



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

**ANÁLISIS DE PELIGROS GEOMORFOLÓGICOS EN LAS
ZONAS DE MONTAÑA DEL SISTEMA VOLCÁNICO
TRANSVERSAL, MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

ALEJANDRO CÉSAR VALDÉS CARRERA

TUTORES

DR. MANUEL EDUARDO MENDOZA CANTÚ
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL, UNAM

DR. TEODORO CARLÓN ALLENDE
CONAHCYT-INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNIDAD MICHOACÁN, UNAM

MIEMBRO DEL COMITÉ TUTOR

DR. JOSÉ LUIS MACIAS VÁZQUEZ
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNIDAD MICHOACÁN, UNAM

MORELIA, MICHOACÁN, MAYO DE 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



POSGRADO EN GEOGRAFÍA

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL (Graduación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la Institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado: “ANÁLISIS DE PELIGROS GEOMORFOLÓGICOS EN LAS ZONAS DE MONTAÑA DEL SISTEMA VOLCÁNICO TRANSVERSAL, MÉXICO”, que presente para obtener el grado de DOCTOR, es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi programa de posgrado, citando las fuentes, ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de graduación.

Atentamente

Alejandro César Valdés Carrera
No. de cuenta 519015014

“La geomorfología es la base de la vida y del amor.”

Mario Arturo Ortíz Pérez

“En la medida en que el recuerdo de las acciones colectivas se enlaza con los caprichos de la topografía ,..., el espacio se convierte en territorio.”

Paul Claval

Dedicatorias

A mi amada familia y novia

Quienes me han enseñado el valor del respeto, del trabajo y del amor incondicional

A mis buenos amigos

Quienes me han enseñado que el amor de amigos es atemporal, sincero, divertido e incondicional

A mis queridos maestros de vida

Armando Reyes Enríquez, Patricia Mireles Lezama, María Estela Orozco Hernández, Juan Alfredo Hernández Guerrero y Julio César Carbajal Monroy, quienes me han compartido sus conocimientos en torno al basto mundo de la geografía, sus experiencias de vida, su paciencia, su pasión, amor y dedicación por la enseñanza, su calidez humana y su cariño incondicional.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por otorgarme una beca para cursar mi doctorado en geografía y poder así tener la oportunidad de desarrollarme en un entorno académico de calidad y contribuir a la ciencia y a la sociedad.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, por darme la oportunidad de estudiar en sus instalaciones y recibir la retroalimentación y los conocimientos de grandes investigadores y personas, gracias también por hacer que me sintiera abrazado por sus espacios y por llevarme a descubrir la hermosa e importante labor de la geografía.

Al proyecto UNAM PAPIIT IN108719 “Dendrogeomorfología y evaluación de peligros en ambientes de montañas”, por otorgar financiamiento al proyecto coordinado por el doctor Manuel Eduardo Mendoza Cantú y a través de él, contar con el apoyo financiero para el desarrollo de mi investigación doctoral en campo, laboratorio y escritorio.

Al doctor Manuel Eduardo Mendoza Cantú por aceptar director de mi tesis, por compartir sus conocimientos y tiempo, por su amistad y esas largas pláticas en campo sobre geomorfología, hidrología, suelos, paisaje, peligros y riesgos; por las charlas académicas en torno al mundo de la geografía física, por apoyarme y contemplarme para la impartición de sus clases y así permitirme desarrollar una parte que considero esencial y valoro mucho que es la docencia, por retroalimentar mi trabajo con sus acertadas sugerencias, por apoyar todas mis actividades en campo y laboratorio, por influir en mi constante capacitación, y por impulsarme a terminar mi investigación. Gracias doctor valoro mucho el coincidir con usted y por ser un ejemplo de vida para mí.

Al doctor Teodoro Carlón Allende por aceptar ser codirector de mi tesis, por transmitirme sus conocimientos en el tema de la dendrocronología, por sus revisiones precisas y muy objetivas hacia mi trabajo, por su constante impulso a mi capacitación, por sus recomendaciones de vida, por su amistad, por su buen trato, por considerarme para apoyarlo en sus clases y abonar a mi crecimiento académico. Gracias querido Teo valoro mucho el tiempo y dedicación que le pones a tu trabajo y a tu familia, sin duda eres un buen profesional y un buen padre.

Al doctor José Luís Macías por ser parte de mi sínodo y acompañar mi trabajo durante el doctorado, por sus sugerencias puntuales y por apoyar mi capacitación y desarrollo profesional, por sus enseñanzas en torno a la vulcanología y trabajo de campo. Gracias doctor Macías por mostrarme su calidez y pese a todas sus responsabilidades compartirme siempre una sabia recomendación.

Al doctor José Villanueva Díaz por ser parte de mi sínodo y enriquecer mi trabajo en el tema de la dendrocronología y análisis de peligros; agradezco también por permitirme asistir al Curso Nacional de Dendrocronología el cual me dio las bases para desarrollar parte de mi investigación correctamente. Gracias doctor José por demostrarme el valor de la sencillez y calidad académica por medio de su trabajo.

Al doctor Lorenzo Vázquez Selem por sus recomendaciones precisas en el área de la geomorfología y en la aplicación de la dendrogeomorfología, las cuales permitieron mejorar mi trabajo de

investigación. Gracias doctor Lorenzo por sus atinados comentarios y contribuciones en el campo de la geomorfología, para mí serán siempre importantes.

Al doctor Juan Alfredo Hernández Guerrero por ser parte de mi sínodo, por sus importantes recomendaciones en cuanto al tema de peligros y riesgos, sobre la geografía y mi labor como geógrafo, por impulsarme para estudiar el doctorado, por darme la oportunidad de incursionar en la docencia apoyando al programa de maestría que estudié, por sus atinadas recomendaciones para la mejora de mi tesis y por su siempre sincera amistad. Querido doctor Juan, su calidez humana y calidad académica son un ejemplo para mi vida.

Al doctor Óscar Frausto Martínez por ser parte de mi sínodo, por su constante trabajo para apoyar a investigadores jóvenes, por su atinada labor en la REDESCLIM, por sus importantes comentarios en torno a mi tesis, y por enseñarme que siempre es bueno disfrutar el momento. Gracias doctor por su dinamismo, entusiasmo y calidad que inspira a seguir.

Al doctor Gerardo Bocco, por su buen trato, calidez, recomendaciones y escucha atenta a mis posturas académicas y metodológicas, agradezco también por su labor en la revisión y retroalimentación de mis manuscritos, lo cual me permitió mejorar la calidad de mis productos académicos. Gracias doctor por inspirar mi trabajo en el campo de la geografía.

A la comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, por permitirme realizar mi trabajo de campo y el desarrollo de mi investigación dentro de su territorio, cuyos resultados servirán para la gestión del peligro por procesos de remoción en masa y para la gestión del riesgo en el territorio del estratovolcán Pico de Tancítaro.

A los doctores, maestros y colaboradores del CIGA Luis Miguel Morales, Francisco Bautista, Antonio Navarrete, Alejandra Larrazábal, Raquel González, Rosaura Páez, Hilda Rivas, Fabiola Velázquez, Paz del Carmen Coba, Geraldly García, Walter Hernández, Frank Chávez, Nidia Romero, Salud Tovar, Vanessa Flores, Lupita y Verónica por compartir su conocimiento, tiempo y trabajo, los cuales permitieron llevar a buen fin mi investigación.

A mis compañeros y amigos del posgrado Jorge, Tere, Isra, Nico, Erandi, David, Karla, Julio, Alelí, Fernanda, Giuliana, Andrés (Piña), Abel, Daniela, Yared y Grechel, con los cuales compartí momentos valiosos, divertidos, sentimientos similares en torno a los estudios, retos importantes, y sobre todo un apasionado interés por enriquecer las distintas ramas de la geografía.

A mis amigos Leonardo y Carlos Gaytán, a quienes hago un reconocimiento especial por ser mis compañeros de aventuras en campo y no desistir pese a las circunstancias extremas. Gracias por estar ahí.

A mis amigos Carlos, Gabi, Leo, Giovanna, Erika, Pedro, Gemma, Cloe y Amaranta por apoyarme siempre, ser parte de mi vida y de mis vivencias más entrañables en el bello territorio de Michoacán.

A las personas con las que coincidí y a los hermosos paisajes visitados durante el doctorado y que no menciono en este momento.

Índice de contenido

Dedicatorias	IV
Agradecimientos	V
Índice de contenido.....	VII
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
Resumen	X
Abstract.....	XI
Introducción General	1
Referencias Generales	5
Capítulo I. Revisión de estudios recientes sobre peligros por procesos de remoción en masa en América Latina	10
Capítulo II. Inventario multitemporal de procesos de remoción en masa, análisis de una montaña intertropical en el Centro-Oeste de México-Bases para la gestión del peligro.....	55
Capítulo III. Análisis dendrogeomorfológico de un proceso de remoción en masa complejo en el estratovolcán Pico de Tancítaro, México.....	76
Conclusiones Generales.....	105

Índice de figuras

Capítulo I.	17
Figura 1. Distribution of articles by database including results from the original search and from the analysis after application of the first filter	17
Figura 2. Keywords matched in the analyzed articles	18
Figura 3. Number of published (bars) and accumulated (line) articles per year during the 2000-2019 period.....	19
Figura 4. Lead author affiliations	20
Figura 5. Distribution of articles published on landslides occurred by country in Latin America	21
Figura 6. Types of landslides studied in Latin America.....	23
.....	58
Capítulo II.....	58

Figura 1. Hypsometric map of the study area in the national, state Trans-mexican volcanic belt and Michoacán-Guanajuato field context.....	58
Figura 2. Compiled geological map and the structural components in the study area.....	62
Figura 3. Relief/modelling units that conform the Geomorphic landscapes units in the study area	63
Figura 4. a) Slope map, and b) Aspect map in the study area	64
Figura 5. a) Soil group-type, and b) land cover and land use (2020) in the study area.....	65
Figura 6. Multitemporal landslide distribution and typology map in the study area.....	66
Figura 7. More recent flows and slides observed in fieldwork in the study area	69
Figura 8. Landslide frequency and magnitude in the study area	71
Capítulo III	76
Figura 1. a) Localización del estratovolcán Pico de Tancítaro en el Sistema Volcánico Transversal, b) Localización del PRMC “La Culebra” en el Pico de Tancítaro, c) Imagen de vuelo de dron de alta resolución donde se aprecia el PRMC “La Culebra” delimitado por el polígono rojo discontinuo.....	80
Figura 2. Perfil longitudinal y mapa geomorfológico detallado del PRMC “La Culebra”; D: Deslizamiento; F: Flujo.	84
Figura 3. Sitios de análisis y verificación en campo de la estructura del paisaje (roca, suelo y vegetación).	85
Figura 4. Estructura del paisaje del PRMC “La Culebra”: a) lavas andesíticas, b) depósitos de caída-Lapilli, c) suelo enterrado, d) depósitos de caída-ceniza de la erupción del volcán Parícutín, e) andosol ócrico, f) regosol eútrico, g) <i>Abies religiosa</i> , h) escombros del PRMC, i) perfiles transversales (x-x', y-y', z-z').....	86
Figura 5. Índice de ancho de anillo Cronología de árboles de referencia vs Cronología de árboles impactados (<i>Abies religiosa</i>), por el PRMC “La Culebra”; la profundidad de la muestra refiere a la cronología de árboles impactados.....	88
Figura 6. a) Ubicación de los árboles utilizados para construir la cronología de árboles impactados, b) árbol golpeado por el PRMC “La Culebra”, c) Acercamiento a ducto de resina traumático del 201, d) muestreo con taladro de Pressler en árbol con cicatriz de impacto generada por el PRMC, e) evidencia de ductos de resina traumáticos en los núcleos obtenidos de los árboles dañados por el PRMC “La Culebra”.....	89
Figura 7. Eventos registrados por los árboles a lo largo del PRMC “La Culebra”, las líneas verticales describen el año en el que se registró respuesta en la muestra, el polígono rojo señala el año (2016), año en el que se identificaron la mayoría de respuestas en las muestras, el gráfico superior indica el porcentaje de muestras con cicatrices y la cantidad de muestras con cicatrices por año.	90

Figura 8. Distribución espacial de la edad de los árboles, número de muestras y número de árboles por geoforma.....	91
Figura 9. Índice de Respuesta de Shroder de las muestras tomadas del PRMC “La Culebra”, para el periodo (1966-2018).	91
Figura 10. a) Número de cicatrices, b) Altura de la cicatriz, y c) Ancho de la cicatriz provocadas por el PRMC.....	93
Figura 11. Precipitación diaria durante la temporada de lluvias (Mayo a Octubre) registrado para el estratovolcán Pico de Tancítaro durante el año 2015. Esta figura fue realizada usando los datos de The Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations-CHIRPS (Funk et al., 2014)	95

Índice de tablas

Capítulo I.....	15
Tabla 1. Keyword list used for article search.....	15
Tabla 2. Variables used in the individual assessment of articles	16
Tabla 3. Financed articles by country.....	22
Tabla A1. List of the 283 analyzed articles in this paper	41
Capítulo II.....	60
Tabla 1. Inputs used to generate the landslide conditioning factors, variables and the landslide inventory	60
Tabla 2. Classification criteria for inventoried landslides.....	61
Tabla 3. Unit description in the geological map of the study area.....	61
Tabla 4. Description of landslide events in the multitemporal inventory	66
Tabla 5. Multitemporal landslide inventory associated with the Conditioning Factors (CF)	67
Capítulo III	76
Tabla 1. Insumos utilizados para generar el mapa geomorfológico detallado, los perfiles longitudinales y los perfiles transversales del PRMC “La Culebra”.....	81

Resumen

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM), son peligros geomorfológicos comunes en zonas de montaña, son detonados principalmente por lluvias torrenciales o sismos y llegan a causar afectaciones al medio ambiente, infraestructura, equipamiento y actividades económicas. En su mayoría la evaluación de estos procesos geomórficos, se ha desarrollado en las regiones ubicadas en las franjas extratropicales de los hemisferios norte y sur, siendo las zonas intertropicales escasamente estudiadas. Las zonas intertropicales concentran más del 60 % de los eventos desastrosos a nivel mundial, de los cuales en la región de América se concentra el 24 %, región a la que pertenece América Latina y en la cual el principal detonante de los PRM son las lluvias generadas por eventos climáticos extremos influenciados por el fenómeno del Niño y de la Niña. No obstante, se han desarrollado escasos estudios que evalúen la magnitud y frecuencia de los PRM, lo cual representa un área de oportunidad para desarrollar estudios que permitan inventariarlos, caracterizarlos, monitorearlos y finalmente gestionar los riesgos asociados a su ocurrencia.

Por ello, en esta investigación se planteó como objetivo general: Modelar la dinámica espacio-temporal de los PRM a escala detallada ocurridos en el estratovolcán Pico de Tancítaro, Michoacán, México. El estudio comprendió tres fases: la primera consistió en realizar la revisión bibliométrica de estudios publicados en el periodo de 2000 a 2019 sobre peligro por PRM en América Latina. La revisión permitió identificar los avances y las áreas de interés futuro para el desarrollo de estudios de peligrosidad. La segunda fase consistió en realizar un inventario multitemporal de los PRM en el estratovolcán Pico de Tancítaro, para identificar la ubicación, tipología, temporalidad y composición de los PRM ocurridos en el periodo de 1995 al 2020, así como caracterizar sus factores condicionantes y detonantes. Finalmente, se realizó la reconstrucción espacio-temporal del proceso de remoción en masa de mayor magnitud inventariado en el estratovolcán Pico de Tancítaro, ubicado en la cuenca de “La Culebra”, con esto fue posible generar información geomorfológica detallada del evento, describir la estructura del paisaje dentro y fuera del área afectada, y aplicar técnicas dendrogeomorfológicas para conocer el potencial del *Abies religiosa* para datar eventos geomórficos y conocer la magnitud del evento.

