 y el cauce del arroyo Santa Rosa, siendo la cabecera del municipio de Iturbide el límite del recorrido. Para zonas aledañas al trazo de la carretera y con los puntos de acceso más difícil se realizaron sobrevuelos de reconocimiento en helicóptero. Reportes de medios de comunicación y relatos de habitantes de las comunidades rurales asentadas dentro del CSR ayudaron en gran medida en la identificación de algunos eventos y la documentación de daños. Los movimientos en masa fueron identificados con un sistema de posicionamiento global (GPS) y registrados como puntos con coordenadas geográficas XY en sistema WGS 1984.

Sensores remotos

Debido a la inaccesibilidad en algunas zonas del área de estudio, el proceso de identificación de movimientos en masa se apoyó en el análisis visual e interpretación de imágenes de satélites Landsat 5, 7 y 8, comprendiendo un lapso de análisis de 1980 a 2015. Las imágenes analizadas cuentan con resoluciones espaciales de 15 y 30 m y con nula cobertura de nubosidad. Los períodos de órbita sobre un mismo punto en la superficie terrestre en promedio ronda los 16 días. La revisión visual de imágenes satelitales se enfocó en documentar los eventos detonados por los mayores eventos hidrometeorológicos que han impactado el CSR en los últimos 30 años: los huracanes Gilberto (1988), Erika (2003), Emily (2005) y Alex (2010). Las resoluciones espaciales de las imágenes satelitales Landsat (15–30 m) condicionaron la identificación de movimientos en masa sólo para eventos con dimensiones mayores a las mismas y claramente visibles. Además, se revisó el archivo histórico de la plataforma *Google Earth* (resolución de 0.5 m) útiles para la identificación de movimientos en masa pequeños como caídos y deslizamientos someros (Petley, 2012), lo cual ayudó a la identificación de eventos involuntariamente omitidos en las imágenes Landsat. Para el área de estudio, *Google Earth* cuenta con imágenes históricas que datan del año 2003. Para cada uno de los huracanes se analizaron y compararon distintas imágenes multitemporales. Las fechas de las distintas imágenes analizadas estuvieron sujetas a la fecha de ocurrencia de los eventos hidrometeorológicos. Por lo tanto, la identificación de precipitaciones extraordinarias surgió a partir de la revisión de los registros climatológicos diarios provistos por CONAGUA (CONAGUA, 2016) e información no publicada y amablemente aportada por el Organismo de Cuenca Río Bravo de la misma dependencia. Las imágenes previas al evento hidrometeorológico fueron catalogadas como "Antes" y aquellas escenas posteriores al evento bajo estudio como "Después", siendo en estas escenas donde se marcaron los movimientos en masa identificados (Figura 5). La información recopilada fue revisada de



Figura 4. Movimiento en masa en "Los Altares". El mural tallado en piedra ("Antes", imagen tomada del blog <http://tierraregia.com/mi-ciudad/mi-ciudad-mi-historia-iturbide-n-l>, acceso 3 Enero 2017) colapsó en Junio del 2002 debido a lluvias torrenciales, originando bloqueo del tramo carretero y destruyendo parcialmente el paraje turístico provisto para esparcimiento familiar ("Después", imagen tomada del blog <http://www.flickr.com/photos/cadeva/41919996/>, acceso 3 Enero 2017).

manera visual marcando todos los cambios notables entre las imágenes de comparación, lo cual excluye errores de interpretación asociados con interpretaciones automatizadas en Sistemas de Información Geográfica bajo análisis digitales (Xu, 2015). Varios criterios fueron aplicados en la identificación de un movimiento en masa a partir de imágenes satelitales. La morfología y trayectoria de los materiales desplazados son claramente visibles en la escena catalogada como "Después", pero no en la escena "Antes". Para esto, un claro contraste de tonalidades entre la "reciente" masa desplazada y sus alrededores es reconocido, indicando remoción de vegetación o de materiales altamente susceptibles (e.g., coluvión). Esto sirvió para discriminar con aquellos cambios que marcaran situaciones distintas a la ocurrencia de inestabilidades de ladera (e.g., recuperación de vegetación en zonas previamente afectadas). La identificación de aspectos morfológicos

como escarpes, grietas y la delimitación exacta de la parte distal (pie) para todos los eventos presentó dificultades debido a las resoluciones espaciales (Landsat) y distorsión en algunas zonas (Google Earth) en las imágenes consultadas. Modelos Digitales de Terreno (MDT) con resolución de hasta 5 m derivados con tecnología del tipo LiDAR y provistos por INEGI (INEGI, 2016) fueron procesados con el fin de documentar estructuras no reconocibles por la cubierta vegetal en las imágenes satelitales. A partir de los MDT se crearon mapas de sombras (*hillshade map*) en un Sistema de Información Geográfica. Los mapas de sombras fueron generados con variaciones en el ángulo de azimut y el ángulo de elevación de la fuente de luz buscando contrastar la traza de movimientos en masa. La presencia de escarpes, superficies convexas al pie de la ladera, desplazamientos anormales del sistema de drenaje y cambios abruptos en la pendiente fueron criterios uti-



Figura 5. Comparación entre imágenes temporales para la delimitación de movimientos en masa. La imagen izquierda, "Antes", ilustra las condiciones de la ladera previas al impacto del huracán Alex en 2010. En la imagen derecha, "Después", se aprecia el escarpe y la trayectoria de un flujo de rocas y detritos (polígono negro) cerca de la comunidad de Los Pinos (coordenadas 24.7349° N, 99.8317° W).

lizados para definir indicios de deslizamientos rotacionales, flujos y avalanchas en los mapas de sombras (Van Den Eeckhaut *et al.*, 2007; Jaboyedoff *et al.*, 2012).

RESULTADOS

Un total de 429 movimientos en masa ocurridos durante los últimos 30 años fueron identificados y marcados como puntos sobre distintos mapas base, escala 1:100,000. La mayor cantidad de movimientos en masa documentados (86 %) ocurrieron como consecuencia de precipitaciones extraordinarias. El 14 % restante corresponde a eventos inducidos por la secuencia sísmica ocurrida durante el año 2012, hasta ahora la única evidencia de movimientos en masa inducidos por sismicidad en el noreste de México (datos nuestros no publicados). La Tabla 3 muestra la ubicación, tipo, litología, detonante y afectación para algunos de los movimientos en masa identificados en el CSR para el periodo de análisis. Caídos, deslizamientos y flujos constituyen los principales movimientos en masa en la región (Figura 6). La ocurrencia de estas tipologías está fuertemente controlada por la disposición espacial y geométrica de discontinuidades estructurales, las inclinaciones de éstas respecto a la pendiente, los materiales que constituyen la misma y la influencia de lluvias torrenciales. El patrón estructural diseca la estratificación en bloques y columnas de dimensiones variables, incluso disgregando completamente el macizo rocoso en los materiales mecánicamente menos competentes (Figura 7a). Los sistemas de fracturas pueden alcanzar varios centímetros de apertura, presentando conductos preferenciales para el flujo de agua. Marcas de *karren* dan indicio de la intensidad con la que el agua circundante ataca los materiales calcáreos, predisponiéndolos a una alta susceptibilidad a fallar en condiciones de metaestabilidad bajo influencia de agentes externos (Figura 7b). Debido a la intensidad y disposición geométrica entre las discontinuidades se presentan roturas planas y en forma de cuña en los macizos rocosos. Sin embargo, roturas por pandeo y vuelco son comunes en laderas con estratificación vertical y sistemas de fracturas ortogonales. Roturas cóncavas son típicas en materiales blandos y suelos.

Los caídos constituyen la tipología de movimientos en masa más recurrente en el CSR. Estos movimientos se caracterizan por desprendimientos de fragmentos de dimensiones variables desde pendientes abruptas afectando las distintas litologías. La fuente de los caídos se encuentra en sustratos calcáreo-arcillosos altamente fracturados, aunque también son frecuentes en depósitos no consolidados de gran altura, por lo cual su distribución es dispersa. La trayectoria de los materiales desplazados puede ser errática debido a las dimensiones de los bloques desplazados, la morfología y materiales que constituyen la pendiente, la velocidad de transporte y la colisión contra obstáculos presentes en la ladera, como vegetación y masas de coluvión preexistentes. Generalmente, las zonas de depósito se encuentran cercanas a la fuente. Sin embargo, trazas de caídos pueden extenderse varias decenas de metros, principalmente para bloques desprendidos desde las elevaciones más altas. El depósito de los materiales desplazados por estos mecanismos resulta en acumulaciones de fragmentos irregulares y angulares no consolidados de dimensiones variables. A su vez, estas acumulaciones representan masas que potencialmente se pueden desplazar, principalmente como deslizamientos o flujos, durante precipitaciones extremas, aunque su desplazamiento también es viable bajo la influencia de agentes sísmicos. La presencia de depósitos de caídos dentro de arroyos es común, en donde en algunos casos se reconocen las marcas de impacto, el material desplazado y restos de vegetación (Figura 7c). La situación de peligro para caídos es relativa al tamaño de los bloques desplazados. El desprendimiento de bloques de varios

Tabla 3. Movimientos en masa selectos. ID 1–15: Investigación de campo; ID 16–30: Sensores remotos; ID 31–40: INEGI; ID 41–50: datos nuestros no publicados. Tipo: C, caído; F, flujo; V, vuelco; D, deslizamiento. Litología: Cal, caliza; Lut, lutita; Mar, marga; Det, detritos.

ID	Latitud Norte	Longitud Oeste	Tipo	Litología	Detonante	Afectación
1	24.7477°	99.8102°	C	Lut	Lluvia	Carretera
2	24.7446°	99.8179°	D	Cal	Lluvia	Carretera
3	24.7465°	99.8414°	F	Lut-Mar	Lluvia	-
4	24.7471°	99.8394°	C	Lut-Mar	Sismo	-
5	24.7439°	99.8129°	D	Det	Sismo	-
6	24.7369°	99.7572°	F	Lut-Mar	Lluvia	-
7	24.7420°	99.8063°	C	Cal	Sismo	-
8	24.7368°	99.8509°	V	Cal	Lluvia	Carretera
9	24.7379°	99.8368°	C	Cal	Incierto	-
10	24.7445°	99.8390°	C	Det	Sismo	-
11	24.7350°	99.8308°	F	Cal	Lluvia	-
12	24.7288°	99.8870°	D	Cal	Lluvia	-
13	24.7335°	99.8827°	F	Det	Lluvia	-
14	24.7317°	99.8658°	F	Det	Lluvia	-
15	24.7429°	99.8249°	F	Det	Lluvia	-
16	24.7436°	99.8868°	D	Det	Lluvia	-
17	24.7474°	99.8820°	C	Cal	Lluvia	-
18	24.7521°	99.8638°	F	Det	Lluvia	-
19	24.7546°	99.8384°	D	Det	Lluvia	-
20	24.7605°	99.8369°	D	Det	Lluvia	-
21	24.7500°	99.8418°	C	Cal	Lluvia	-
22	24.7244°	99.8597°	D	Det	Lluvia	-
23	24.7284°	99.8318°	F	Cal	Lluvia	-
24	24.7241°	99.8463°	F	Cal-Mar	Lluvia	-
25	24.7338°	99.8087°	C	Cal	Lluvia	-
26	24.7267°	99.8067°	F	Lut-Mar	Lluvia	-
27	24.7201°	99.8017°	D	Det	Lluvia	-
28	24.7261°	99.7763°	F	Det	Lluvia	-
29	24.7453°	99.7830°	D	Det	Lluvia	-
30	24.7504°	99.7718°	C	Cal	Lluvia	-
31	24.7376°	99.8799°	C	Cal-Mar	Lluvia	Carretera
32	24.7486°	99.8089°	C	Cal-Lut	Lluvia	Carretera
33	24.7467°	99.8110°	D	Cal-Lut	Lluvia	Carretera
34	24.7413°	99.8168°	F	Cal	Lluvia	-
35	24.7317°	99.8638°	D	Cal	Lluvia	Carretera
36	24.7652°	99.8561°	F	Cal-Lut	Lluvia	-
37	24.7359°	99.8514°	C	Cal	Lluvia	Carretera
38	24.7369°	99.8606°	F	Cal	Lluvia	Carretera
39	24.7325°	99.8877°	F	Cal	Lluvia	-
40	24.7250°	99.8917°	D	Cal	Lluvia	Carretera
41	24.7197°	99.7828°	C	Cal	Sismo	-
42	24.7359°	99.8488°	D	Det	Sismo	-
43	24.7228°	99.8239°	C	Cal	Sismo	-
44	24.7324°	99.8357°	C	Cal	Sismo	-
45	24.7302°	99.8439°	D	Det	Sismo	-
46	24.7360°	99.8556°	D	Det	Sismo	-
47	24.7471°	99.8388°	D	Det	Sismo	-
48	24.7487°	99.8374°	D	Det	Sismo	-
49	24.7517°	99.8220°	C	Det	Sismo	-
50	24.7585°	99.7831°	C	Cal	Sismo	-



Figura 6. Ejemplos de movimientos en masa documentados a partir de investigación de campo a lo largo del cañón Santa Rosa. Desencadenante: (P) precipitaciones, (S) sismidad.

metros de longitud presenta serias complicaciones cuando la trayectoria de desplazamiento abarca la carretera, provocando serias afectaciones e incluso cierres totales al tránsito.

Los deslizamientos son típicos en litologías carbonatadas con patrón de fracturamiento ortogonal y sistemas de cuñas, marcando planos de discontinuidades bien definidos (Figura 7d). La relación de inclinaciones entre los planos de discontinuidades y las laderas representa un condicionante importante en la ocurrencia de estos eventos. La distancia de depósito de los materiales deslizados respecto a la fuente es relativa al ángulo de la pendiente: a mayor inclinación mayor distancia de desplazamiento, aunque la misma es condicionada por los obstáculos que se puedan presentar durante el trayecto del deslizamiento. Ya que estos eventos pueden generar el transporte de volúmenes considerables de material, se consideran tipologías altamente peligrosas a lo largo de la carretera, provocando recurrentemente bloqueos en la misma.

Los flujos de detritos se caracterizan por movimientos caóticos de materiales terrestres en medios sobresaturados de agua sin presentar superficies de rotura bien definidas, produciendo deformación interna de la masa desplazada. Estos movimientos son pocos profundos en relación con su extensión y generalmente son iniciados como deslizamientos. Los depósitos de flujos se encuentran constituidos por intercalaciones caóticas de bloques angulosos de calizas y fragmentos de lutitas, margas y areniscas embebidos en matrices de partículas limo-arcillosas con presencia de gravas altamente permeables. Debido a la

precaria inestabilidad de los depósitos después del desplazamiento, los depósitos de flujos presentan zonas potenciales de reactivación durante épocas de lluvias (Figura 7e). No existe límite respecto al tamaño de los materiales que pueden ser transportados en condiciones de flujo. Estos mecanismos pueden alcanzar velocidades y distancias considerables respecto a la fuente dependiendo de la morfología de la pendiente. Estas características dan a los flujos una categoría de alto peligro cuando ocurren cerca del trazo carretero. La principal ocurrencia de estos eventos se presenta a lo largo del sistema de drenaje.