Los resultados de esta investigación muestran un creciente interés por el estudio del peligro por PRM en América Latina, resaltando entre otras técnicas a la dendrocronología como técnica novedosa para el estudio de la frecuencia y magnitud de estos procesos. Con relación al inventario de PRM a escala semidetallada (1:50,000) se identificaron 505 PRM ocurridos entre 1995 y 2020 en el estratovolcán Pico de Tancítaro; los cuales se clasificaron como deslizamientos y flujos. Las rocas, geformas, pendiente, orientación de laderas, suelos, uso del suelo y la vegetación fueron los factores condicionantes, todos detonados por lluvias torrenciales generadas por huracanes y tormentas tropicales. El análisis a escala de gran detalle (1:500) de la geomorfología del PRM “La Culebra” lo clasificó como un PRM complejo, cuyo basamento es de roca andesita y en la parte superficial presenta depósitos de caída (lapilli y ceniza del volcán Parícutín), sobre los cuales se desarrollaron principalmente suelos andosoles y bosque de oyamel, que al ocurrir el evento fueron removidos.

Los resultados del análisis dendrogeomorfológico mostraron una alta correlación entre las cronologías de referencia y la de árboles impactados, lo que permitió confirmar el potencial de la especie *Abies religiosa* para la reconstrucción espacio-temporal de procesos geomorfológicos. No obstante, los anillos de crecimiento de los árboles sólo presentaron una respuesta, identificada en la madera temprana del año 2016. Dicho evento fue detonado por las lluvias torrenciales de octubre de

2015, los árboles con impacto más evidente se ubicaron en la zona de acumulación y con menor impacto en la zona de desprendimiento, comprobando así que el evento fue altamente peligroso y que transportó una gran cantidad de escombros.

Las conclusiones principales de la presente investigación fueron: a) el análisis bibliométrico permitió generar la primera base de datos sobre peligro por PRM en América Latina, la cual señala los avances recientes y las áreas de oportunidad para estudios futuros; b) el inventario multitemporal de los PRM generó información sobre la distribución a escala semidetallada de los PRM, así como la identificación de las categorías con mayor importancia relativa para realizar estudios de susceptibilidad y peligro en una montaña intertropical de México; c) el análisis detallado (1:500), del PRM complejo “La Culebra”, permitió entender la dinámica geomorfológica y paisajística; así como, el potencial dendrogeomorfológico del *Abies religiosa*, y reconstruir la magnitud del evento, demostrando la eficiencia de las técnicas dendrogeomorfológicas para el estudio de la peligrosidad por PRM. Lo anterior, contribuye a la comprensión de los PRM en las zonas de montaña intertropical, y aporta bases robustas para identificar las áreas de atención teórico-prácticas para desarrollar estudios futuros que aumenten el conocimiento y fortalezcan la capacidad de gestión de peligros y riesgos en estas zonas.

Abstract

Landslides are common geomorphological hazards in mountain areas. They are triggered mainly by torrential rains or earthquakes and cause damage to the environment, infrastructure, equipment and economic activities. For the most part, the evaluation of these geomorphic processes has been developed in the regions located in the extratropical strips of the northern and southern hemispheres, with the intertropical zones being scarcely studied. The intertropical zones concentrate more than 60% of disastrous events worldwide, of which 24% are concentrated in the American region, the region to which Latin America belongs and in which the main trigger of landslides is rain, generated by extreme climatic events influenced by the El Niño- La Niña phenomenon. However, few studies have been developed that evaluate the magnitude and frequency landslides, which represents an area of opportunity to develop studies that allow them to be inventoried, characterized, monitored and finally manage the risks associated with their occurrence.

Therefore, in this research the general objective was: Model the spatio-temporal dynamics of landslides on a detailed scale that occurred in the Pico de Tancítaro stratovolcano, Michoacán, Mexico. The study included three phases: the first consisted of carrying out a bibliometric review of studies published in the period from 2000 to 2019 on landslide hazard in Latin America. The review made it possible to identify advances and areas of future interest for the development of hazardness studies. The second phase consisted of carrying out a multi-temporal landslides inventory in the Pico de Tancítaro stratovolcano, to identify the location, typology, temporality and composition of landslides that occurred in the period from 1995 to 2020, as well as characterize their conditioning and triggering factors. Finally, the spatio-temporal reconstruction of the largest landslide inventoried in the Pico de Tancítaro stratovolcano, located in the “La Culebra” basin, was carried out. With this it was possible to generate detailed geomorphological information of the event, describe the landscape structure inside and outside the affected area, and apply dendrogeomorphological techniques to know the potential of *Abies religiosa* to date geomorphic events and to know the magnitude of the event.

The results of this research show a growing interest in the study of landslide hazard in Latin America, highlighting, among other techniques, dendrochronology as a novel technique for the study of the frequency and magnitude of these processes. In relation to the landslide inventory on a semi-detailed scale (1:50,000), 505 landslides were identified that occurred between 1995 and 2020 at the Pico de Tancítaro stratovolcano; which were classified as slides and flows. Rocks, geoforms, slope, slope orientation, soils, land use and vegetation were the conditioning factors, all triggered by torrential rains generated by hurricanes and tropical storms. The analysis at a very detailed scale (1:500) of the geomorphology of the “La Culebra” landslide classified it as a complex landslide, whose basement is made of andesite rock and in the superficial part it presents fall deposits (lapilli and ash from the Parícutin volcano), on which mainly Andosol soils and fir forest developed, which were removed when the event occurred.

The results of the dendrogeomorphological analysis showed a high correlation between the reference chronologies and that of impacted trees, which allowed us to confirm the potential of the *Abies religiosa* (also known as oyamel fir or sacred fir) species for the spatio-temporal reconstruction of geomorphological processes. However, the growth rings of the trees only presented one response, identified in the early wood of the year 2016, this event was triggered by the torrential rains of October 2015, the trees with the most impact evidently, they were located in the accumulation zone and with less impact in the depletion zone, thus proving that the event was highly hazardous and that it transported a large amount of debris.

The main conclusions of this research were: a) the bibliometric analysis allowed the generation of the first database on landslide hazard in Latin America, which points out recent advances and areas of opportunity for future studies; b) the multi-temporal landslide inventory generated information on the semi-detailed distribution of landslides, as well as the identification of the categories with the greatest relative importance for carrying out susceptibility and hazard studies in an intertropical mountain in Mexico; c) the detailed analysis (1:500) of the “La Culebra” complex landslide allowed us to understand the geomorphological and landscape dynamics; as well as the dendrogeomorphological potential of *Abies religiosa*, and reconstruct the magnitude of the event, demonstrating the efficiency of dendrogeomorphological techniques for the study of landslide hazardness. The above contributes to the understanding of landslides in intertropical mountain areas, and provides robust bases to identify areas of theoretical-practical attention to develop future studies that increase knowledge and strengthen the capacity for hazard and risk management in these areas.

Introducción General

La evolución, dinámica y distribución de las geoformas y los procesos geomorfológicos son estudiados por la Geomorfología, considerándolos como el resultado de la interacción de los agentes constructores (vulcanismo-tectonismo) y modeladores (agua, hielo, viento y remoción en masa), no obstante, actualmente se reconoce al hombre como uno de los principales agentes modificadores de estos en las zonas de montaña (Urban & Rhoads, 2003; Matthews & Herbert, 2008; Strahler, 2013).

Los procesos geomorfológicos en áreas montañosas son muy comunes, estos procesos suelen combinarse con eventos geofísicos extremos, con las modificaciones del uso de la tierra y con los efectos del crecimiento poblacional hacia zonas con baja aptitud, incrementando sus efectos modificadores sobre las geoformas y los paisajes, lo cual subraya la urgencia de mejorar la comprensión de sus interacciones, para así lograr la mitigación y adaptación a los peligros y riesgos asociados a su ocurrencia (Slaymaker, 2009; Stoffel & Corona, 2014).

Se entiende por peligro, al evento natural inesperado e incontrolable cuya magnitud pudiera amenazar a la gente causando un daño o pérdida potencial de vidas humanas, propiedades o al ambiente (Middelmann, 2007; Bokwa, 2013). El peligro, puede ser estudiado por su probabilidad espacial y temporal de ocurrencia, la primera está en función de sus factores condicionantes, y la segunda considera de manera indirecta los factores condicionantes y de manera directa los factores detonantes (Van Westen *et al.*, 2008, 2006).

En términos geomorfológicos, un peligro resulta de un cambio en la geoforma y paisaje que afecta adversamente la estabilidad geomorfológica de un sitio o de una cuenca (Schumm, 1988), y que intersecta los sistemas de uso humano generando impactos socioeconómicos negativos (White, 1974). Como consecuencia de la intensificación de los peligros geomorfológicos, los riesgos se multiplican (Slaymaker, 2010). La comprensión de los procesos geomorfológicos y el conocimiento de eventos pasados son tareas importantes para la evaluación de peligros, así como para la prevención y mitigación de sus efectos al ambiente y en las actividades humanas (Enríquez *et al.*, 2010).

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) se definen como el movimiento cuesta abajo de una masa de roca, escombros o tierra bajo la influencia de la gravedad (Cruden & Varnes, 1996), que pueden convertirse en peligros geomorfológicos. Los factores condicionantes y detonantes definen la magnitud y frecuencia de los PRM y varían considerablemente de un lugar a otro, como condicionantes podemos considerar al relieve, el ángulo de inclinación, la morfología de las laderas, el ángulo de reposo, la consolidación y el grado de fracturamiento del material parental, la litología, la estructura geológica, la vegetación, y la influencia del agua superficial y subterránea; y como detonantes a los factores climáticos, a la actividad sísmica y volcánica, y la actividad humana (Lugo *et al.*, 2005; Mergili *et al.*, 2015). Los PRM pueden ser lentos e imperceptibles o súbitos y violentos con consecuencias desastrosas; y pueden clasificarse en deslizamientos, flujos, volcamientos, caídos, reptación o la combinación de dos o más de ellos (complejos) (Cruden & Varnes, 1996; Enríquez *et al.*, 2010; Hungr *et al.*, 2014).

En las regiones montañosas, los PRM como los desprendimientos de rocas o movimiento de detritos afectan áreas habitadas o caminos (Hungr *et al.*, 1999; Budetta, 2004), llegando a destruir construcciones (Evans & Hungr, 1993), y causar daños al medio ambiente y la pérdida de vidas humanas (Bunce *et al.*, 1997; Guzzetti, 2000; Baillifard *et al.*, 2003). Los PRM se han convertido en uno de los procesos geomorfológicos más estudiados al convertirse en un peligro, cuya frecuencia y magnitud puede verse incrementada debido al cambio climático global (Gobiet *et al.*, 2014).

Los peligros relacionados a procesos geomorfológicos son muy comunes en zonas montañosas, siendo la dendrocronología una fuente *proxy* para la generación de información espacio-temporal precisa de eventos pasados, que se basa en el análisis de los anillos de crecimiento de los árboles, permitiendo así generar bases de datos robustas sobre los procesos geomorfológicos que afectaron al árbol y comprender así su magnitud y frecuencia (Slaymaker, 2010; Stoffel & Corona, 2014). La dendrogeomorfología, definida por Alestalo (1971) como la aplicación de la ecología vegetal y dendrocronología a la investigación en el campo de la morfogénesis y geomorfocronología. Su aplicación se basa en el modelo “proceso-evento-respuesta” (Shroder, 1978). El “proceso” está representado por algún tipo de proceso geomorfológico, por ejemplo; un flujo de escombros, caída de rocas o deslizamientos. En el caso del “evento”, el proceso geomorfológico afectará a un árbol, el cual reaccionará ante la perturbación con un crecimiento determinado, llamado “respuesta” (Stoffel & Bollschweiler, 2008). Es decir, los árboles pueden ser impactados, sus tallos inclinados, la base del tallo enterrada, su corona y ramas rotas o sus raíces desnudas, a todas estas acciones los anillos de crecimiento tendrán una respuesta en su crecimiento (Rubiales *et al.*, 2009; Stoffel & Bollschweiler, 2009).

La comprensión de los procesos geomorfológicos y el conocimiento de eventos pasados son tareas claves para la evaluación de peligros. Los estudios de anillos de crecimiento de los árboles han demostrado ser una herramienta confiable para la adquisición de datos espaciales y temporales sobre eventos y de peligros geomorfológicos del pasado, por lo que se considera una técnica útil para la comprensión de procesos geomorfológicos y especialmente de peligros (Stoffel *et al.*, 2006; Stoffel & Bollschweiler, 2008; Stoffel *et al.*, 2010; Butler, 2013; Butler & Stoffel, 2013; De la Peña, 2023).

Sin embargo, diferentes alteraciones geomorfológicas tienen expresión similar en la serie de anillos de crecimiento de los árboles, así como, similares causas de alteración del crecimiento, por lo que, es necesario que sean identificados a partir de fuentes complementarias antes de muestrearlos, por ejemplo, revisión de cartografía geomorfológica, interpretación de fotografías aéreas y consulta de los archivos históricos (Stoffel & Bollschweiler, 2008, 2009; Stoffel *et al.*, 2010).

En países como México, el dato geomorfológico a la escala adecuada debe ser generado como parte de los estudios de anillos de árboles debido a que no existe (Slaymaker, 2010). En los últimos años en México se han aplicado técnicas dendrocronológicas para entender la dinámica, magnitud y frecuencia de diversos peligros geológicos y geomorfológicos, demostrando su idoneidad en la elaboración de estudios paleoambientales (Franco *et al.*, 2018; Vázquez & Franco., 2022). Esta técnica usa como indicador a los anillos de crecimiento de los árboles, los cuales pueden utilizarse en la reconstrucción de procesos morfodinámicos y determinar periodos de estabilización-desestabilización geomorfológica en laderas y barrancos (Franco *et al.*, 2018).

La evaluación y análisis de los peligros geomorfológicos, específicamente los derivados de PRM han sido ampliamente estudiados (Valdés *et al.*, 2021). Los PRM en las últimas décadas han cobrado mayor importancia, debido al incremento en los desastres desencadenados por cambios de uso de suelo y desarrollo de asentamientos humanos en zonas susceptibles (CRED, 2020). El creciente interés por el tema, se ha visto reflejado en el aumento de los estudios dendrogeomorfológicos en Norteamérica y Europa, enfocados principalmente al análisis de peligros por procesos fluviales como inundaciones y flujos de escombros (Ballesteros *et al.*, 2015; Schraml *et al.*, 2015; Šilhán *et al.*, 2015; Šilhán *et al.*, 2022; Šilhán, 2023; Tichavský, 2023) y peligros por PRM como deslizamientos de tierra y procesos complejos como avalanchas de nieve (Bovis & Jakob, 2000; Stoffel, *et al.*, 2005 a, b, c; Stoffel *et al.*, 2008; Stoffel, *et al.*, 2006; Stoffel *et al.*, 2010; Stoffel *et al.*, 2011; Lopez, *et al.*, 2012;

Šilhán & Stoffel, 2015), estos se han estudiado principalmente en ambientes periglaciares, generando una gran cantidad de datos e información. Sólo algunos trabajos sobre PRM con técnicas dendrogeomorfológicas se han realizado en ambientes subtropicales de Argentina (Paolini *et al.*, 2005), y Grecia (Papadopoulos *et al.*, 2007). En México, la dendrogeomorfología ha sido escasamente aplicada para el análisis de PRM, los cuales se han enfocado en el análisis de caída de rocas, deslizamientos y flujos de escombros en el Sistema Volcánico Transversal y en la Sierra Norte de Puebla (Stoffel *et al.*, 2011; Franco *et al.*, 2017; Franco *et al.*, 2018; Pablo *et al.*, 2020; Vázquez & Franco, 2022; De la Peña, 2023).

En México, las características del relieve, climáticas y geológicas son propicias para el desarrollo de PRM. No obstante, éstos se han incrementado de manera alarmante debido a la deforestación, la erosión, la alteración del drenaje y el asentamiento de los habitantes en sitios inadecuados para construir sus viviendas (Alcántara-Ayala, 2004). Los desastres por inestabilidad de laderas se han concentrado principalmente en áreas con pendientes pronunciadas, como es el caso de las partes alta y media de cuencas montañosas (Enríquez *et al.*, 2010; Valdés *et al.*, 2022). De acuerdo con el mapa de zonificación de la peligrosidad de fenómenos geológicos-geomorfológicos de México, estos eventos son más comunes en zonas montañosas, como el Sistema Volcánico Transmexicano, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Chiapaneca y el norte de la península de Baja California. Más del 89% de las áreas susceptibles a inestabilidad de laderas se localizan en las zonas funcionales alta y media de las cuencas, concentrando el 70% de un total de 5,215,000 habitantes susceptibles a ser afectados por este tipo de peligro, lo cual hace necesario la elaboración de estudios relacionados con la ubicación espacial, prevención y mitigación de esta amenaza (Enríquez *et al.*, 2010).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2001), indica que el Sistema Volcánico Transversal presenta potencial alto para que se presenten PRM. Además, se localiza en la zona centro de México siendo constituido por un relieve geológicamente joven, conformado durante el Terciario y Cuaternario, donde predominan sistemas montañosos de origen volcánico y una tectónica activa (Ferrari, 2000). Condición que sugiere la ocurrencia de procesos geomorfológicos con cierta frecuencia, sobre todo en áreas geomorfológicamente activas, con escasa vegetación e importantes cambios de uso de suelo, afectadas también por fenómenos hidrometeorológicos como los huracanes provenientes del Océano Pacífico y Golfo de México (Franco *et al.*, 2018).

Lo anterior indica que, la mayoría de los estudios se han desarrollado en regiones montañosas del hemisferio norte, por lo que el desafío es, realizar investigaciones en zonas de montaña con climas intertropicales, así como poner énfasis en el estudio de procesos no abordados anteriormente, para así, mejorar enfoques y métodos utilizados comúnmente en la investigación y comprensión de los procesos geomorfológicos, incrementar el conocimiento de técnicas indirectas como la dendrogeomorfología, aportar información a escala espacial y temporal exacta de los años de ocurrencia de eventos y generar un aporte sustancial y moderno al estudio y manejo de los peligros geomorfológicos.

Por lo tanto, en la presente investigación se planteó como pregunta de investigación: ¿Cuáles son las ventajas del uso de modelos y herramientas de análisis dendrogeomorfológico en la evaluación de peligros por procesos de remoción en masa, en zonas de montaña intertropical?

Para responderla se definió como objetivo general: Modelar la dinámica espacio-temporal de los procesos de remoción en masa a escala detallada ocurridos en el estratovolcán Pico de Tancítaro, Michoacán, México.

Para cumplir con este objetivo se plantearon cuatro objetivos particulares: 1) analizar el estado actual del estudio de peligros por procesos de remoción en masa en América Latina; 2) conocer la distribución espacial multitemporal y la tipología de los procesos de remoción en masa en el estratovolcán Pico de Tancítaro; 3) describir los agentes condicionantes y detonantes de los procesos de remoción en masa en el estratovolcán Pico de Tancítaro; y 4) reconstruir espacio-temporalmente un PRM en el estratovolcán Pico de Tancítaro mediante técnicas dendrogeomorfológicas.

Para cumplir con los objetivos planteados se estructuró la tesis en 3 capítulos: en el capítulo I se aborda el panorama actual del estudio de peligros por PRM en América Latina mediante una revisión del estado del arte. Este capítulo muestra los resultados de la revisión bibliográfica y bibliométrica de los estudios publicados en América Latina sobre peligro por PRM en el periodo de 2000-2019, para lo cual, se realizó una búsqueda en cinco bases de datos (Scopus, WoS, SciELO, REDIB y Redalyc), cuyo análisis se abordó mediante cuatro categorías: 1) Información general, 2) Área de estudio, 3) Objetivos de la investigación y 4) Metodología. Con los resultados del capítulo se analizó el estado del arte en el tema y se logró identificar los avances recientes y las áreas de interés futuro, conformando un aporte sustancial para el estudio de peligro por procesos de remoción en masa en las zonas intertropicales. Este capítulo fue publicado en la revista *Physical Geography* (Valdés et al., 2023).

En el capítulo II, se realizó un inventario multitemporal de PRM en una montaña intertropical del Centro-Oeste de México. En este capítulo se identificó la distribución espacial, multitemporal y la tipología de los PRM ocurridos en el estratovolcán Pico de Tancítaro, también se describieron los agentes condicionantes y detonantes de los PRM. Los resultados muestran la cartografía de un inventario multitemporal de PRM del estratovolcán Pico de Tancítaro y del análisis de los factores condicionantes y detonantes de estos procesos. Los resultados obtenidos fueron de utilidad en la caracterización detallada de los PRM ocurridos en el estratovolcán Pico de Tancítaro, se generó información cartográfica base para el desarrollo de estudios de susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad y riesgo en la zona de estudio. Con lo anterior se contribuye a la planeación territorial y a la gestión del riesgo de desastre en las zonas de montaña intertropicales. Este capítulo fue publicado en la revista *Journal of Mountain Science* (Valdés et al., 2022).

En el capítulo III, se realizó un análisis de la peligrosidad por un PRM complejo en el estratovolcán Pico de Tancítaro, México. Primeramente, se llevó a cabo su caracterización geomorfológica y de la estructura del paisaje, y posteriormente el análisis dendrogeomorfológico de del evento. Los resultados de este capítulo permitieron generar datos espaciales y temporales a escala de gran detalle, y comprobar la eficiencia de los análisis dendrogeomorfológicos para el estudio del peligro, la exposición, la vulnerabilidad y el riesgo por procesos de remoción en masas complejos.

Referencias Generales

- Alcántara-Ayala, I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology*. 61(1-2):19-40. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.11.004>
- Alestalo, J. (1971). Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia-International Journal of Geography*. 105(1):1–139. <https://fennia.journal.fi/article/view/40757>
- Baillifard, F., Jaboyedoff, M. & Sartori, M. (2003). Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using a GIS-based parameter rating approach. *Natural Hazards Earth System Science*. 3:435–442. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-435-2003>
- Ballesteros, C.J.A., Stoffel, M., St George, S. & Hirschboeck, K. (2015). A review of flood records from tree rings. *Progress in Physical Geography*. 39(6):794-816. <https://dendrolab.ch/wp-content/uploads/2018/10/ProgressinPhysicalGeography-2015-Ballesteros-Cnovas-0309133315608758.pdf>
- Bokwa, A. (2013). Natural hazard. In: Bobrowsky, P. (Editor) *Encyclopedia of Natural Hazards*. Springer Dordrecht, Heidelberg.
- Bovis, M. J., & Jakob, M. (2000). The July 29, 1998, debris flow and landslide dam at Capricorn Creek, Mount Meager Volcanic Complex, southern Coast Mountains, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 37(10):1321–1334. <https://doi.org/10.1139/e00-042>
- Budetta, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards Earth System Science*. 4:71–81. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-71-2004>
- Bunce, C. M., Cruden, D. M., & Morgenstern, N. R. (1997). Assessment of the hazard of rock fall on a highway. *Canadian Geotechnical Journal*. 34:344–356. <https://doi.org/10.1139/t97-009>
- Butler, D. (2013). The field tradition in mountain geomorphology. *Geomorphology*. 200:42-49. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.021>
- Butler, D. & M. Stoffel (2013). John F. Shroder, Jr.'s 1978 and 1980 papers on dendrogeomorphology. *Progress in Physical Geography*. 37(5):717-721. <https://doi.org/10.1177/0309133313501107>
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2001). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas nacional de riesgos de la república mexicana. Secretaría de Gobernación. México. 90-100. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD004433.PDF>
- CRED, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters & UNDRR, United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2020). Human cost of disasters. An overview of the last 20 years 2000–2019. United Nations. <https://www.emdat.be/publications>
- Cruden, D. M. & Varnes, D. J. (1996). Landslides types and processes. *Landslides Investigation and Mitigation*. 247:36–75. Washington, DC. USA. Transportation Research Board. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>
- De la Peña, G.K.A. (2023). Evaluación de peligro por procesos de remoción en masa en laderas asociadas a ambientes montanos intertropicales. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Enríquez, G.C., Oropeza, O.O. & Ortiz, P.M.A. (2010) Peligros geológico-geomorfológicos. Las cuencas hidrográficas de México. INECC. 38-44. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/02/CuencasHidrogra%CC%81ficas-1.pdf>

- Evans, S.G. & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazards at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30:620–636. <https://doi.org/10.1139/t93-054>
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. LIII:84-92. <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/5301/5301-%285%29Ferrari.pdf>
- Franco, R.O., Stoffel, M. & Vázquez, S.L. (2017). Tree-ring based reconstruction of rockfalls at Cofre de Perote volcano, Mexico. *Geomorphology*. 290(1):142-152. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.003>
- Franco, R.O., Vázquez, S.L., Stoffel, M. & Villanueva, D.J. (2018). Potencial dendrogeomorfológico de coníferas en volcanes del centro de México. *BOSQUE*. 39(2):191-204. <http://revistas.uach.cl/index.php/bosque/article/view/3539>
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J. & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps a review. *Science of the Total Environment*. 493:1138-1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
- Guzzetti, F. (2000). Landslide fatalities and the evaluation of landslide risks in Italy. *Engineering Geology*. 58:89–107. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00047-8)
- Hungr, O., Evans, S. G. & Hazzard, J. (1999). Magnitude and frequency of rock falls along the main transportation corridors of south-western British Colombia. *Canadian Geotechnical Journal*. 36:224–238. <https://doi.org/10.1139/t98-106>
- Hungr, O., Leroueil, S. Y. & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*. 11(2):167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Lopez, S.J., Corona, C., Stoffel, M., Astrade, L., Berger, F. & Malet, J.P. (2012). Dendrogeomorphic reconstruction of past landslide reactivation with seasonal precision: the Bois Noir landslide, southeast French Alps. *Landslides*. 9:189–203. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0284-6>
- Lugo, H.J.I., Zamorano, O.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: Causa y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 22(2):212-228. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742005000200212&lng=es&tlng=es.
- Matthews, J.A. & Herbert, D.T. (2008): *Geography: a very short introduction*. Oxford University Press. New York. USA.
- Mergili, M., Marchant, S.C. & Moreiras, S. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. 24(2):113-131. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50211>
- Middelmann, M.H. (2007). *Natural hazard in Australia. Identifying risk analysis requirement*. Geoscience Australia. Canberra.
- Paolini, L., Villalba, R. & Grau, H. R. (2005). Precipitation variability and landslide occurrence in a subtropical mountain ecosystem of NW Argentina. *Dendrochronología*. 22(3):175–180. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.06.001>
- Pablo, P.M.A., Franco, R.F. & Alcántara-Ayala, I. (2020). Debris flows analysis base on dendrochronological approach at Ixcamaxtitlán, Sierra Norte de Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 37(2):109-120. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.2.1556>

- Papadopoulos, A. M., Mertzanis, A. & Pantera, A. (2007). Dendrogeomorphological observations in a landslide on Tymfristos mountain in Central Greece. In: Stokes, A., Spanos, I., Norris, J. E. and Cammeraat, E. (eds.) *Eco and ground bio-engineering: The use of vegetation to improve slope stability*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 223–230.
- Rubiales, J.M., Gómez, M.F. & Bodoque, J. M. (2009). Los métodos dendrogeomorfológicos como herramientas de datación de procesos erosivos: aplicaciones a la estimación de tasas de erosión. *Wood Technology*.
- Schraml, K., Oismüller, M., Stoffel, M., Hübl, J. & Kaitna, R. (2015). Debris-flow activity in five adjacent gullies in a limestone mountain range. *Geochronometria*. 42:60–66. <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0007>
- Schumm, S. A. (1988). Geomorphic hazards: problems of prediction. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband*. 67:17–24.
- Shroder, J. F. (1978). Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*. 9(2):168–185. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(78\)90065-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90065-0)
- Šilhán, S. & Stoffel, M. (2015). Impacts of age-dependent tree sensitivity and dating approaches on dendrogeomorphic time series of landslides. *Geomorphology*. 236(1):34–43. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.003>
- Šilhán, K., Pánek, T. & Škarpich, V. (2022). Diversification of landslide areas as a means for reducing noise in dendrogeomorphic dating. *Quaternary Geochronology*. 72:101362. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101362>
- Šilhán, K., Pánek, T., Hradecký, J. & Stoffel, M. (2015). Tree-age control on reconstructed debris-flow frequencies: examples from a regional dendrogeomorphic reconstruction in the Crimean Mountains. *Earth Surface Processes and Landforms*. 40:243–251. <https://doi.org/10.1002/esp.3623>
- Šilhán, K. (2023). Regional flood occurrence in the culmination zone of medium-high mountain ranges by tree-ring based reconstruction: Frequency, triggers, dynamics. *Science of the Total Environment*. 905:166938. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166938>
- Slaymaker, O. (2010). Mountain hazard. *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*, eds. Irasema Alcántara-Ayala and Andrew S. Goudie. Cambridge University Press.
- Slaymaker, O. (2009). The Future of Geomorphology. *Geography Compass*. 3(1):329–349. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00178.x>
- Stoffel, M. & Bollschweiler, M. (2009): What tree rings can tell about earth-surface processes. Teaching the principles of dendrogeomorphology. *Geography Compass*. 3:1013–1037. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2009.00223.x>
- Stoffel M. & Bollschweiler M. (2008). Tree-ring analysis in natural hazards research an overview. *Natural Hazards Earth Systems Science*, 8:187–202. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-187-2008>
- Stoffel, M. & Corona, C., (2014). Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Tree-ring research*. 70(1):3–20. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-70.1.3>
- Stoffel, M., Bollschweiler, M. & Hassler, G.R. (2006). Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity a dendrogeomorphological approach. *Earth Surface Processes and Landforms*. 31:1424–1437. <https://doi.org/10.1002/esp.1363>

- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Widmer, S. & Sorg, A. (2010). Spatio-temporal variability in debris-flow activity: a tree-ring study at Geisstriftbach (Swiss Alps) extending back to AD 1736. *Swiss Journal of Geoscience*. 103:283–292. <https://doi.org/10.1007/s00015-010-0014-4>
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Vázquez, S.L., Franco, R.O. & Palacios, D. (2011). Dendrogeomorphic dating of rockfalls on low-latitude, high-elevation slopes: Rodadero Iztaccíhuatl volcano, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*. 36(9):1209-1217. <https://doi.org/10.1002/esp.2146>
- Stoffel, M., Conus, D., Grichting, M., Lièvre, I. & Maître, G. (2008). Unraveling the patterns of late Holocene debris-flow activity on a cone in the Swiss Alps: chronology, environment and implications for the future. *Global and Planetary Change*. 60:222–234. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.001>
- Stoffel, M., Lièvre, I., Conus, D., Grichting, M.A., Raetzo, H., Gärtner, H.W. & Monbaron, M. (2005c). 400 years of debris flow activity and triggering weather conditions. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0387:YODAAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0387:YODAAT]2.0.CO;2)
- Stoffel, M., Lievre, I., Monbaron, M. & Perret, S. (2005b). Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Swiss Alps) a dendrochronological approach. *Zeitschrift für Geomorphologie*. 49:89–106. <https://folia.unifr.ch/unifr/documents/299860>
- Stoffel, M., Schneuwly, D., Bollschweiler, M., Lièvre, I., Delaloye, R., Myint, M. & Monbaron, M. (2005a). Analyzing rockfall activity (1600–2002) in a protection forest—a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*. 68:224–241. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.017>
- Strahler, A. (2013). *Introducing Physical Geography*. Boston University. Sixth edition. Jhon Wiley & Sons, Inc. USA.
- Tichavský, R. (2023). Understanding hydrometeorological triggers of natural hazards through dendrogeomorphology: Methods, limitations, and challenges. *Earth-Science Reviews*. 244:104546. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104546>
- Urban, M. A. & B. L. Rhoads (2003). Catastrophic human induced change in stream-channel planform and geometry in an agricultural watershed, Illinois, USA. *Annals of the Association of American Geographers*. 93(4):783–796. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.2003.09304001.x>
- Valdés, C.A.C., Mendoza, M.E., Carlón-Allende, T. & Macías, J.L. (2023). A review of recent studies on landslide hazard in Latin America. *Physical Geography*. 44(3):243-286 <https://doi.org/10.1080/02723646.2021.1978372>
- Valdés C.A.C., Mendoza, M.E., Carlón-Allende, T. & Macías, J.L. (2022). Multitemporal landslide inventory analysis in an intertropical mountain in central-western Mexico. Basis for hazard management. *Journal of Mountain Science*. 19:1650-1669. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7223-3>
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*. 102(3–4):112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Van Westen, C. J., Van Asch, T. W. J. & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation – Why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 65(2), 167–184. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>

- Vázquez, R.M. & Franco, R.O. (2022). Reconstrucción dendrogeomorfológica de procesos de remoción en masa y lahares en las Barrancas Seca y Ojo Salado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*. 107. <https://doi.org/10.14350/rig.60470>
- White, G. F. (ed.) (1974). *Natural Hazards: Local, National, Global*. New York: Oxford University Press.