Algunos movimientos en masa antiguos fueron identificados con ayuda de los modelos digitales de terreno y los mapas de sombras. Estas estructuras se encuentran cubiertas por densas capas de vegetación y sus límites erosionados por influencia hidrológica (Figura 8). Los paleomovimientos se caracterizan por la presencia de bloques dentro de las masas desplazadas, lo cual supone tasas de desplazamiento lentas y desintegración parcial únicamente del material intemperizado, representativo de mecanismos reptantes. Casos similares se han reportado en áreas aledañas al CSR (Chapa Guerrero, 1996). Indicios de potenciales reactivaciones de movimientos en masa antiguos se documentaron a partir de la identificación de grietas de tensión, con aperturas que alcanzan algunos decímetros, y rasgos de afectación en la vegetación (árboles curvados en favor de las pendientes, Figura 9). Los pulsos de reactivación pueden estar ligados al depósito de considerables acumulaciones de materiales sobre la cabecera de los paleo-

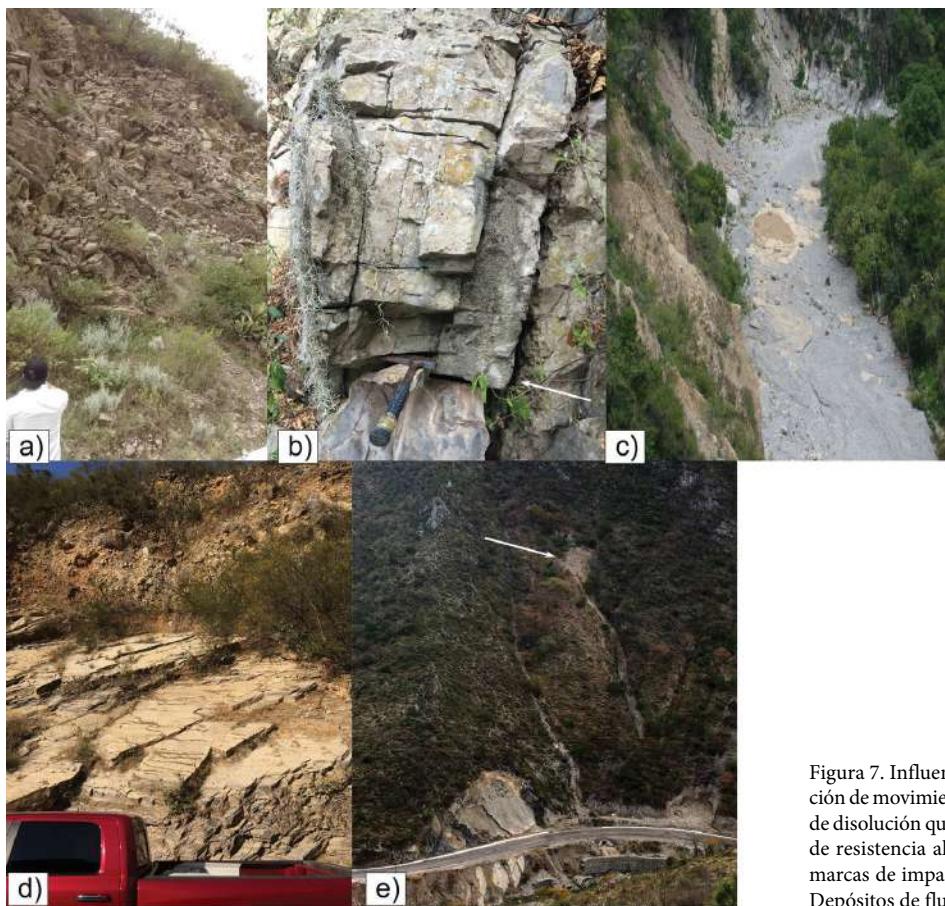


Figura 7. Influencia del control geológico-estructural en la generación de movimientos en masa en el cañón Santa Rosa (a y d). Indicios de disolución química por karstificación (flecha blanca) y reducción de resistencia al corte de materiales calcáreos (b). Distribución y marcas de impacto de caídos a lo largo del sistema de drenaje (c). Depósitos de flujo inestables a lo largo de la Carretera 58 (e).

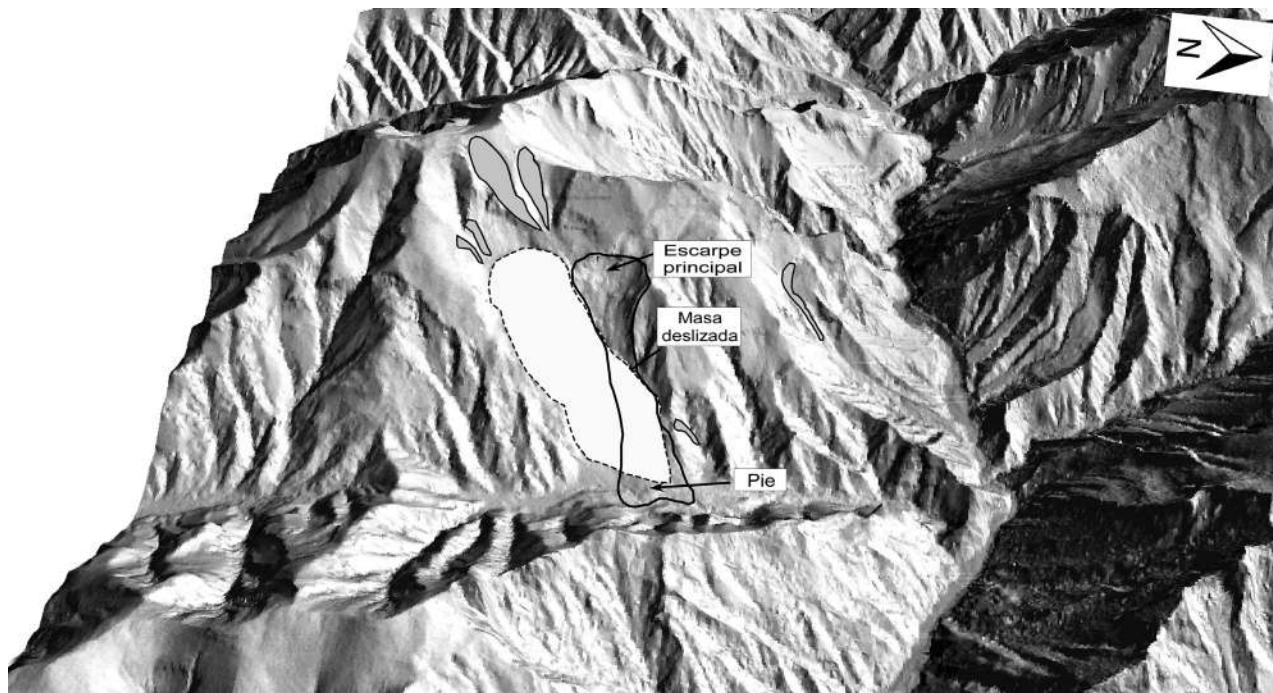


Figura 8. Mapa de sombras (*hillshade map*) obtenido a partir de un modelo digital de alta resolución (5×5 m) del tipo LiDAR (INEGI, 2016). Distintos movimientos en masa identificados en el mapa de sombras e imágenes satelitales, son presentados. Los polígonos con línea continua y punteada marcan paleomovimientos en masa perpendiculares al camino que comunica con Rancho Viejo - La Palma (coordenadas 24.7201° N, 99.8017° W). Algunos flujos de detritos son ilustrados en tono gris claro.

desplazamientos. Esta situación se vería manifestada en sobrecargas considerables a lo largo de la masa, principalmente en la cabecera, que inducen variaciones paulatinas en las condiciones de estabilidad (Fell *et al.*, 2007). En un punto crítico de estabilidad, y a medida que se acumulen depósitos de movimientos en masa, la reactivación sería inevitable, aunque la misma situación sería posible bajo la influencia de fenómenos naturales de grandes proporciones como huracanes y sismicidad moderada (Fell *et al.*, 2007; Salinas-Jasso *et al.*, 2017). Tal situación sería altamente peligrosa, aunque los potenciales daños serían esperados en el tramo carretero debido a la poca densidad de población en el CSR.