Capítulo I. Revisión de estudios recientes sobre peligros por procesos de remoción en masa en América Latina

A review of recent studies on landslide hazard in Latin America

Alejandro César Valdés Carrera ^a, Manuel E. Mendoza ^a,
Teodoro Carlón Allende ^b and José Luis Macías ^c

^aCentro De Investigaciones En Geografía Ambiental, UNAM, Morelia, México; ^bCONACYT-Instituto De Geofísica-Unidad Michoacán, UNAM, Morelia, México; ^cInstituto De Geofísica-Unidad Michoacán, UNAM, Morelia, México

ABSTRACT

Over the last few decades, the impact of landslides has increased in Latin America. However, there is a deficiency in the region of diagnostic studies on landslide hazards. This review analyzes the state of the art of studies on landslide hazard occurred in Latin America. A search for articles published from 2000 to 2019 was carried out in Scopus, WoS, SciELO, REDIB, and Redalyc. The search yielded 1,365 publications, which were purged obtaining 283 articles, analyzed through a database organized in four categories: general information, study area, research objectives, and methodology. We identified an increase in the number of publications from the year 2011. Seventy-five percent of the 20 countries in the region published papers on landslides that had occurred in these countries, mainly research focus on susceptibility and characterization, and a reduced number, on hazardousness, inventories, trigger factors and conditioning factors. The results suggest the opportunity to incorporate novel methods, tools, techniques, and inputs into research of landslides in Latin America. This review constitutes an analytical and critical contribution to the study of landslide hazards in the region and indicates the studies that are urgent to enforce its integral management in the region and in other intertropical zones.

ARTICLE HISTORY

Received 21 January 2021
Accepted 5 September 2021

KEYWORDS

Geomorphology;
intertropical zones;
landslides; natural hazards;
risk management

Introduction

Since 1980, disasters caused by natural hazards have affected 2.5 million people throughout the world causing a total economic loss of 3 trillion dollars, which represents an over 600% increase from the 23 billion dollars per year during the 1980s, to 150 billion dollars annually during the last decade (WBG, The World Bank Group, 2019). Between 2000 and 2019, the disastrous events concentrated mainly in the Asian (42%), American (24%), European (18%) and African (16%) regions, mostly due to extreme climatic events (CRED, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters & UNDRR, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2020).

Natural hazards are natural phenomena, processes, or events that occur unexpectedly or uncontrollably and in an unusual magnitude that are capable of causing loss of life, injuries, or other impacts on human health, damage to property, socioeconomic disruption, and environmental degradation (Bokwa, 2013; Middelmann & [Ed.], 2007; UNISDR, United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2019). Hazard is expressed as probability of occurrence within a reference period and is a function of the *spatial probability* – static environmental or conditioning factors – and the *temporal probability* related indirectly to static factors and directly to dynamic factors (triggering factors) (Van Westen et al., 2008, 2006). Natural hazards are associated with geological, geomorphic, or hydrometeorological processes and their combinations. Geomorphic processes predominate in mountainous zones, where natural hazards like landslides are common (Sepúlveda & Petley, 2015; Stoffel & Corona, 2014). Landslide – mass wasting or mass movement – is defined as the downslope movement of a mass of rock, debris, or earth under the influence of gravity (Cruden & Varnes, 1996). Over the past few decades, landslides have become one of the most studied geomorphic processes due to the hazards they represent. Recent reports have shown an increase in frequency, distribution, and magnitude of landslides due to climate change, particularly torrential precipitation events (Borgatti & Soldati, 2010; Froude & Petley, 2018; Gariano & Guzzetti, 2016; Gobiet et al., 2014).

Landslides can occur either suddenly or slowly and be classified into flows, slides, topples, falls, spreads, or a combination of two or more of these classes (Cruden & Varnes, 1996; Hungr et al., 2014). These processes are triggered by events such as intense and prolonged precipitation, rapid snow melting, earthquakes, volcanic activity, floods, and a variety of human activities (Alcántara-Ayala, 2000; Mergili et al., 2015). Understanding the underlying geomorphic processes and knowledge about past events are essential requirements for assessing the hazards from landslide events. For that reason, a better understanding of geomorphic processes and its effects on landscapes are needed to increase the adaptation and mitigation capabilities to risks derived from the intensification of geomorphic hazards (Slaymaker, 2010).

Several approaches have been used to study the landslide hazards as corroborated by review publications on the use of GIS for landslide hazard assessment (Huabin et al., 2005), the use of spatial data to evaluate susceptibility, hazards and vulnerability from landslides (Van Westen et al., 2008), image processing and remote sensing to map natural hazards and disasters (Joyce et al., 2009), mapping tools to generate landslide inventory maps (Guzzetti et al., 2012), and methods for the classification of landslide impacts and processes (Alimohammadlou et al., 2013).

During the past five years, review articles focused on the analysis of the methodologies used to evaluate landslide susceptibility, hazard, and risk were published. Among which are: an analysis of multi-risk methodologies for natural hazards (Gallina et al., 2016), the statistical methods in the assessment of landslide susceptibility (Reichenbach et al., 2018), the nature-based solutions to reduce the risk of shallow landslides (Arce et al., 2019), the quantification methods for multi-hazard interrelationships (Tilloy et al., 2019), and the advances and limitations of geophysical methods in landslide studies (Pazzi et al., 2019). In the same period, other important reviews were published such as: landslide in response to climate change (Gariano & Guzzetti, 2016), debris-flow monitoring and warning (Hurlimann et al., 2019), multi-risk assessment in mountainous regions (Terzi et al., 2019), and landslide early warning systems (Guzzetti et al., 2020).

The above-mentioned reviews focus mainly on Europe and North America, indicating the need for studies on landslide hazards in Latin America, Africa, Southern Asia, and Oceania, especially in the intertropical regions. The latter need is crucial because the intertropical zones are the most densely inhabited areas, which has multiplied the disaster risk in the settlement affected by geomorphic hazards (Arce et al., 2019; Petley, 2012). The intertropical mountainous regions have high rates of land use change. Deforestation promotes the establishment of croplands, grazelands or forestry surfaces and could become landslide-susceptible areas (Huddleston et al., 2003).

The rise in frequency of intense rainfalls and the occurrence of high magnitude earthquakes has also increased the number of recurrences of landslide events (Körner & Ohsawa, 2005; Slaymaker & Embleton, 2018; UNISDR, United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2019). Because of its geographic location, Latin America is severely exposed to hydrometeorological hazards like hurricanes, tropical storms, and flooding, as well as to geophysical hazards such as landslides, earthquakes, tsunamis, and volcanic eruptions (ECLAC, Economic Commission for Latin America and the Caribbean, 2014). These natural hazards affect the region's 216 million inhabitants, a population that represents 38% of the global total. The most affected sectors correspond to housing (74%), followed by the productive sector (19%), and the infrastructure (7%) (ECLAC, Economic Commission for Latin America and the Caribbean, 2005, 2014; UNDP, United Nations Development Programme, 2020). Between 1970 and 2011, the region concentrated 14.5% (367) of the total world disasters – mainly landslides and earthquakes – that were analyzed in several case studies published as scientific articles (ECLAC, Economic Commission for Latin America and the Caribbean, 2014; Petley, 2012).

A few review articles about natural hazards and risks at global and regional levels mentioned Latin American countries. Sepúlveda and Petley (2015) identified the Dominican Republic, Haiti, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Mexico, Nicaragua, Panama, Argentina, Bolivia, Brazil, Chile, Colombia, Ecuador, Peru and Venezuela as the countries with the highest number of fatalities caused by landslides. Mexico, Peru, and Argentina were considered in the study on the effect of climate change on landslides (Gariano & Guzzetti, 2016). Arce et al. (2019) mentioned that land cover plays a key role in the reduction of shallow landslide risks in Mexico, Guatemala, Nicaragua, Costa Rica, Colombia, Ecuador, Brazil, and Chile. Additionally, Guzzetti et al. (2020) indicated that countries like Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panama, the Dominican Republic, Colombia, and Brazil have applied geographical analysis for elaborating landslide early warning systems.

Despite this, there is a lack of systematic analyses of the different approaches of landslide hazard studies in Latin America. To evaluate this, we reviewed the available literature on landslide hazards that has happened in the region, considering all the stages necessary to describe its spatial distribution and temporal probability (environmental factors, triggering factors, and landslide inventories). The review allowed to identify needs and opportunities in future research of geomorphic processes, landslide risk and disaster management, and land use planning in the region.

Materials and methods

The search for scientific articles

A search was carried out in the Scopus, WoS (Web of Science); and SciELO (Scientific Electronic Library Online), REDIB (*Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico*), and Redalyc (*Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*), which are the most robust databases of Latindex (*Sistema Regional de información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*). The produced database covers a twenty-year period (from 01/01/2000 to 12/31/2019) and highlights recent research trends. Boolean operators were used that include different ways to refer to landslide processes, and their typology by means of 27 keywords (Table 1).

The search was carried out using the title, keywords, and the summary of the articles. We used quotation marks between the keywords, and they were connected by the OR logic operator. The query included Argentina, Bolivia, Brazil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haiti, Honduras, Mexico, Nicaragua, Panama, Paraguay, Peru, the Dominican Republic, Uruguay, and Venezuela, which are the 20 countries in the Latin American region (EcuRed contributors, 2019; RAE, Real Academia Española, 2005); articles in English, Spanish, and Portuguese were compiled.

In Scopus, the search focused on Earth and Planetary Sciences and Environmental Sciences. In WoS, SciELO, and REDIB, the consulted research areas were Physical Geography, Geology, Geography, Environmental Sciences, Environmental Studies, Meteorology Atmospheric Sciences and Water Resources. In Redalyc, the Earth Sciences, Geology, Geography and Territorial Studies areas were covered.

Depuration of the articles database

The articles resulting from the search of the keywords were chosen – by hand, case by case – by selecting those referring to landslide hazard on continental surfaces, discarding studies in oceanic environments. We discarded articles dealing with the following topics: vulnerability, exposure to threat, risk perception, risk, prevention, early warning, and disaster, because they represent later stages of landslide hazard. Also, articles about exogenous processes like soil erosion, flooding, subsidence, lahars, and tsunamis. The depuration obeyed to the fact that the above-mentioned topics did not contribute to the objective of this review.

Subsequently, we compared each database (Scopus, WoS, SciELO, REDIB, and Redalyc) to identify duplicate articles. The articles found in two or more datasets were purged, leaving a single version of the repeated titles.

Data systematization and analysis

The resulting articles were evaluated in four categories: (1) General Information (who and when), (2) Study Area (where), (3) Research Objectives (what and why), and (4) Methodology (how and with what). Each category was divided according to the possible answers to the posed questions (Table 2).

Capítulo I

Tabla 1. Keyword list used for article search

Table 1. Keyword list used for article search.

Keyword	Definition	Spanish translation
Landslides	The movement of a mass of rock, debris or earth down a slope, influenced by gravity (Cruden & Varnes, 1996; Alcántara-Ayala, 2000). They are physical systems that develop in time through several stages, and encompass all types of mass movements (Hungr et al., 2014).	Deslizamientos
Mass movement processes		Procesos de remoción en masa
Gravitational processes		Procesos gravitacionales
Slope processes		Procesos de ladera
Slope instability		Inestabilidad de ladera
Geomorphic processes	Manifestation of mechanical stresses operating on earth materials to produce various forms of strain (Rhoads, 2013).	Procesos geomorfológicos
Geomorphic hazards	Those hazards caused by exogenic processes due to the action of water, wind, ice and gravity (Marston et al., 2017).	Peligros geomorfológicos
Mass movement hazards	Physical entity, process or situation – that has the potential to cause damage. The threatening condition resulting from the activity – magnitude or frequency – of that process, expressed as the probability of occurrence of a damaging landslide (M. Crozier, 2013).	Peligros por procesos de remoción en masa
Mass wasting hazards		Peligros por procesos remoción en masa
Rock fall	Detachment of soil or rock from a steep along a surface on which little or no shear displacement takes place. The material then descends mainly through the air by falling, bouncing or rolling. Movement is very rapid to extremely rapid (Cruden & Varnes, 1996).	Caída o desprendimiento de rocas
Debris fall		Caída o desprendimiento de derrubios o escombros
Earth fall		Caída o desprendimiento de tierra
Rock topple	It is the forward rotation out of the slope of a mass of soil or rock about a point or axis below the center of gravity of the displaced mass. Toppling is sometimes driven by gravity exerted by material upslope of the displaced mass and sometimes by water or ice in cracks in the mass. Topples range from extremely slow to extremely rapid, sometimes accelerating throughout the movement (Cruden & Varnes, 1996).	Vuelco o desplome de rocas
Debris topple		Vuelco o desplome de derrubios o escombros
Earth topple		Vuelco o desplome de tierra
Rock slide	It is a downslope movement of a soil or rock mass occurring dominantly on surfaces of rupture or on relatively thin zones of intense shear strain. Movement does not initially occur simultaneously over the whole of what eventually becomes the surface of rupture; the volume of displacing material enlarges from an area of local failure (Cruden & Varnes, 1996).	Deslizamiento de rocas
Debris slide		Deslizamiento de derrubios o escombros
Earth slide		Deslizamiento de tierra
Rock flow	It is a spatially continuous movement in which surfaces of shear are short-lived, closely spaced, and usually not preserved. The distribution of velocities in the displacing mass resembles that in a viscous liquid. The lower boundary of the displaced mass may be a surface along which appreciable differential movement has taken place or a thick zone of distributed shear (Cruden & Varnes, 1996).	Flujo de rocas
Debris flow		Flujo de derrubios o escombros
Earth flow		Flujo de tierra
Rock spread	An extension of a cohesive soil or rock mass combined with a general subsidence of the fractured mass of cohesive material into softer underlying material. The surface of rupture is not a surface of intense shear. Spreads may result from liquefaction or flow of the softer material (Cruden & Varnes, 1996).	Expansión lateral en rocas
Debris spread		Expansión lateral en derrubios o escombros
Earth spread		Expansión lateral en tierra
Rock avalanche	Very rapid or extremely rapid, massive or shallow flow motion of fragmented rock, debris or soil, partially or fully saturated on a steep slope, without confinement in an established channel. Usually initiate as slides or falls and are associated with failures or residual soil, colluvial, pyroclastic, or organic venner (Hungr et al., 2014).	Avalancha de rocas
Debris avalanche		Avalancha de derrubios o escombros
Earth avalanche		Avalancha de tierra

The methods used in the articles were classified according to the classification of hazard assessment methods of Soeters and van Westen (1996), Van Westen et al. (2006), and Van Westen et al. (2008). This classification includes six

Table 2. Variables used in the individual assessment of articles.

Category	Variable	Description
General information	Language	What is the language of the publication?
	Source	What is the complete reference of the article?
	Who. When	
	Institution	What was the responsible institution (first author)?
	Author	Who was the lead author?
	Journal	In which journal was the article published?
Study area	Year	When was the article published?
	Where	
	Country	In which country was the research applied?
	Scale	What was the spatial scope of the research made?
Research objectives	Funding source	Who financed the research?
	What. Why	
	Topic	What were the application areas of the study?
	Type of process	What type of process was studied?
	Material	What were the physical characteristics of the process?
	Specific approach	What was the specific area of interest addressed in the study?
Methodology	Triggering factor	What was the factor that yielded the event?
	How. With what	
	Method	Which were the approaches applied?
	Tool	What were the applications and instruments that were used?
	Technique	What were the procedures that were followed?
	Materials	Which were the inputs used?

approaches: 1) Inventory: It consists of locating the phenomena and determining its typology, mechanisms, triggering factors, frequency of occurrence, volumes, and the damage caused; 2) Heuristic: It allows to analyze qualitative maps, which are evaluated and weighted based on expert knowledge about the probability of process occurrence; 3) Statistical: It allows evaluating the spatial probability, but it is deficient in the temporal probability evaluation; 4) Deterministic: It requires detailed databases about the spatial variations of the parametric values, which are the inputs for the stability models providing a calculation of safety factors; 5) Characterization: Those studies that encompassed the geological-geomorphological, hydrometeorological, seismic, and/or land cover descriptive studies that were not approached through the four above-mentioned methods; and 6) Heuristic-Statistical: Includes research in which heuristic and statistical methods were applied or compared.

Results

The search of the 27 keywords resulted in 1,365 articles, 353 in Scopus, 175 in WoS, 176 in SciELO, 118 in REDIB, and 543 in Redalyc. After applying the first filter, we obtained a total of 404 articles (Figure 1). Of the 404 listed articles, 200 were unduplicated and 197 were found in two or more of the databases. The list with 197 articles was purged by leaving a single version of the repeated titles, with which we obtained 83 articles. The final list included 283 articles including the 200 unduplicated articles (included only in one database) and the 83 articles that were repeated in more than one database (Appendix-Table A1).

Of the 27 keywords used in the original search, only the following 15 matched in the titles, keywords, and English abstract of the 283 selected articles: landslides, gravitational processes, geomorphic hazards, mass movement hazards, mass movement processes,

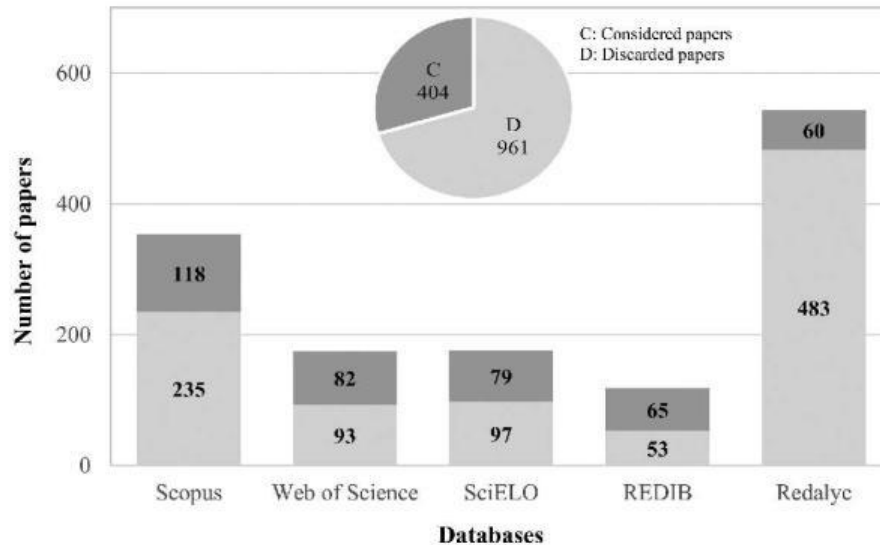


Figure 1. Distribution of articles by database including results from the original search and from the analysis after application of the first filter.

mass wasting hazards, slope processes, slope instability, rock fall, rock slide, debris slide, debris flow, earth flow, rock avalanche, and debris avalanche. The keywords having no matches were geomorphic processes, debris fall, earth fall, rock topple, debris topple, earth topple, earth slide, rock flow, rock spread, debris spread, earth spread and earth avalanche, which was due to the studied processes not having been classified in any of these categories or not included in the title, keyword or abstract.

One keyword was matched in 70.7% (200) of the publications, landslides (135), debris flow (20), and mass movement processes (13) were the most frequently matched, which shows that these are the most common words used in the region to refer to gravitational processes. Matches were also found for the keywords debris avalanche (10), rock avalanche (6), slope instability (6), gravitational processes (4), mass wasting hazard (2), rock fall (2), mass movement hazards (1), and slope processes (1). Two keywords were matched in 24.7% (70) of the publications in 20 combinations and three keywords coincided in 4.6% (13) of the publications in 12 combinations (Figure 2).

Studies on landslide hazards

Between 2000 and 2019, we observed an exponential increase in the number of published articles about landslide hazards, with a significant annual increment ($R^2 = 0.913$). In the last six years (2014–2019), 54.1% of the total articles were published. This period concentrated the main production years (2015, 2017, 2018 and 2019), with values that were higher than the production mean (22 articles) reported for the last nine years (2011–2019). The number of articles published

Figura 2. Keywords matched in the analyzed articles

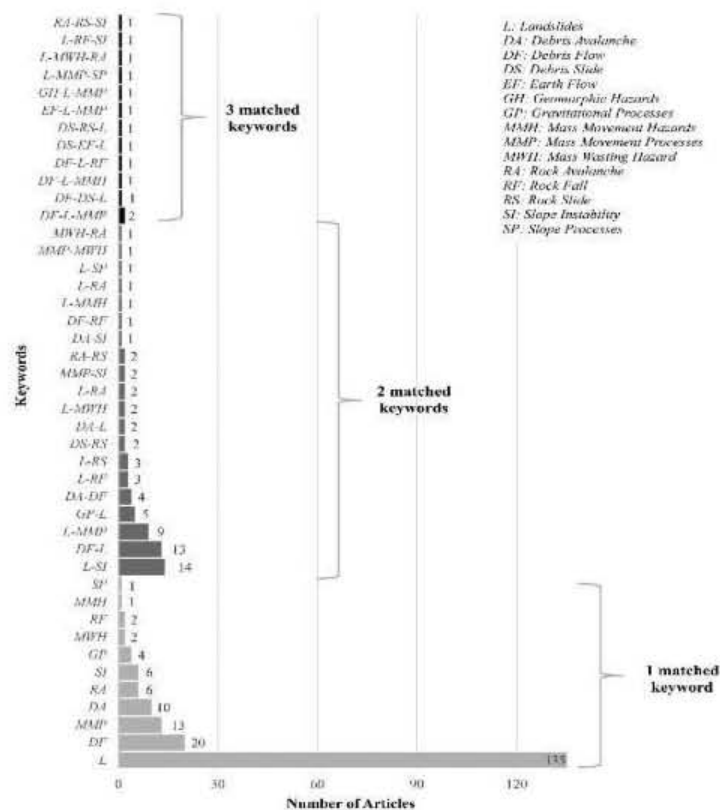


Figure 2. Keywords matched in the analyzed articles.

per year between 2000 and 2010 was under 15 (7 in average), adding to 82 articles for the period. Since 2011, the publications show an increasing trend reaching 283 articles by the year 2019, a year in which 35 articles were produced (Figure 3).

The articles were published in 103 scientific journals, but most of them (53.4%) were concentrated in 16. The journals with the highest numbers of publications were *Revista de la Asociación Geológica Argentina* with 23 (8.1%), *Investigaciones Geográficas* with 16 (5.7%), *Landslides* with 13 (4.6%), *Natural Hazards* with 12 (4.2%), *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* with 12 (4.2%), *Geomorphology* with 11 (3.9%), *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* with 10 (3.5%), *Journal of Volcanology and Geothermal Research* with 9 (3.2%), *Quaternary International* with 7 (2.5%), *Bulletin of Engineering Geology and Environment* with 7 (2.5%), *Revista Geológica de América Central* with 6 (2.1%), *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, *Engineering Geology*, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, *Revista Geográfica Venezolana*, and *Revista EIA*, with 5 publications each. The remaining articles (46.6%) were published in 87 scientific magazines.

Figura 3. Number of published (bars) and accumulated (line) articles per year during the 2000-2019 period.

The affiliation of the articles' lead authors was distributed among 112 institutions including universities, and research institutes and centers. Over half (56.2%) of the published articles concentrated in 17 institutions located in Mexico, Argentina, Chile, Colombia, Costa Rica, Brazil, Cuba, Venezuela and France. The institutions with the most publications were, in decreasing order, the *Universidad Nacional Autónoma de México* (18.4%), the *Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales-Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IANIGLA-CONICET)* (5.3%), the *Universidad de Chile* (3.9%), the *CONICET-Universidad Nacional de San Juan*, the *Universidad de Buenos Aires* and the *Universidad Nacional de Colombia* (3.2% each), and the *Universidad de Costa Rica* and the *Universidade de São Paulo* (2.5% each) (Figure 4).

A total of 138 (48.8%) articles were written in English, which was the most frequent language, followed by 122 (43.1%) articles in Spanish and 23 (8.1%) in Portuguese. Between 2000 and 2009, 26.1% of the total articles were produced, i.e. 41 articles in Spanish, 32 articles in English and one article in Portuguese. For the period 2010–2019, 73.9% of the total articles were produced, prevailing 106 articles in English, followed by 81 articles in Spanish and 22 articles in Portuguese. The highest number of papers in English were published in *Landslides* (13), *Natural Hazards* (12), and *Geomorphology* (11). The *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (21), *Investigaciones Geográficas* (13), and *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* (11) published the most articles in Spanish. Finally, the *Revista Brasileira de Geomorfologia* (4), *Geologia USP* (2), *Caderno de Geografia* (2), and *Pesquisas em Geociencias* (2) were the journals with the highest number of articles in Portuguese.

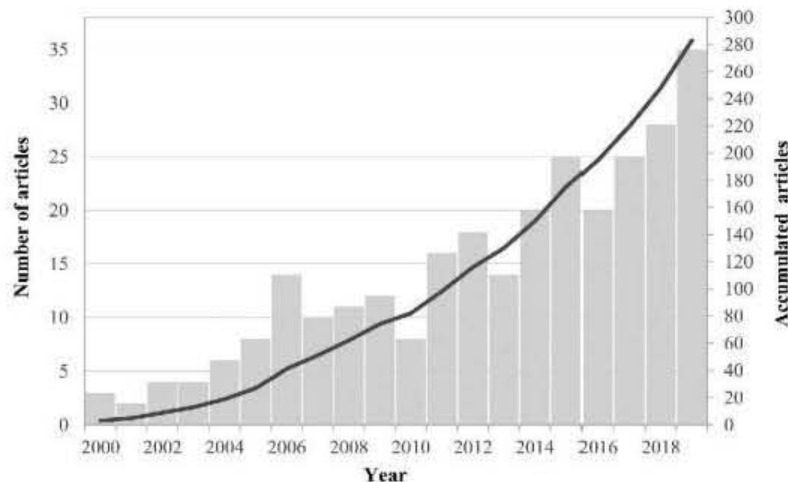


Figure 3. Number of published (bars) and accumulated (line) articles per year during the 2000–2019 period.

Figura 4. Lead author affiliations

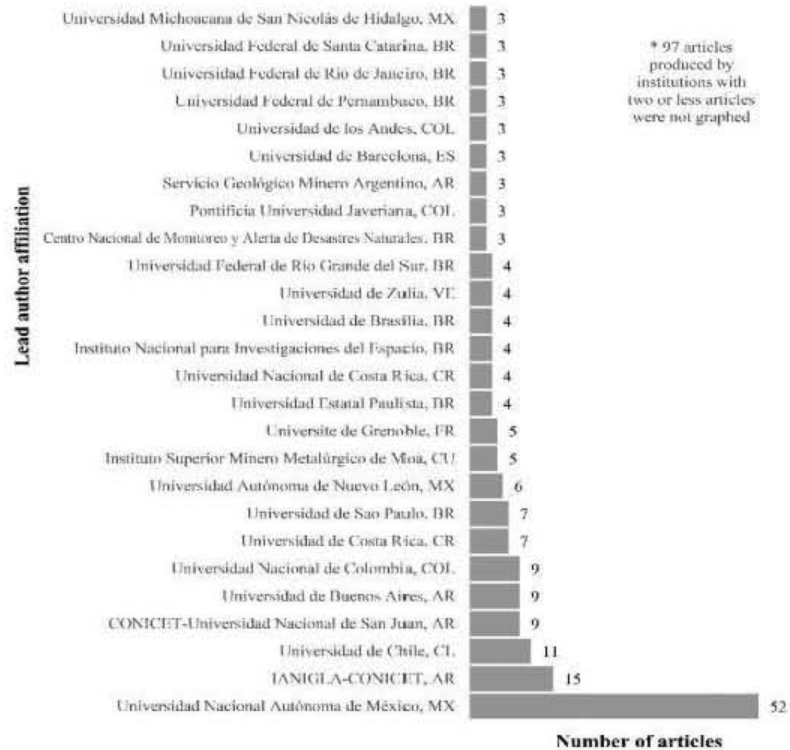


Figure 4. Lead author affiliations.

Spatial distribution of published research on landslide hazards

During the analyzed period, only 15 of the 20 Latin American countries published articles on landslides. Six of these countries concentrated 82% of the publications: Mexico with 27.2% (77), Brazil with 18.7% (53), Argentina with 15.5% (44), Colombia with 10.6% (30), Costa Rica with 4.9% (14), and Chile with 4.9% (14). The remaining 18% corresponded to 51 articles published in Venezuela (11), Peru (11), Cuba (7), Ecuador (7), El Salvador (4), Chile-Argentina (4), Nicaragua (3), Bolivia (2), Panama (1), and Honduras (1) (Figure 5).

One hundred and ninety-six articles (69% of the total number) covered regional scales – at the levels of hydrographic basins, provinces, autonomous communities, and groups of states and municipalities, 68 (24%) publications were detailed case studies of several types of landslides at the local scale, and 19 (7%) articles were at the municipal scale including case studies of municipalities, cities, or towns.