La Figura 10 muestra el mapa de inventario de movimientos en masa para el CSR ocurridos durante los últimos 30 años. Distintas simbologías han sido utilizadas para mostrar la distribución de los eventos detonados por distintos fenómenos hidrometeorológicos y sismicidad. Para eventos hidrometeorológicos se identificaron 295 movimientos en masa (simbología diversa), aunado a los 75 eventos reportados por INEGI (puntos blancos). Sin embargo, los reportes de INEGI carecen de información respecto a la fecha de ocurrencia y toma de dato, por lo cual se dificulta asociar cada evento a un fenómeno hidrometeorológico específico. La distribución espacial de los movimientos en masa inducidos por lluvias es dispersa en el área de estudio, aunque notables acumulaciones sobresalen a lo largo de la carretera y el sistema de drenaje. Los huracanes Alex (2010) y Gilberto (1988), los huracanes más potentes que han impactado el CSR en los últimos 30 años, han sido los eventos con mayor cantidad de movimientos en masa desencadenados: 75 y 60, respectivamente. En menor proporción, los huracanes Emily (2005) y Erika (2003) generaron 25 y 15 eventos, respectivamente. Otros eventos hidrometeorológicos como tormentas y precipitaciones aisladas detonaron 120 eventos durante el lapso de análisis. Caídos, flujos de detritos y deslizamientos planares fueron las tipologías predominantes durante estos meteoro. Deslizamientos rotacionales se presentaron sobre materiales limo-arcillosos a lo largo del arroyo Santa Rosa. Los puntos azules en la Figura 10 muestran 59

movimientos en masa detonados durante la fase inicial de la secuencia sísmica ocurrida durante el segundo semestre del año 2012. Caídos y deslizamientos someros de detritos fueron las principales tipologías desencadenadas por esta sismicidad. La ocurrencia de flujos, comunes en precipitaciones extraordinarias, fue nula durante el lapso de actividad de la secuencia sísmica. Esto es de esperarse debido a la baja magnitud sísmica ($2.8 \leq M \leq 3.6$) de los sismos ocurridos y a las condiciones hidrológicas que prevalecieron durante julio y agosto del año 2012, caracterizada por fases de sequía (datos nuestros no publicados). Sustratos rocosos fuertemente fracturados y con inclinaciones $>35^\circ$, así como depósitos de coluvión fueron las litologías más afectadas por inestabilidades de ladera inducidas por sismicidad.

Varios mapas de inventario y su relación con varios factores condicionantes son mostrados en las Figuras 11 a 13. La Figura 11 muestra la distribución del total de movimientos en masa documentados respecto a la elevación. La elevación promedio a la que ocurren movimientos en masa es $\sim 1,350$ m s.n.m. Un estimado de 54 % del total de los eventos identificados se encuentran por debajo del promedio, y el 46 % del total de los eventos sobrepasan la elevación media. El mismo patrón es observado si se analiza por detonantes. Considerando precipitaciones, la elevación promedio es $\sim 1,360$ m s.n.m. Cerca del 53 % de los movimientos en masa ocurren en alturas por debajo de la media y el 47 % restante presenta una tendencia superior a la misma. Los movimientos en masa inducidos por sismicidad presentan una altura promedio de $\sim 1,230$ m s.n.m. La distribución respecto a la media es prácticamente 50 % para eventos que se encuentran por debajo y sobrepasan este valor. La ocurrencia de movimientos en masa inducidos por sismicidad en las crestas topográficas ha sido explicada a partir de la influencia de los efectos topográficos, donde incrementos en la duración y aceleración sísmica son esperados a medida que se asciende en la elevación (Ashford *et al.*, 1997; Meunier *et al.*, 2008). A medida que las ondas sísmicas viajan a lo largo de las crestas se producen interacciones entre las reflexiones y refracciones de las ondas sísmicas dentro de los crestas, situación que se ve reflejada en incrementos marcados en la amplificación de la señal



Figura 9. (a) Indicios de reactivación de paleomovimientos en masa debido a la sobrecarga por depósitos recientes (a) y evidenciada por la presencia de grietas de tensión y la presencia de árboles curvados en favor de la pendiente (b). Desencadenante desconocido.

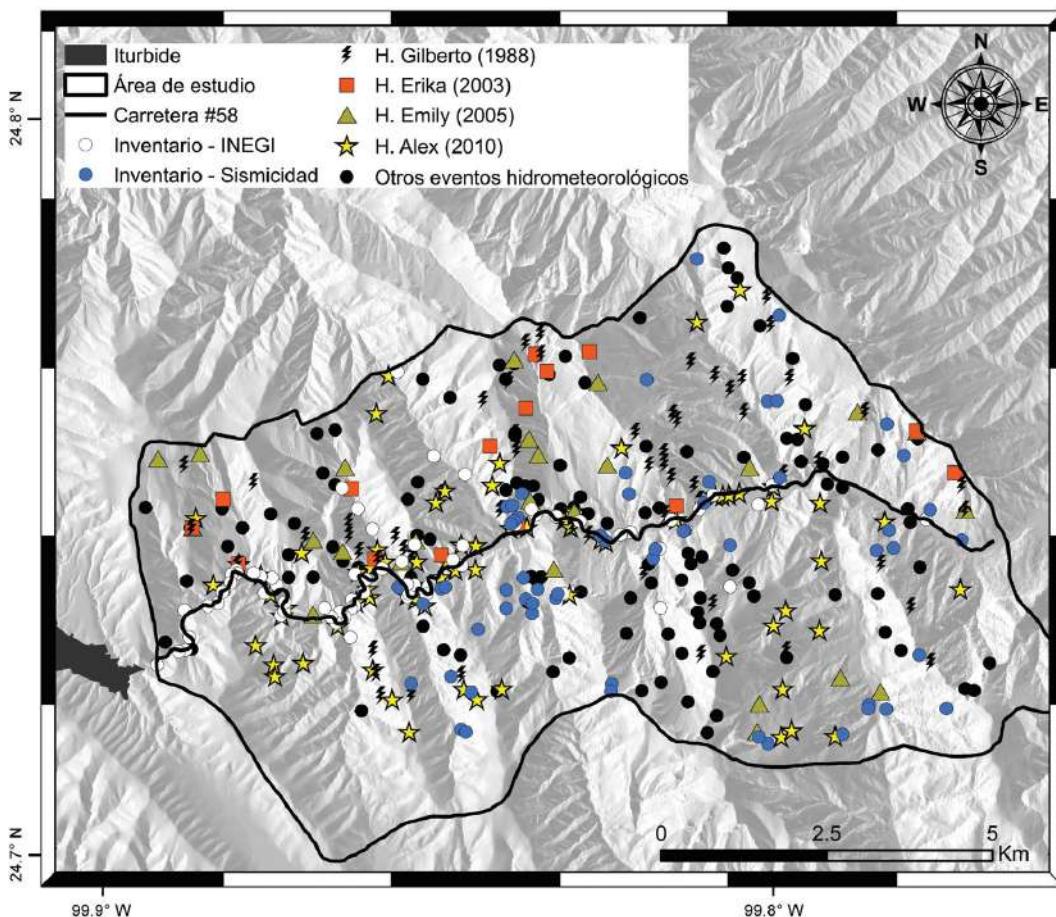


Figura 10. Inventario de movimientos en masa para el cañón Santa Rosa. Distintas simbologías son ilustradas para diferenciar los eventos hidrológicos que han detonado movimientos en masa. Los puntos azules ilustran los movimientos en masa inducidos por la secuencia sísmica ocurrida en el año 2012 (datos nuestros no publicados). Los puntos blancos representan los movimientos en masa reportados por INEGI en la zona de estudio.