72.4% of the total articles analyzed were financed (205 articles), of these, 168 by national agencies, 20 by international and 17 received mixed support (national and international). 94.6% of the financed articles (194) received funding from public agencies, 4.9% (10) from public and private, and one research was funded by

Figura 5. Distribution of articles published on landslides occurred by country in Latin America

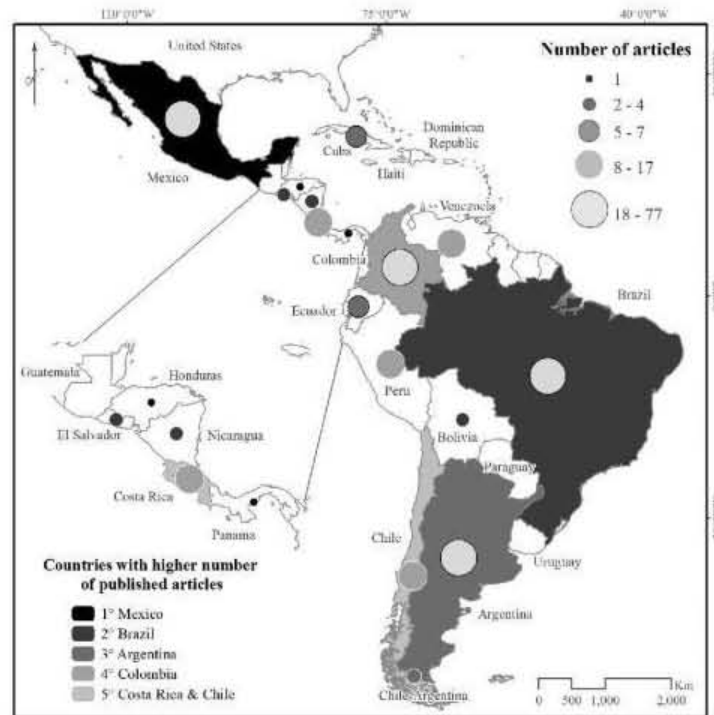


Figure 5. Distribution of articles published on landslides occurred by country in Latin America.

a private agency. Mexico, Brazil, Argentina, Colombia and Chile, were the countries with the highest number of financed articles, they concentrated the 81.5% of financed articles (Table 3).

Approaches followed in landslide hazards research

The main subjects covered in the publications were: susceptibility based on spatial modelling (99 articles-35%); characterization based on geological and geomorphological descriptions (89 articles-31.4%); inventory based on localization, typology, frequency, and volume of events (35 articles-12.4%); hazardousness based on historical records to calculate return periods and the development of models, monitoring, and proposals (24 articles-8.5%); triggering factors accounting for precipitation and earthquake behavior (22 articles-7.8%); and conditioning factors based on the analysis of rocks, geofoms, soils, and vegetation (14 papers-4.9%).

The analyzed articles focused on seven specific topics. 70.7% were concentrated in two of them: 1) modelling: of slope instability, susceptible zones, and event recurrence (106 articles-37.5%); and 2) geological and geomorphological analysis: based on morphometric, petrographic, stratigraphic, granulometric, and typological studies (94 articles-33.2%). The remaining 29.3% of the publications were focused on five

Tabla 3. Financed articles by country

Table 3. Financed articles by country.

Country	Agency		Total (articles)
	National	International	
Mexico	National Autonomous University of Mexico; National Council of Science and Technology; Secretariat of Finance and Public Credit; National Institute of Statistics and Geography; Autonomous University of San Luis; Michoacan University of San Nicolas de Hidalgo; Chiapas University of Sciences and Arts; University of Colima; Civil Protection; National Center for Disaster Prevention; Federal Electricity Commission	International Program on Landslides, US National Science Foundation, US Army Research Office; University of Fribourg	63
Brazil	National Council for Scientific and Technological Development; Coordination of the Training of Higher-Level Personnel; Sao Paulo-Rio Grande do Sul-Rio de Janeiro-Minas Gerais State Research Support Foundation, Federal District Research Support Foundation, PETROBRAS S.A; Ouro Preto Federal University; State University of Rio de Janeiro; Federal University of Paraná; Federal University of Pernambuco; Sao dos Campos-Duque de Caxias Civil Defense	-	41
Argentina	National Council for Scientific and Technical Research, Argentine Mining Geological Service, National Agency for Scientific and Technological Promotion; Federal Council of Science and Technology; University of Cuyo; National University of San Juan; University of San Luis	International Center for Geohazards, IADB (Inter-American Development Bank); Coordination of the Training of Higher-Level Personnel; University of Aberdeen; Humboldt Foundation; GeoChungsZentrum Potsdam;	33
Colombia	National University of Colombia; Colombian Geological Service; Pontifical University Javeriana; Colombian Association of Petroleum Geologists and Geophysicist; University of Antioquia; Tolima University; Andes University; Ecopetrol S.A; National Federation of Coffee Growers; National Center for Coffee Research; Industrial University of Santander; National Unit for Disaster Risk Management	Hans Wilsdorf Foundation, IABD, Japanese Government; US Ministry of Economy and Competitiveness; National Autonomous University of Mexico	19
Chile	University of Chile; National Commission for Scientific and Technological Research; Andes Foundation; National Geology and Mining Service.	Bristol University, Nature Environment Research Council; National University of Cuyo; IABD.	11
Peru	Peruvian Geological Survey, Peruvian Geophysical Institute; Geological, Mining and Metallurgical Institute.	French Space Agency; European Space Agency; French Development Research Institute	9
Venezuela	University of Zulia; Central University of Venezuela; Venezuelan Foundation for Seismological Research; Merida Institute for Civil Protection and Disaster Prevention	University of Oslo; University of Lleida; Polytechnic di Torino; Ecole Polytechnique Federal of Lausanne; International Centre for Theoretical Physics	7
Ecuador	Secretary of Higher Education, Science, Technology and Innovation	German Research Foundation	5
Costa Rica	University of Costa Rica; Geological Sciences Research Center	German Research Foundation	4
Chile- Argentina	University of Chile; National University of Cuyo; Millennium Initiative	-	4
El Salvador	Ministry of Education and Science; Ministry of Environment and Natural Resources	Spanish Ministry of Science and Education; Polytechnic University of Madrid	3

(Continued)

Figura 6. Types of landslides studied in Latin America

Table 3. (Continued).

Country	Agency		Total (articles)
	National	International	
Nicaragua	Polytechnic University of Nicaragua	Generalitat de Catalunya; Consolider Ingenio, University of Barcelona	3
Bolivia	-	Chilean National Fund for Scientific and Technological Development; Canadian Natural Sciences and Engineering Research Council	2
Panama	Ingenieros Geotécnicos S.A.; Panama Metro; Tocumen Experimental Center	-	1

topics: 1) Inventories: describing the location, evolution, and distribution of landslide events (35 articles-12.4%); 2) geological, geomorphological, and hydrometeorological analysis: based on precipitation databases (29 articles-10.2%); 3) model comparisons: contrasting the efficiency of different spatial and numerical models for representing landslides (7 articles-2.5%); 4) geological, geomorphological, and seismic analysis: using seismic databases (6 articles-2.1%); and 5) geological, geomorphological, and land cover analysis (6 articles-2.1%).

The studied types of processes were, in decreasing order: landslides (56.9%), it means that within most of the studies the type of processes was not typified or covering more than four types of processes; slides (13.1%); flows (10.6%); and avalanches (9.2%) (Figure 6). The category “general”, refers to studies that did not specify the type of materials or considered all of them, including 186 publications (65.7%). The material studied in 55 publications (19.4%) was referred to as debris; in 21 (7.4%) as rocks; and in 12 (4.2%) as debris-rocks. In 4 articles (1.4%) the material is referred to as earth; in three (1.1%) as debris-earth; and in two (0.7%) as rocks-earth.

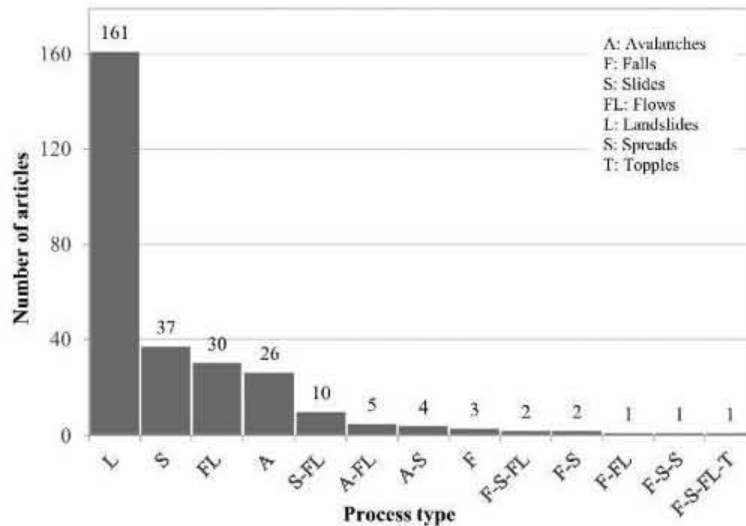


Figure 6. Types of landslides studied in Latin America.

The main triggering factor of landslides processes identified was rainfall (49.7%), predominantly caused by torrential rains due to hurricanes or tropical depressions. These rains occurred during the rainy season or during El Niño events. The other triggering factors were earthquakes (13.8%); volcanic activity (8.5%); snow melting (6%); the combination of rain and earthquakes (5.7%); and human activities (mining, urban growth, construction, grazing, agriculture, deforestation) (3.5%). In the 13.4% of the publications the trigger factor was not specified.

Methodologies used in the study of landslide hazards

Six methods were followed in the publications, the most frequent being characterization, used in 117 (41.3%) publications, followed by the statistical approach in 60 (21.2%) articles, the deterministic approach on 38 (13.4%) articles, the inventory approach in 35 (12.4%) articles, the heuristic approach in 30 (10.6%) articles, and in 3 (1.1%) articles a combination of the heuristic and the statistical approaches was applied.

Spatial analysis tools in geographic information system (GIS) applications were used in 239 articles (84.5%), among which ArcGIS, ILWIS, QGIS, SAGA GIS, IDRISI, and ENVI were noticeable. Topographic profiles were used in 48 studies to represent the physical characteristics of the analyzed sites. Thirty-two studies applied laboratory analyses including geochronological, mineralogical, geotechnical, granulometric, sedimentological, fluid mechanics, soil, dendrochronological, and water quality. In 28 studies, the events were located or monitored by means of the Global Positioning System (GPS). In 10 studies topographic data were gathered and monitored using laser imaging detection and ranging (LIDAR) technology. Three articles generated digital terrain models and orthophotos using unmanned aerial vehicles (UAV). The statistical analysis programs Excel, SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), Access, R, and Statistica were applied in 2.8% of the articles, and the main tool for accessing databases was Desinventar, used in four publications.

Fieldwork – reported in 234 publications – and photointerpretation – applied in 29 articles – were the most used techniques. Techniques for analyzing seismicity, precipitation, temperature, and irradiation were applied in 4.9% of the publications, the Newmark sliding block and Gumbel probability analyses being the predominant techniques. The normalized difference vegetation index (NDVI) and the soil brightness index (SBI) were the two most used indexes for identifying traces of landslides and vegetation, which were applied in 1.4% of the published studies. To generate spatial data of triggering factors and determine the distribution of events, the inverse distance weighted (IDW) and Kriging interpolation techniques were more frequently used. Dating and assessment of the dynamics of landslides were made in 4.6% of the publications by means of dendrochronology, interferometry, measurements of radioactive (radiogenic) carbon (^{14}C), argon ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$), uranium-lead (U-Pb), and chlorine (^{36}Cl), and optically stimulated luminescence (OSL). In 7.4% of the studies, the accuracy of inventories was verified mainly by density and frequency analysis and receiver operating characteristic curve (ROC) analysis.

The use of two or more inputs characterized the analyzed research reports. The inputs most used by researchers were topographic maps and their derived products like digital elevation models (DEM), slope maps, and aspect maps, which were used in 242 (85.5%)

articles. The different inputs used for the analyzed research and their percentages were as follows: thematic maps, 72.8%; satellite images (ALOS, ASTER, GeoEye, GOES, IKONOS, Landsat, QuickBird, and SPOT), 37.4%; precipitation databases, 26.9%; aerial photographs, 26.1%; seismic databases, 12.7%; soil samples, 9.5%; historical archives, 6%; rock samples, 6%; ortophotographies, 3.2%; and point clouds (set of vertices in a tridimensional coordinate system), 2.1%.

Characterization studies made a limited use of programs like Midrodem (Microcomputer mapping program), HidroSIG Java (Visualization and analysis of hydroclimatological data tool), TerraHidro (Distributed Hydrological System), and XSTABL (Integrated environment for performing slope stability analyses) to model, and Surfer to visualize the spatial distribution of point data (1.8% of the publications). In these studies, researchers also applied field and laboratory techniques (10.6%), the most frequently used being granulometric, mineralogical, morphometric, and soil analysis. Among studies that followed the statistical approach, researchers used software – prominently, MATLAB (Programming and numeric computing platform) – to model the dynamics of the studied processes (1.4%). In this approach, some researchers also applied multicriteria analysis (14.5%), the most used techniques being Analytic Hierarchy Process (AHP), neural networks, logistic regression, discriminating analysis, continual neighborhood analysis, and bivariate analysis.

The researchers that followed the deterministic approach modeled slope stability (8.1%) mostly using software like SHALSTAB (Shallow Landslide Stability), TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional), SINMAP (Stability Index Mapping), and SHIA_Landslide (Open and distributed hydrological simulation and landslides model). These groups of researchers also implemented techniques to define slope stability parameters (3.5%), noticeably the slope stability safety factor analysis, finite element analysis of shear resistance and roughness analysis. For studies made following the heuristic approach, researchers used map algebra (7.4%) by means of the Mora Vahrson and van Westen techniques or morphometric analysis. Finally, for the inventory approach, researchers used AutoCAD Map to digitize landslide events (0.7%).

Discussion

The trend in landslide studies

The increase in landslide hazard research in Latin America follows the world publication tendency. The number of published articles is considered as a quality evaluation mechanism for ranking universities at international level (Bornmann & Mutz, 2014). The behavior of the region describes a higher increase in the last nine years (2010–2019) and could be also influenced by salami slicing trend (Menon & Muraleedharan, 2016; Nature Mater, 2005).

Torrential rainfalls are the main trigger factor of landslide in the region. The increase in frequency and intensity of hydrometeorological phenomena – like rainfalls, hurricanes and El Niño and La Niña occurrence – could be considered a consequence of climate change (Gallina et al., 2016; Hurlimann et al., 2019; Slaymaker & Embleton, 2018; Terzi et al., 2019). Landslides trigger by rainfall occurred in Brazil (Ahrendt & Zuquette, 2003; Michel et al., 2015), Mexico (Alcántara-Ayala, 2004; Alcántara-Ayala et al., 2012; Antinao

& Farfán, 2013; Jaimes et al., 2015), Colombia (Aristizábal et al., 2015; Moreno et al., 2006), Chile (López, 2015; Sepúlveda et al., 2014) and Venezuela (Marcano & Cartaya, 2013). In these studies, the effect of rainfall was analyzed considering the maximum accumulated rainfall per day (24 hours), and the accumulated rainfall of 2 to 15 days prior to the landslide events, where the total quantity of rainfalls was equivalent to more than 15% of the average annual precipitation. This matches with the relation between years with high global landslide activity, and the regional patterns of rainfall driven by climatic changes, identified in studies carried out at global and regional scale (Froude & Petley, 2018; Gariano & Guzzetti, 2016; M. J. Crozier, 2010).

The study of landslide events in Latin America is crucial because the west side of the region is in a tectonically active zone. In the region, earthquakes are the second landslide trigger factor. The moderate (5–5.9) and high (>6) magnitude earthquakes might frequently trigger landslides, although these processes can also be generated by low (<4.9) magnitude earthquakes linked to other processes like soil pore pressure (Jaimes et al., 2013; Niño et al., 2014). This has been studied in Mexico (Arreygüe et al., 2002; Garduño et al., 2019), Costa Rica (Barrantes et al., 2013; Quesada & Barrantes, 2016), Argentina (Carignano et al., 2014; Esper et al., 2014; González et al., 2006), El Salvador (García & Malpica, 2010), Peru (Lacroix et al., 2015; Zavala et al., 2009), Chile (Mardones & Rojas, 2012; Sepúlveda et al., 2010). Also, the high rate of land use change in the region (forest to livestock, crop, mining, and urban surfaces) translates to higher susceptibility to landslides (Carvalho et al., 2019; M. J. Crozier, 2010; Marques et al., 2018), increasing up to ten times the normal rate of landslide occurrence (Slaymaker & Embleton, 2018). Some cases were documented in Mexico (Alanís et al., 2017; Pola et al., 2006; Villaseñor et al., 2018); Cuba (Almaguer et al., 2014; Viltres et al., 2019); Venezuela (Montiel et al., 2007), Ecuador (Lozano & Bussmann, 2005), and Brazil (Dias & Herrmann, 2002).

The growing trend of publications about landslides in Latin America suggests that there is a growing interest in these gravitational events, which is due to their disastrous consequences when occurring near human settlements and their productive activities (Froude & Petley, 2018; Huddleston et al., 2003; Sepúlveda & Petley, 2015; UNDP, United Nations Development Programme, 2020). For example, a large urban landslide in La Paz, Bolivia (Roberts et al., 2019), a landslide group that had occurred at Florianópolis city, Brazil (Dias & Herrmann, 2002), some debris flows that affected Andean villages of Atacama Desert, Chile (Sepúlveda et al., 2014), the event happened in the municipality of Mocoa, Colombia (Prada et al., 2019), in Mexico: the events of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Michoacán (Alcántara-Ayala et al., 2012), Juan Grijalva landslide in Chiapas (Dávila & Jiménez, 2011), landslides in the Sierra Norte de Puebla (Lugo et al., 2005), and La Pintada landslide, Guerrero (Ramírez & Gaidzik, 2017).

Spatial distribution of the studies of landslides

Publications concentrated in Mexico, Brazil, Argentina, Colombia, Costa Rica and Chile (82%), suggest that these countries have consolidated research groups in the subject. These groups have established links between universities, research centers, governmental agencies and international risk management units (CEMADEN, Centro Nacional de Monitoreo e Alertas de Desastres Naturais, 2017; CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2020; CENARRID, Centro Nacional para la Reducción del

Riesgo de Desastres, 2018; CEPREDENAC, Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central y República Dominicana, 2019; CIDIGEN, Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales, 2019; UNGRD, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2015). This linkage promotes the generation of information and knowledge on which to support each country's risk management public policies and territorial planning strategies. Strengthening research on this topic could help prevent loss of human life and the spending of millions of dollars on mitigation measures.

According to ECLAC, Economic Commission for Latin America and the Caribbean (2014) and UNDP, United Nations Development Programme (2020), the research clustering in some of the Latin American countries and the increase in the number of publications on landslides in the region could also be a response to the availability of funds for research projects provided by international agencies, with interest in mitigating losses in millions caused by disasters, and by the growth of a disaster prevention culture in the region. For instance, the Inter-American Development Bank fosters projects focused on natural disasters and the environment, e.g. landslides studied in Valle de Aburrá, Colombia (Aristizábal & Yokota, 2008), and the analysis of Dehesa paleo-landslide, Argentina (Tapia et al., 2018). The United Nations International Strategy for Disaster Reduction (ISDR) sponsors the development in the region of joint academic projects through the Economic Commission for Latin America and the Caribbean. Likewise, The World Bank finances projects focused on management in natural disaster events and recovery works. The European Union supports projects aimed at climate change mitigation and disaster management (ECLAC, Economic Commission for Latin America and the Caribbean, 2020; EU, European Union, 2020; Gallina et al., 2016; IADB, Inter-American Development Bank, 2020; Scott et al., 2001; TWB, The World Bank, 2020). These agencies included those topics in their programs and policies of risk-management actions, projects, and statutes, which place hazard assessment as the main action for disaster risk management (ECLAC, Economic Commission for Latin America and the Caribbean, 2005; EU, European Union, 2020).

There is an increase in the scientific production at the regional level in the past few years, being mainly impulse by public universities in Brazil, Mexico, Argentina, Chile and Venezuela (Miguel, 2011; Santa & Herrero, 2010), behavior that coincides with the results of this research.

Landslide research approaches

Most of the landslide research carried out in the Latin American region focused on susceptibility evaluation and characterization, based on spatial models and geological and geomorphological analyses. In these studies, the authors characterized the behavior and distribution of landslides from a geographical standpoint. In their maps they used terrain elements representing slope stability at different scales. Nevertheless, the availability of maps in the region varies depending on the scale of analysis with abundant regional maps that are available and accessible in most countries, but not local maps, because not all the countries have governmental agencies in charge of the generation of cartography (Bocco et al., 2010; Guzzetti et al., 2020, 2012; LANIC (Latin American Network Information Center), 2015; Sánchez et al., 2009).

The inventory, hazardousness, triggering and conditioning factor approaches were used less frequently because they require multitemporal databases and monitoring to understand the variations in analyzed processes throughout time. Such inputs differ in quality and period covered depending on the conditions of each country. Another cause for this is that landslide events occur in areas of difficult access, requiring a large investment for their study (travels, specialized tools and work), e.g. landslide studies in the Atacama Desert (Sepúlveda et al., 2014), Andean region (Deckart et al., 2014; Eger et al., 2018), Patagonian region (Costa & González, 2007; Moragues et al., 2019; Oppikofer et al., 2012) and Volcanic regions (Borselli et al., 2011; Capra & Macías, 2000; Godoy et al., 2012; Murcia et al., 2008; Spalletti et al., 2013). However, researchers may rely on free access tools – like GIS and remote sensing products – to generate robust information and model the frequency and magnitude of future events (Aristizábal et al., 2019; Borselli et al., 2011; Franco et al., 2019; Guzzetti et al., 2012; Huabin et al., 2005; Salinas et al., 2019; Sepúlveda & Petley, 2015; Slaymaker & Embleton, 2018).

Most of the Latin American countries have mountainous zones that are the source of debris material and where the greatest number of landslides are generated (Coelho et al., 2006; Guzzetti et al., 2012; Reichenbach et al., 2018). Because in most cases researchers worked with more than four types of processes or did not clearly typify the studied events, the category *landslides* was predominant. This observation depicted the complexity of mass wasting processes in the region, and the necessity to consider world classification of landslides. This will increase the possibility of comparing and assessing the relevance of results at the international level (Reichenbach et al., 2018). In the publications in which researchers precisely defined the type or types of processes studied, the most common were slides, flows, and debris avalanches (a pattern that is repeated at the global level) (Deckart et al., 2014; Esper et al., 2015; Pazzi et al., 2019; Petley, 2012; Sepúlveda et al., 2006).

Methods, tools, and techniques applied for the study of landslides

In the data base, the most used method was characterization and the least applied was inventory, which suggests there is a need to generate information to understand the dynamics of landslides in the region. Due to their continual occurrence, landslide events generate new study sites, most of them in inaccessible places and, in some cases, not representing risks for the population, because they may lose their appeal as study sites, e.g. new landslides in Sierra Costa Michoacán Mexico (Solís et al., 2019), the complex landslide of Alinco-Cerro Papas-Las Olletas in Neuquén Argentina (González et al., 2003), landslides in the north center mountainous region of Venezuela (Pineda et al., 2016), landslides in Combeima River basin, Colombia (Leal et al., 2018), and landslides in Serra do Mar, Sao Paulo, Brazil (Vieira et al., 2010). These circumstances create a research opportunity area based on the inventory mapping approach through the use of remote sensing tools that generate quality data allowing the improvement of statistical, heuristic, and deterministic modelling, and the associated risk management (Guzzetti et al., 2012; Huabin et al., 2005; Pike, 1988; Protti, 2013; Reichenbach et al., 2018; Van Westen et al., 2008), e.g. statical landslide susceptibility mapping in El Salvador (García &

Malpica, 2010), the comparative analysis of methodologies (Mora-Vahrson and Morfometric) in Río Macho basin, Costa Rica (Quesada & Feoli, 2018), and the comparison of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility in the Cunha river basin, Brazil (Michel et al., 2014).

In the six research methods applied, the use of GIS as an analytical tool showed a recurrent pattern, which could have been due to their potential for storage, management, modelling, and cartographic representation of information. The same has been found in studies of natural resource management, environmental pollution, regional planning, urban development, susceptibility area identification, hazard analysis, triggering factors, and landslide risk management (Chandio et al., 2012). The tools less used by researchers were UAVs (Garduño et al., 2019; Villalpando et al., 2019), GPS (Lacroix et al., 2015; Salinas et al., 2017); LIDAR (Gaidzik et al., 2017; Yépez et al., 2017), TLS (Terrestrial Laser Scanning) (Oppikofer et al., 2012), and Insar (Interferometric synthetic aperture radar) (Macedo et al., 2017; Strozzi et al., 2018), because of their high price for the development of natural hazards studies. However, these technologies are becoming more accessible, enabling precision mapping, and allowing the analysis and interpretation of high spatial resolution products useful to assess landslides such as DEMs, slope maps, and shaded relief maps (D.H. García et al., 2019a; Guinau et al., 2007; Joyce et al., 2009; Listo et al., 2018; Shan & Toth, 2009).

The most used techniques were field work and photointerpretation; this suggests that landslide hazard studies require field data for terrain analysis at different scales. On the one hand, data generated *in situ* allows the understanding of the physical characteristics and typology of the events, and on the other, photointerpretation makes it easier to recognize and interpret landslides *ex situ* (Brunsden, 1993; Guzzetti et al., 2012; Hernández et al., 2007; Legorreta et al., 2017; Pike, 1988; Rib & Liang, 1978). We observed a limited use of techniques like interferometry, cosmogenic dating, and OSL, which could be due to the high costs of the application of these techniques. Techniques like dendrochronology are not expensive in comparison with the above mentioned; in this case, the problem is related with the difficulty to find the adequate trees to be analyzed. In arid and tropical areas, it is more difficult by the tree distribution and morphology. This suggests the possibility of generating information about the dynamics, magnitude, and frequency of landslide events through precise measurements and dating, some of them can be obtained from synthetic aperture radar (SAR) images acquired before and after their occurrence, the information preserved in trees, and the analysis of rocks and soils (Aristizábal & Yokota, 2008; Franco et al., 2018; Joyce et al., 2009; Lozano & Bussmann, 2005; Macedo et al., 2017; Pazzi et al., 2019; Stoffel et al., 2011).

The most used inputs were the topographic and thematic maps because the study of landslides requires multitemporal and georeferenced data sources. These are basic inputs – in most cases produced under international quality standards – providing detailed information at a specified scale, their availability noticeably improving the analysis of landslides in the region (Guzzetti et al., 2020; Huabin et al., 2005; Joyce et al., 2009). We also identified little used inputs with potential for landslides research: 1) rocks, soils, and tree samples (A.E.F. García et al., 2019b; Franco et al., 2018; Tapia & Trombotto, 2019), 2) orthophotos (Cerri et al., 2017; Guinau et al., 2007; Velásquez et al., 2016), 3) point clouds obtained through processing of images captured by

UAVs (Barrantes et al., 2013; Yépez et al., 2017), and 4) historical archives consultation (Leal et al., 2018; Moreiras et al., 2012; Perucca & Esper, 2009). This makes it evident that there is a broad spectrum of available inputs for gathering information about landslides and their conditioning and triggering factors.

Conclusions

Our review of the state of the art of landslide hazard research in Latin America corroborates the growing interest of researchers in the subject. Most of the publications found during the last six years were concentrated in 15 of the 20 Latin American countries, most of which were presented at the regional scale. Therefore, it is necessary that local and municipal scale research not only be published as technical reports or in gray literature, but also be published as scientific articles. This would strengthen the academic production of the region through publications in international journals. It will increase the availability of information and knowledge for the international community.

The reduced number of research centered in hazardousness, inventory, and triggering and conditioning factors is due to the complexity of obtaining detailed multitemporal information. This also responds to the constant effort to develop characterizations, and do not incur into further stages of hazard assessment. Because of that, research groups need to be strengthened through continued training, mechanisms for easy access to financing, and support for long-term research projects. These efforts could generate widespread temporal databases, monitoring, and more precise models of geomorphic processes – such as debris flows, slides, avalanches, and falls, among others. We also suggest increasing the number of studies that use the heuristic and inventory approaches, which could be supported by the use of UAVs, GPS, LIDAR, TLS, InSAR, and techniques like interferometry, dendrochronology, cosmogenic dating, and optically stimulated luminescence, therefore allowing generating robust data of the frequency and magnitude of events, thus strengthening hazardousness studies.

We made a broad and exhaustive review of the state of the art in the Scopus, WoS, SciELO, REDIB, and Redalyc databases, performed through a rigorous selection method. Nevertheless, it is likely that some publications have been excluded, due to the results being based on the keywords and the updating of the databases used for the search into the analyzed period. This may represent a limitation of this review and it is important to be considered for future applications. However, it represents the first database of landslide hazards in Latin America that highlights the recent advances in the region and the interest areas in the near future. In addition, this work constitutes a substantial contribution to the study of hazards from landslides in the intertropical zones.