sísmica, y por lo tanto, la aceleración del terreno (Buech *et al.*, 2010). Similarmente, sustratos fuertemente intemperizados y acumulaciones de depósitos de ladera actúan como capas de baja velocidad donde el contraste de impedancias entre las masas acumuladas y el sustrato genera efectos de sitio y amplificaciones en la respuesta sísmica de la ladera (Del Gaudio y Wasowski, 2011). Comparando la distribución de los eventos respecto a la pendiente (Figura 12), en promedio las pendientes afectadas presentaron inclinaciones aproximadas de 40°. Considerando sólo los eventos detonados por lluvias, la pendiente promedio fue 41°, con un 44 % de eventos por debajo de este valor y 56 % por encima. Para los eventos detonados por sismicidad, en promedio las pendientes afectadas fue 35°. Un notable contraste es marcado respecto al porcentaje por debajo (38 %) y que sobrepasa (62 %) la media para los movimientos en masa detonados por sismicidad. Los materiales más afectados fueron materiales carbonatados intercalados con secuencias clásticas (Figura 13). El patrón es similar tanto para el inventario total de movimientos en masa (82 %) como para cada uno de los detonantes, 81 % para lluvias y 83 % para sismicidad.

DISCUSIÓN

De acuerdo con Malamud *et al.*, (2004), el inventario de movimientos en masa para el CSR podría categorizarse como "sustancialmente completo", ya que se incluye suficiente información para describir la

actividad de movimientos en masa en la región, los desencadenantes principales y la susceptibilidad ante estos eventos en el área. La calidad del inventario estuvo sujeta en gran medida a la resolución espacial de las escenas satelitales utilizadas, resultados apoyados con inspección en campo. Sólo aquellos movimientos en masa con dimensiones mayores que la resolución pudieron ser claramente identificados y contemplados en la elaboración del inventario. Es claro que eventos pequeños como caídos o deslizamientos puntuales ocurridos durante el periodo de análisis fueron involuntariamente omitidos. Sin embargo, la documentación aquí presentada contempla los eventos de mayores dimensiones y más impacto en la geomorfología, siendo éstos típicamente los de mayor peligro para la sociedad e infraestructura civil. Mayores esfuerzos deben canalizarse en investigaciones de campo más rigurosas en orden de caracterizar patrones puntuales de movimientos en masa por tipología, material involucrado y detonantes a partir de una extensa instrumentación.

El análisis permite definir con certeza la influencia de dos detonantes de movimientos en masa en la región: lluvia y sismicidad. La mayor cantidad de movimientos en masa reportados en la Saliente de Monterrey son consecuencia de fenómenos hidrometeorológicos como huracanes y tormentas tropicales, situación que prevalece en áreas vecinas al área de estudio (*e.g.*, área metropolitana de Monterrey, Montalvo-Arrieta *et al.*, 2009). Únicamente los eventos que producen daños son documentados por distintas instancias gubernamentales, recopilando fecha, ubicación y daños en orden de llevar un control del

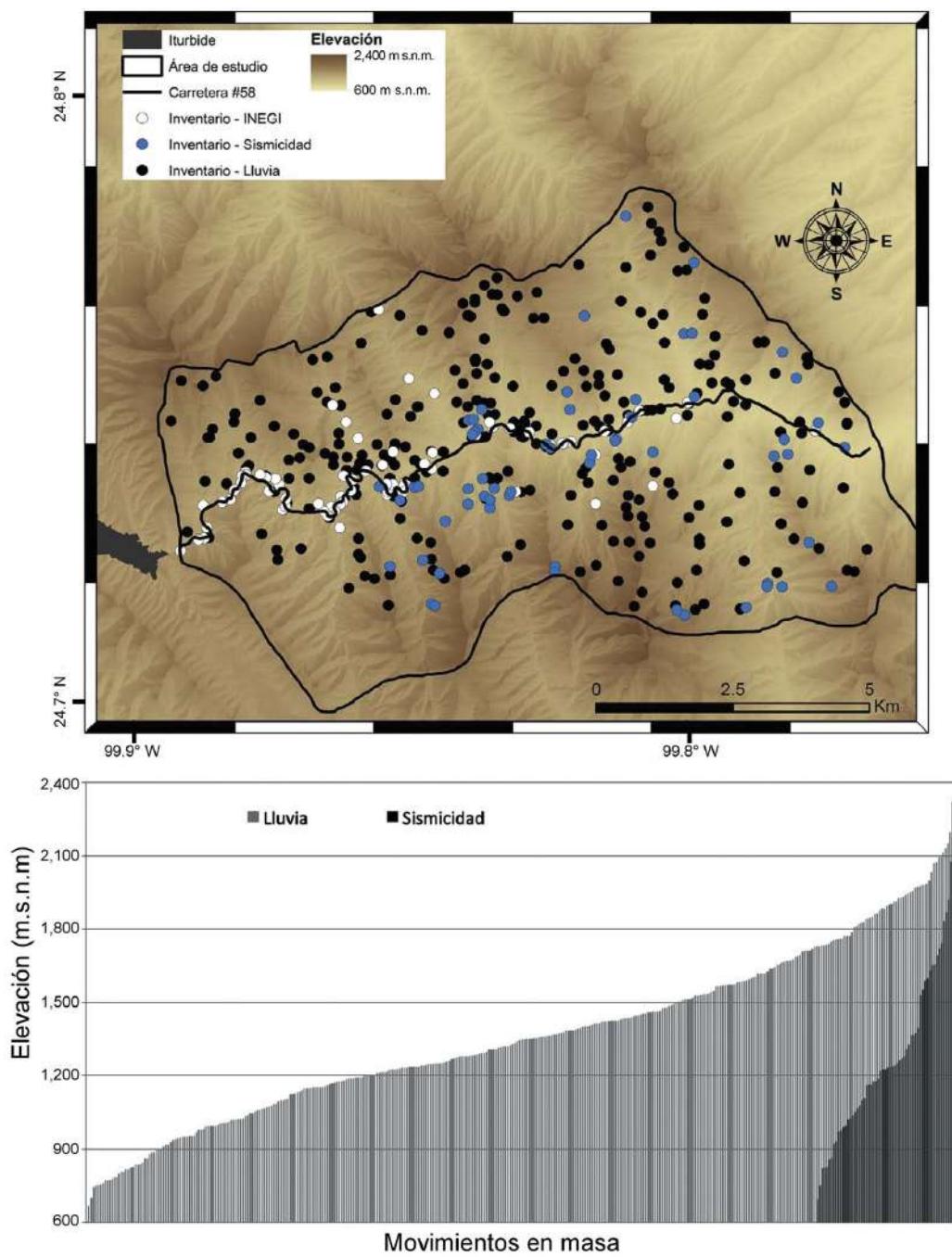


Figura 11. Comparación entre la distribución de movimientos en masa y la elevación.

impacto de las lluvias en la región, más no del movimiento en masa como tal. Pese a que la relación lluvias – movimientos en masa es una problemática reconocida regionalmente, sobresale una notable carencia de medidas de contención de masas y prevención de daños para estos eventos, al menos para el tramo de la Carretera #58 comprendido entre los municipios de Linares e Iturbide.

El incremento en la actividad sísmica en el noreste del país predispone escenarios de peligro históricamente no contemplados. Aunque la sismicidad registrada es de baja a moderada magnitud, parte de la misma se ha presentado con epicentros sobre regiones montañosas, donde existe gran cantidad de asentamientos humanos (e.g., área metropolitana de Monterrey). La documentación de movimientos en

masa detonados por sismicidad se limita a la secuencia sísmica del año 2012. Sin embargo, la ocurrencia de inestabilidades de ladera para otros eventos sísmicos es probable, aunque no ha sido reportada. Una situación de debate es el detonante de los paleomovimientos en masa reportados en la región. Aunque se ha especulado un origen hidrológico (Ruiz y Werner, 1997), las características de los mismos también son posibles bajo la influencia de sismicidad (Salinas-Jasso *et al.*, 2017). Sin embargo, se requiere una mayor investigación para caracterizar tal influencia. Registros históricos de sismicidad a lo largo de la traza de la Sierra Madre Oriental indican un gran potencial sismogénico a lo largo de esta provincia (Galván-Ramírez y Montalvo-Arrieta, 2008; Ramos-Zúñiga *et al.*, 2012). La probabilidad de que se presente sismicidad

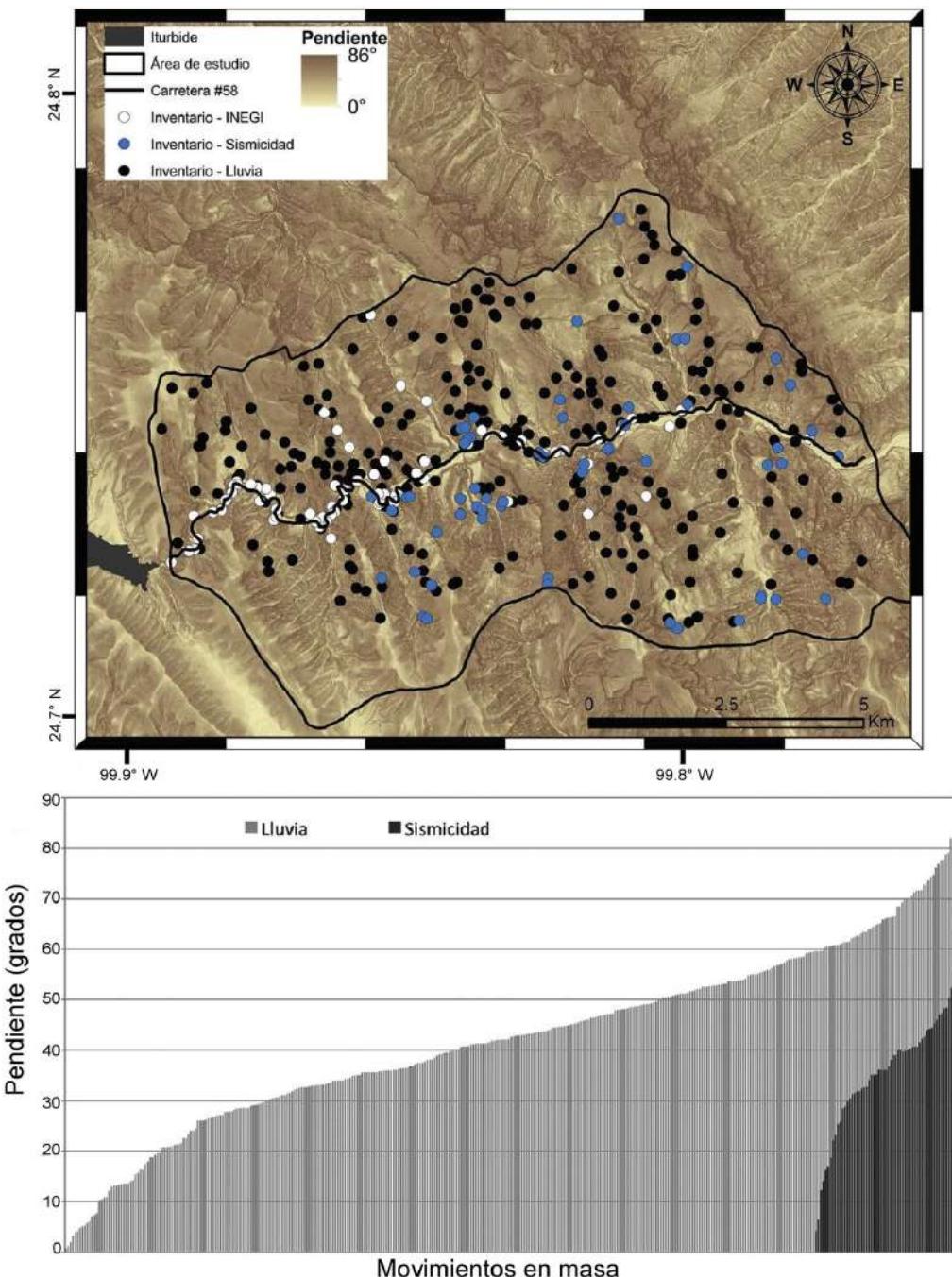


Figura 12. Comparación entre la distribución de movimientos en masa y la pendiente.

de elevada magnitud ($M \geq 6.5$) es considerable (Zúñiga *et al.*, 2017), constituyendo escenarios sísmicos críticos de peligro por movimientos en masa regional así como potenciales daños en otros sectores debido a la propia sacudida del terreno (Salinas-Jasso *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presenta un inventario de movimientos en masa para el sector sur de la Saliente de Monterrey en el cañón Santa Rosa, entre los municipios de Linares e Iturbide, Nuevo León. Para el CSR se documentaron 429 eventos ocurridos durante los últimos 30 años, así como algunos

paleomovimientos en masa. La mayoría de los movimientos en masa fueron caídos, deslizamientos someros y flujos de detritos debido principalmente a huracanes, y en menor proporción, a sismicidad. El inventario final se presenta en un lenguaje claro para su aplicación en evaluaciones detalladas de riesgo por movimientos en masa en la región. La metodología aquí presentada puede extrapolarse a regiones con altas densidades de población, como el área metropolitana de Monterrey. A partir de esto, sistemas de alerta calibrados con instrumentación climatológica y sismológica resultarían en planificaciones de prevención, contingencia y reducción de riesgo en zonas propensas a instabilidad de laderas. El inventario será complementado y actualizado a medida que se profundice en el detalle de investigación de

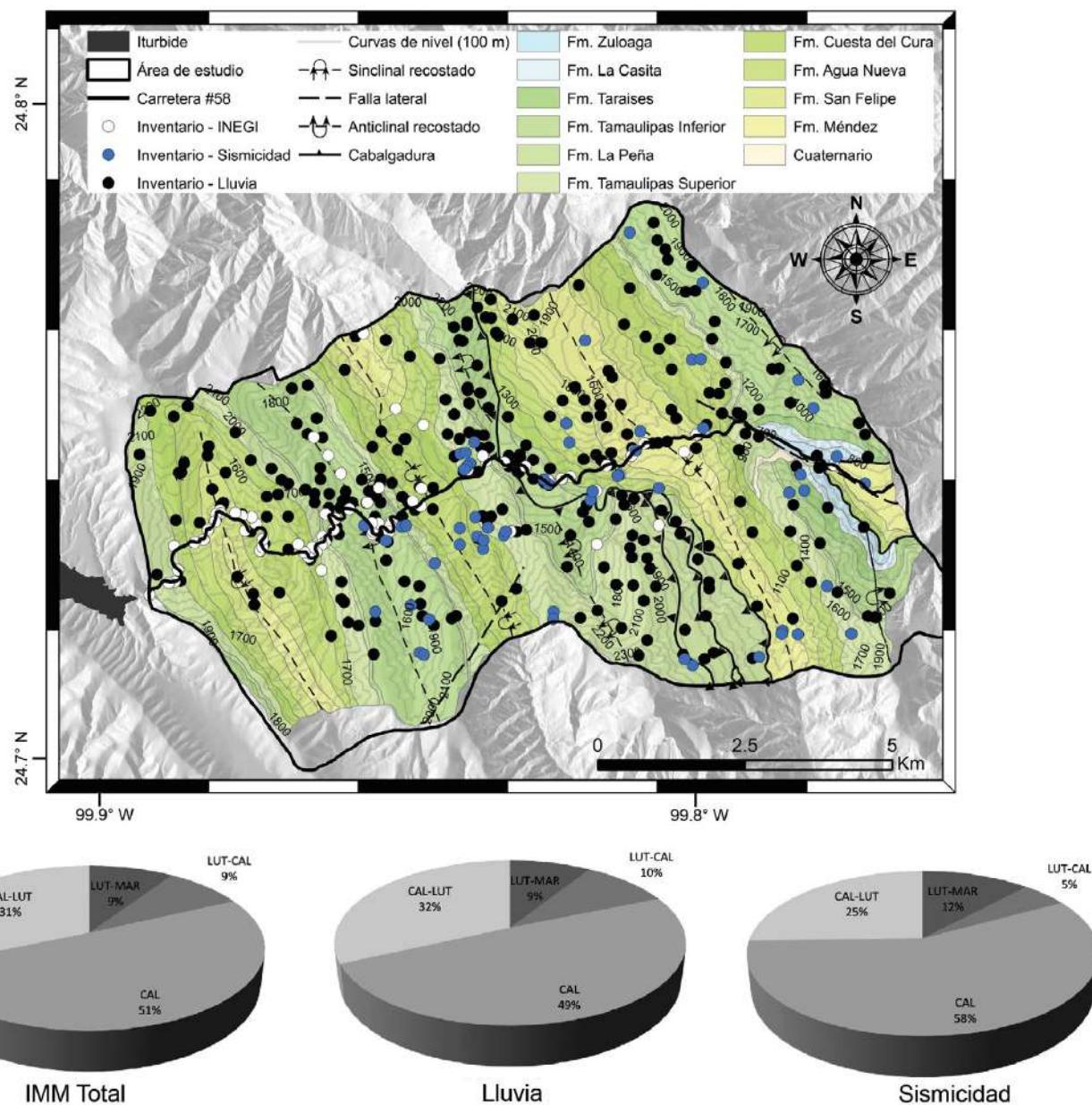


Figura 13. Comparación entre la distribución de movimientos en masa y las litologías involucradas en los desplazamientos. Los diagramas inferiores ilustran la relación para todo el inventario de movimientos en masa (IMM Total), sólo eventos hidrometeorológicos (Lluvia) y contemplando únicamente los detonados por sismicidad (Sismicidad).

movimientos en masa en la región a través de trabajo de campo puntual. La conjunción de investigaciones multidisciplinarias como geomorfología, ingeniería geológica e ingeniería geotécnica son requeridas. Debido a la recurrente ocurrencia de movimientos en masa a lo largo de la Carretera #58 es recomendable la implementación de sistemas de contención como anclaje, mallas retenedoras de bloques y gaviones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los comentarios y sugerencias del Editor José Luis Macías y dos revisores anónimos que ayudaron enormemente en mejorar la calidad del manuscrito original. JASJ y RASJ agradecen al CONACyT por la beca brindada para cursar los estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I., 2004, Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico: *Geomorphology*, 61, 19-40.
- Alcántara-Ayala, I., Murillo-García, F.G., 2008, Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional: *Investigaciones Geográficas*, 66, 47-64.
- Aleotti, P., 2004, A warning system for rainfall-induced shallow failures: *Engineering Geology*, 73, 247-265.
- Alexander, D., 2005, Vulnerability to landslides, in Glade, T., Anderson, M., Crozier, M. (eds.), *Landslide Hazard and Risk*: John Wiley and Sons, 175-198.
- Ashford, S.A., Sitar, N., Lysmer, J., Deng, N., 1997, Topographic effects on seismic response of steep slopes: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3), 701-709.
- Buech, F., Davies, T.R., Pettinga, J.R., 2010, The Little Red Hill seismic

- experimental study: topographic effects on ground motion at a bedrock-dominated mountain edifice: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5A), 2219-2229.
- Caine, N., 1980, The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: *Geografiska Annaler*, 62, 23-27.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., Dávila-Hernández, N., 2003, Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(2), 95-106.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2014, Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Fenómenos geológicos: Serie: Atlas Nacional de Riesgo, Secretaría de Gobernación, México.
- Chapa Guerrero, J.R., 1996, Estabilidad de taludes escarpados, Sierra Madre Oriental, N.L., México: Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I, 1019-1026.
- Chávez Cabello, G., Torres Ramos, J., Porras Vázquez, N., Cossío Torres, T., Aranda Gómez, J., 2011, Evolución estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental en el Cañón Santa Rosa, Linares, Nuevo León: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 63(2), 253-270.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2016, Información climatológica (en línea). <<http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>>. Acceso Enero 2017.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulos S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., Smith, J.T., 2014, Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73(2), 209-263.
- CRED, 2017, EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database (en línea): Bruselas, Belgica, Centre for Research on Epidemiology Disasters - CRED, Université Catholique de Louvain, <<http://www.emdat-be>>, Acceso 14 junio 2017.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996, Landslides types and processes, *en* Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds.), *Landslides: investigation and mitigation*: Washington, D.C., National Academy Press, Transportation Research Board, Special Report 247, 36-75.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Ngai, Y.Y., 2002, Landslide risk assessment and management: an overview: *Engineering Geology*, 64, 65-87.
- Del Gaudio, V., Wasowski, J., 2011, Advances and problems in understanding the seismic response of potentially unstable slopes: *Engineering Geology*, 122, 73-83.
- Dikau, R., 2013, Mass-movement causes: water, *en* Shroder, J. (ed.), *Treatise on Geomorphology*: Academic Press, Elsevier 7, 207-211.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda García, M., Marret, R., 2000, Tectónica de la Sierra Madre Oriental: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53, 1-26.
- Fell, R., Glastonbury J., Hunter, G., 2007, Rapid landslides: the importance of understanding mechanisms and rupture surface mechanics: *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 40, 9-27.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, Ch., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W., on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes, 2008, Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning: *Engineering Geology*, 102, 85-98.
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2008, Comparing landslide inventory maps: *Geomorphology*, 94, 268-289.
- Galván-Ramírez, I.N., Montalvo-Arrieta, J.C., 2008, The historical seismicity and prediction of ground motion in northeast Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 25, 37-48.
- García Acosta, V., Suárez Reynoso, G., 1996, Los sismos en la historia de México: México, Universidad Nacional Autónoma de México, 718 pp.
- García-Palomo, A., Carlos-Valerio, V., López-Miguel, C., Galván-García, A., Concha-Dimas, A., 2006, Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the Mexico Basin: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 58(2), 195-204.
- Goldhammer, R.K., 1999, Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico, *en* Bartolini, C., Wilson, J., Lawton, T., (eds.), *Mesozoic sedimentary and tectonic history of North-Central Mexico: Geological Society of America Special Paper* 340, 1-58.
- Gómez-Arredondo, C.M., Montalvo-Arrieta, J.C., Iglesias-Mendoza, A., Espindola-Castro, V.H., 2016, Relocation and seismotectonic interpretation of the seismic swarm of August-December of 2012 in the Linares area, northeastern Mexico: *Geofísica Internacional*, 55(2), 95-106.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortúño, L., Oteo, C., 2002, Ingeniería Geológica: Pearson Educación, Madrid, 744 pp.
- Gostelow, T.P., 1996, Landslides, *en* Singh, V.P. (ed.), *Hydrology of Disasters*: Dordrecht, J. Kluwer Academic Publishers, 183-230.
- Guzzetti, F., Mondini, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K.T., 2012, Landslide inventory maps: new tools for an old problem: *Earth-Science Reviews*, 112, 42-66.
- Hernández-Madrigal, V.M., Garduño-Monroy, V.H., Alcántara-Ayala, I., 2007, Estudio geológico para entender los procesos de remoción en masa en la región de Zacapoaxtla, Puebla, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 59(2), 147-162.
- Hernández-Madrigal, V., Mora-Chaparro, J., Garduño-Monroy V., 2011, Large block slide at San Juan Grijalva, Northwest Chiapas, Mexico: *Landslides*, 8, 109-115.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 2016, Modelo digital de elevación de alta resolución LiDAR (en línea), <<http://www.inegi.org.mx>>, acceso diciembre 2016.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2017, Mapa digital de México(en línea), <<https://gaia.inegi.org.mx>>, acceso enero 2016.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Loyer, A., Metzger, R., Pedrazzini, A., 2012, Use of LiDAR in landslide investigations: a review: *Natural Hazards*, 61, 5-28.
- Jáuregui, E., 2003, Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in Mexico: *Atmósfera*, 193-204.
- Keefer, D., 1984, Landslides caused by earthquakes: *Geological Society of America Bulletin*, 95, 406-421.
- Keefer, D., Wartman, J., Navarro Ochoa C., Rodríguez-Marek, A., Wieczorek, G.F., 2006, Landslides caused by the M 7.6 Tecomán, Mexico earthquake of January 21, 2003: *Engineering Geology*, 86, 183-197.
- Kirschbaum, D., Stanley, T., Zhou, Y., 2015, Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog: *Geomorphology*, 249, 4-15.
- Legerreta-Paulín, G., Bursik, M., Solene, P., Lugo Hubp, J., Paredes Mejía, L.M., Acevez Quesada, 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.
- Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J.J., Capra, L., Inbar, M., Alcántara-Ayala, I., 2005, Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causas y efectos: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 212-228.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2004, Landslide inventories and their statistical properties: *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 687-711.
- Medina Barrera, F., 1996, Kleintektonische untersuchungen und standsicherheitsberechnungen mit hilfe der backanalysis and strassenböschungen der Sierra Madre Oriental, Mexiko (Curvatura von Monterrey im Staat Nuevo León, Strasse La Palma-Rayones): Aachen, Alemania, Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, Tesis Doctoral, 194 pp.
- Meunier, P., Hovius, N., Haines, J., 2008, Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides: *Earth and Planetary Science Letters*, 275, 221-232.
- Montalvo-Arrieta, J.C., Chávez-Cabello, G., Velasco-Tapia F., Navarro de León. I., 2009, Causes and effects of landslides in the Monterrey Metropolitan Area, NE Mexico, *en* Werner, D., Friedman, H., (eds.), *Landslides: causes, types and effects*: New York, Nova Science Publishers, 73-104.
- Montalvo-Arrieta, J.C., Sosa-Ramírez, R.L., Paz-Martínez, E.G., 2015, Relationship between MMI data and ground shaking in the state of Nuevo León, Northeastern Mexico: *Seismological Research Letters*, 86(5), 1-7.
- Muñiz-Jáuregui, J.A., Hernández-Madrigal, V.M., 2012, Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), 103-114.
- Murillo-García, F.G., Alcántara-Ayala, I., Ardizzone, F., Cardinali, M., Fiorucci, F., Guzzetti, F., 2015, Satellite stereoscopic pair images of very high

- resolution: a step forward for the development of landslide inventories: *Landslides*, 12(2), 277-291.
- Ochoa-Tejeda, V., Parrot, J.F., 2007, Extracción automática de trazas de deslizamientos utilizando un modelo digital de terreno e imágenes de satélite de alta resolución IKONOS. Ejemplo en la Sierra Norte de Puebla, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(3), 354-367.
- Padilla y Sánchez, R.J., 1985, Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí: Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista*, 6(1), 1-20.
- Pedraza Rodríguez, U.M., 1997, Movimientos en masa, origen y consecuencias en el área de Iturbide, N.L., Sierra Madre Oriental, México: Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 118 pp.
- Petley, D., 2012, Remote sensing techniques and landslides, *en* Clague, J.J., Stead, D., (eds.), *Landslides types, mechanisms and modelling*: Cambridge University Press, 159-171.
- Ramos-Zúñiga, L.G., Medina-Ferrusquía, H., Montalvo-Arrieta, J.C., 2012, Patrones de sismicidad en la curvatura de Monterrey, noreste de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(2), 572-589.
- Ruiz, M.A., Werner, J., 1997, Research into Quaternary sediments and climatic variations in NE Mexico: *Quaternary International*, 43/44, 145-151.
- Salinas-Jasso, J.A., Ramos-Zúñiga, L.G., Montalvo-Arrieta, J.C., 2017, Regional landslide hazard assessment from seismically induced displacements in Monterrey Metropolitan area, Northeastern Mexico: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, doi: 10.1007/s10064-017-1087-3.
- Sánchez-Núñez, J.M., Macías, J.L., Zamorano, J.J., Saucedo, R., Torres, J.R., and Novelo, D., 2012, Mass Movement processes at the Motozintla basin, Chiapas, Southern Mexico: *Geofísica Internacional*, 51 (2), 169-186.
- Sepúlveda, S.A., Petley, D., 2015, Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 1821-1833.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2010, Carta Geológico-Minera Iturbide G14-C67, escala 1:50,000: Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2015, Carta Geológico-Minera Hualahuises G14-C57, escala 1:50,000: Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.
- SSN (Servicio Sismológico Nacional), 2016, Catálogo de sismos (en línea), <<http://www.ssn.unam.mx>>, acceso diciembre 2016.
- Valenzuela, P., Domínguez-Cuesta, M.J., Mora García, M.A., Jiménez-Sánchez, M., 2017, A spatio-temporal landslide inventory for the NW of Spain: BAPA database: *Geomorphology*, 293, 11-23.
- Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., 2012, State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk: *Geomorphology*, 139-140, 545-558.
- Van Den Eeckhaut, M., Poessens, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Moeyersons, J., Nyssen, J., Van Beek, L., 2005, The effectiveness of hillshade maps and expert knowledge in mapping old steep-seated landslides: *Geomorphology*, 67, 351-363.
- Van Den Eeckhaut, M., Poessens, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Nyssen, J., Moeyersons, J., Van Beek, L., Vandekerckhove, L., 2007, Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest: *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 754-769.
- Varnes, D., 1978, Slope movement types and processes, *en* Schuster, R.L., Krizek, R.J. (eds.), *Special report 176 Landslides: analysis and control*: Washington, D.C., National Research Council, Transportation Research Board, 11-33.
- Xu, C., 2015, Preparation of earthquake-triggered landslide inventory maps using remote sensing and GIS technologies: Principles and cases studies: *Geoscience Frontiers*, 6, 825-836.
- Zhou, Y., Murphy, M., Hamade, A., 2006, Structural development of the Peregrina-Huizachal anticlinorium, Mexico: *Journal of Structural Geology*, 28, 494-507.
- Zúñiga, F.R., Suárez, G., Figueroa-Soto, A., Mendoza, A., 2017, A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation: *Journal of Seismology*, doi: 10.1007/s10950-017-9666-0.

Manuscrito recibido: enero 4, 2017

Manuscrito corregido recibido: agosto 4, 2017

Manuscrito aceptado: agosto 8, 2017