Acknowledgments

The authors wish to thank the project UNAM PAPIIT IN108719 “*Dendrogeomorfología y evaluación de peligros en ambientes de montañas*” and give thanks to Gerardo Bocco for reviewing a previous version of this manuscript. We deeply appreciate the valuable comments

and suggestions given by two anonymous referees, and Natallia Arkhanhelskaya for her support in revising the English version of the manuscript.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Funding

The author(s) disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and/or publication of this article: Alejandro César Valdés Carrera received a grant from CONACYT to complete a PhD in Geography at UNAM, of which this study is a part. Manuel E. Mendoza got financial support through the project UNAM PAPIIT IN108719 “Dendrogeomorfología y evaluación de peligros en ambientes de montañas.” The remaining authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

ORCID

Alejandro César Valdés Carrera  <http://orcid.org/0000-0002-9480-9331>
 Manuel E. Mendoza  <http://orcid.org/0000-0003-1310-9702>
 Teodoro Carlón Allende  <http://orcid.org/0000-0002-0080-6114>
 José Luis Macías  <http://orcid.org/0000-0002-2494-9849>

References

- Ahrendt, A., & Zuquette, L. V. (2003). Triggering factors of landslides in Campos do Jordao city, Brazil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(3), 231–244. <https://doi.org/10.1007/s10064-003-0191-8>
- Alanís, A. R. M., Legorreta, P. G., Mas, J. F., & Granados, R. G. R. (2017). Susceptibility to gravitational processes due to land cover change in the río chiquito-barranca del muerto subbasin (Pico de Orizaba volcano, México). *Journal of Mountain Science*, 14(12), 2511–2526. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4268-9>
- Alcántara-Ayala, I. (2000). *Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno?*. Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*. UNAM. 41:7–25. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S01884611200000100002&lng=es&tlng=es
- Alcántara-Ayala, I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology*, 61(1–2), 19–40. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.11.004>
- Alcántara-Ayala, I., López, G. J., & Garnica, R. J. (2012). On the landslide event in 2010 in the Monarch butterfly biosphere reserve, Angangueo, Michoacán, Mexico. *Landslides*, 9, 263–273. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0291-7>
- Alimohammadlou, Y., Najafi, A., & Yalcin, A. (2013). Landslide process and impacts: A proposed classification method. *Catena*, 104, 219–232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.013>
- Almaguer, C. Y., Rodríguez, D. M. A., Del Rosario, M. M., & Aguilar, S. A. M. (2014). Evaluación de la susceptibilidad por deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 30 (2), 19–41. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/779>
- Antinao, J. L., & Farfán, L. M. (2013). Occurrence of landslides during the approach of tropical cyclone Juliette (2001) to Baja California Sur, Mexico. *Atmósfera*, 26(2), 183–208. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71071-3](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71071-3)

- Arce, M. T. J., Nehren, U., Sudmeier, R. K., Miranda, P. J., & Anhuf, D. (2019). Nature-based solutions (NbS) for reducing the risk of shallow landslides: Where do we stand?. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 41, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101293>
- Aristizábal, E., García, E., & Martínez, C. (2015). Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountains terrains. *Natural Hazards*, 78, 621–634. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1736-4>
- Aristizábal, E., López, S., Sánchez, O., Vásquez, M., Rincón, F., Ruiz, V. D., Restrepo, S., & Valencia, J. S. (2019). Evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para una región de los Andes colombianos estimando la probabilidad espacial, temporal y magnitud. *Boletín de Geología*, 41(3), 85–105. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019004>
- Aristizábal, E., & Yokota, S. (2008). Evolución geomorfológica del Valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 24, 5–18. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/9268>
- Arreygüe, R. E., Garduño, M. V. H., Canuti, P., Casaglie, N., Lotti, A., & Chiesa, S. (2002). Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 19 (2), 91–106. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57219202>
- Barrantes, C. G., Jiménez, C. C., & Ocón, G. M. J. (2013). Deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona de 2009, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2 (51), 89–100. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/5990>
- Bocco, G., Mendoza, M., Priego, A., & Burgos, A. (2010). La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial. In *Una revisión bibliográfica*. SEMARNAT, INE, CIGA.
- Bokwa, A. (2013). Encyclopedia of Natural Hazards. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4>
- Borgatti, L., & Soldati, M. (2010). *Landslides and climatic change. Geomorphological hazards and disaster prevention* (pp. 87–96). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807527>
- Bornmann, L., & Mutz, R. (2014). Growth rates of modern science: A bibliometric analysis based on the number of publications and cited references. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 66(11), 1–28. <https://doi.org/10.1002/asi.23329>
- Borselli, L., Capra, L., Sarocchi, D., & De La Cruz, R. S. (2011). Flank collapse scenarios at Volcán de Colima, Mexico: A relative instability analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 208(1–2), 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.08.004>
- Brunsdén, D. (1993). Mass movements; the research frontier and beyond: A geomorphological approach. *Geomorphology*, 7(1–3), 85–128. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(93\)90013-R](https://doi.org/10.1016/0169-555X(93)90013-R)
- Capra, L., & Macías, J. L. (2000). Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca Volcano, central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102(1–2), 149–167. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00186-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00186-4)
- Carignano, C. A., Cioccale, M. A., & Martino, R. D. (2014). El megadeslizamiento del Cerro Uritorco, ladera occidental de la Sierra Chica de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71 (1), 21–32. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/32067>
- Carvalho, C. R., Nunes, F. C., & Maciel, S. C. (2019). Condicionantes geomorfológicos e da cobertura da terra na ocorrência de movimentos de massa na região serrana do rio de janeiro. *Caderno de Geografia*, 29(56), 27–44. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29n56p27>
- CEMADEN, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. (2017). *Estrutura física e organizacional do CEMADEN*. 2020, April 02. <https://www.cemaden.gov.br/estrutura-fisica-e-organizacional-do-cemaden/>
- CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2020). ¿Qué hacemos?, Antecedentes, ENAPROC. 2020, April 02. <https://www.gob.mx/cenapred>
- CENARRID, Centro Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres. (2018). *Creación del CENARRID*. 2020, April 02. <https://www.argentina.gob.ar/noticias/creacion-del-centro-nacional-para-lareduccion-del-riesgo-de-desastres>

- CEPRENAC, Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central y República Dominicana. (2019). *Quienes somos*. 2020, April 03. <http://www.ceprede-nac.org/>
- Cerri, R. I., Reis, F. A. G. V., Gramani, M. F., Giordano, L. C., & Zaine, J. E. (2017). Landslides zonation hazard: Relation between geological structures and landslides occurrence in hilly tropical regions of Brazil. *Anais Da Academia Brasileira De Ciencias*, 89(4), 2609–2623. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170224>
- Chandio, I. A., Matori, A. N. B., WanYusof, K. B., Talpur, M. A. H., Balogun, A. L., & Lawal, D. U. (2012). GIS-based analytic hierarchy process as a multicriteria decision analysis instrument: A review. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 3059–3066. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-012-0568-8>
- CIDIGEN, Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales. (2019). *El Centro*. 2020, April 03. <https://www.cigiden.cl/el-centro-2/>
- Coelho, N. A. L., Avelar, A. S., Fernandes, M. C., & Lacerda, W. A. (2006). Landslide susceptibility in a mountainous geosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: the role of morphometric subdivision of the terrain. *Geomorphology*, 87(3), 120–131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.03.041>
- Costa, C. H., & González, D. E. F. (2007). Age constraints and paleosismic implication of rock avalanches in the northern Patagonian Andes, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 24(1), 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.03.001>
- CRED, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters & UNDRR, United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2020). *Human cost of disasters*. An overview of the last 20 years 2000–2019. United Nations. <https://www.emdat.be/publications>
- Crozier, M. (2013). Mass-movement hazards and risks. *Treatise on Geomorphology*, 7, 249–258. Oxford, UK. Academic Press. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-374739-6.00175-5>
- Crozier, M. J. (2010). Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. *Geomorphology*, 124(3–4), 260–267. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.009>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides types and processes. Landslides Investigation and Mitigation. 247, 36–75. Washington, DC. USA. Transportation Research Board. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>
- Dávila, S. M., & Jiménez, O. (2011). A geologic study of the Juan Grijalva landslide, the most important mass movement during the last century in Mexico. *Natural Hazards*, 58(1), 183–197. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9658-7>
- Deckart, K., Pinochet, K., Sepúlveda, S. A., Pinto, L., & Moreiras, S. M. (2014). New insights on the origin of the Mesón Alto deposit, Yeso Valley, central Chile: A composite deposit of glacial and landslide processes?. *Andean Geology*, 41(1), 248–258. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV41n1-a10>
- Dias, F. P., & Herrmann, M. L. P. (2002). Susceptibilidade a deslizamentos: Estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis-SC. *Caminhos De Geografia*, 3 (6), 57–73. <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15295>
- ECLAC, Economic Commission for Latin America and the Caribbean. (2005). *El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: Documento metodológico básico para estudios nacionales de caso*. United Nations. Mexico. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/25766?locale-attribute=en>
- ECLAC, Economic Commission for Latin America and the Caribbean. (2014). *Handbook for disaster assessment*. United Nations. Chile. <https://www.cepal.org/en/publications/36823-handbook-disaster-assessment>
- ECLAC, Economic Commission for Latin America and the Caribbean. (2020). Work areas. 2020, April 01. <https://www.cepal.org/en/work-areas>
- EcuRed contributors. (2019). *América Latina*. 2020, January 10. https://www.ecured.cu/index.php?title=Am%C3%A9rica_Latina&oldid=3326674
- Eger, P. M., Cagliari, J., Aquino, C. D., & Coelho, O. G. W. (2018). Rheologic survey of mass transport events from the geologic record of an andean precordilleran slope. *Geomorphology*, 315, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.05.004>

- Esper, A. M. Y., & Perucca, L. P. (2015). A large and active debris-rockslide in the Central Andes of Argentina (30.26°S): morphometry and triggering mechanisms. *Quaternary International*, 374, 182–188. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2014.12.019>
- Esper, A. M. Y., Perucca, L. P., Rothlis, M., Tapia, C., & Vargas, N. (2014). Morphometric characterization of a large scale rockslide, and probable seismogenic origin of landslides on the western flank of Central Cordillera, Argentina. *Quaternary International*, 352, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.04.058>
- EU, European Union. (2020). Latin America. Where we work. International Cooperation and Development. European Commission. 2020, April 03. https://ec.europa.eu/international-partnerships/where-we-work/latin-america_en
- Franco, R. O., Stoffel, M., & Ballesteros, C. J. A. (2019). Reconstruction of debris-flow activity in a temperate mountain forest catchment of central Mexico. *Journal of Mountain Science*, 16(9), 2096–2109. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5496-6>
- Franco, R. O., Vázquez, S. L., Stoffel, M. Y., & Villanueva, D. J. (2018). Potencial dendrogeomorfológico de coníferas en volcanes del centro de México. *Bosque (Valdivia)*, 39(2), 191–204. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002018000200191>
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- Gaidzik, K., Ramírez, H. M. T., Bunn, M., Leshchinsky, B. A., Olsen, M., & Regmi, N. R. (2017). Landslide manual and automated inventories, and susceptibility mapping using LIDAR in the forested mountains of Guerrero, Mexico. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1054–1079. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1292560>
- Gallina, V., Torresan, S., Critto, A., Sperotto, A., Glade, T., & Marcomini, A. (2016). A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 168, 123–132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011>
- García, A. E. F., Aristizábal, E., Marín, R. J., & Guzmán, M. J. C. (2019b). Implementation of the TRIGRS model with reliability analysis for hazard assessment of shallow rainfall-triggered landslides. *Tecnológicas*, 22(44), 111–129. <https://doi.org/10.22430/22565337.1037>
- García, D. H., Machuca, S., & Medina, E. (2019a). Dynamic and geomorphic characterizations of the mocha debris flow (March 31, 2017, Putumayo Department, southern Colombia). *Landslides*, 16(3), 597–609. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-01121-3>
- García, R. J. M., & Malpica, J. A. (2010). Assessment of earthquake-triggered landslide susceptibility in el Salvador based on an artificial neuronal network model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(6), 1307–1315. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1307-2010>
- Garduño, M. V. H., Figueroa, S. A., Magaña, G. N., Ruiz, F. A., Gómez, C. J., Jiménez, H. A., & Hernández, M. V. M. (2019). The Mitla Landslide, an event that changed the fate of a mixteco/zapoteco civilization in Mesoamerica. *International Journal of Geophysics*, 2019(5438381), 1–14. Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2019/5438381>
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslide in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227–252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps a review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138–1151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
- Godoy, B., Clavero, J., Rojas, C., & Godoy, E. (2012). Facies volcánicas del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya, Andes Centrales. *Andean Geology*, 39(3), 394–406. <https://doi.org/10.5027/andgeoV39n3-a03>
- González, D. E. F., Costa, C. H., & Giaccardi, A. D. (2003). El complejo deslizamiento de Ailincó-Cerro Papas Las Olletas (Departamento Minas, norte del Neuquén, Argentina). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58(2), 194–200. <http://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/1506>

- González, D. E. F., Folguera, A., Costa, C. H., Wright, E., & Ellisondo, M. (2006). Los grandes deslizamientos de la región septentrional neuquina entre los 36°-38°S: Una propuesta de inducción sísmica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61 (2), 197–217. <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/1151>.
- Guinau, M., Vilajosana, I., & Vilaplana, J. M. (2007). GIS-based debris flow source and runout susceptibility assessment from DEM data—a case study in NW Nicaragua. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(6), 703–716. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-703-2007>
- Guzzetti, F., Gariano, S. L., Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Marchesini, I., Rossi, M., & Melillo, M. (2020). Geographical landslide early warning systems. *Earth-Science Reviews*, 200, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102973>
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1–2), 42–66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Hernández, M. V. M., Garduño, M. 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. <http://dx.doi.org/10.18268/bsgm2007v59n2a1>
- Huabín, W., Gangjun, L., Weiya, X., & Gonghui, W. (2005). GIS-based landslide hazard assessment: An overview. *Progress in Physical Geography*, 29(4), 548–567. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp462ra>
- Huddleston, B. A., Ataman, B., De Sales, P., Zanetti, M., Bloise, M., Bel, J., Franceschini, G., & d'Ostini, L. F. (2003). Towards a GIS-based analysis of Mountain environments and populations. <http://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/285416/>
- Hungr, O., Leroueil, S. Y., & Picarelli, L. (2014). The varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hurlimann, M., Coviello, V., Bel, C., Guo, X., Berti, M., Graf, C., Hubl, J., Miyata, S., Smith, J. B., & Yin, H. Y. (2019). Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. *Earth-Science Reviews*, 199, 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102981>
- IADB, Inter-American Development Bank. (2020). Projects. 2020, April 01. <https://www.iadb.org/en/projects>
- Jaimés, M. A., Niño, M., & Huerta, B. (2015). Hurricane event-based method to create regional hazard maps for heavy rainfall-induced translational landslides. *Natural Hazards*, 76(2), 1143–1161. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1539-z>
- Jaimés, M. A., Niño, M., & Reinoso, E. (2013). Una aproximación para la obtención de mapas de desplazamiento traslacional de laderas a nivel regional inducido por sismos. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 89, 1–24. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2013000200001.
- Joyce, K. E., Bellis, S. E., Samsonov, S. V., McNeill, S. J., & Glassey, P. J. (2009). A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Progress in Physical Geography*, 33(2), 183–207. <https://doi.org/10.1177/0309133309339563>
- Körner, C., & Ohsawa, M. (2005). Mountain systems. Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends. (pp. 681–716). *Island Press*. <https://islandpress.org/books/ecosystems-and-human-well-being-current-state-and-trends>
- Lacroix, P., Berthier, E., & Maquerhua, E. T. (2015). Earthquake-driven acceleration of slow-moving landslides in the Colca valley, Peru, detected from pléiades images. *Remote Sensing of Environment*, 165, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.010>
- LANIC (Latin American Network Information Center). (2015). Environment and geography. <http://lanic.utexas.edu/la/region/geography/indexesp.html>
- Leal, V. J., Pérez, G. U., & Ortiz, L. N. E. (2018). Distribución espacial y temporal de deslizamientos (1999–2015) en la cuenca del río Combeima, Colombia. *Revista Geográfica Venezolana*, 59 (2), 346–365. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347760473008>.

- Legorreta, P. G., Bursik, M., Zamorano, O. J. J., Lugo, H. J., Martínez, H. B., & Bajo, S. J. V. (2017). Estimación del volumen de los depósitos asociados a deslizamientos a través de geoformas, en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Investigaciones Geográficas*, 92, 1–13. <http://dx.doi.org/10.14350/rig.51113>
- Listo, R. F. L., Gomes, V. M. C., & Vieira, C. B. (2018). Avaliação da variação do fator de segurança com o modelo TRIGRS. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, 19(1), 207–220. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i1.1256>
- López, F. P. A. (2015). Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa, en laderas urbanizadas de costa de Chile centro-sur. *Cuadernos De Geografía-Revista Colombiana De Geografía*, 24(2), 93–112. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50212>
- Lozano, P., & Bussmann, R. (2005). Importancia de los deslizamientos en el Parque Nacional Podocarpus, Loja, Ecuador. *Revista Peruana de Biología*, 12 (2), 195–202. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332005000200005&lng=es&tlng=es.
- Lugo, H. J., Zamorano, O. 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: Causa y efectos. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 22 (2), 212–228. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742005000200212&lng=es&tlng=es.
- Macedo, C. K. A., Ramos, F. L. G., Gaboardi, C., Moreira, J. R., Vissirini, F., & Silva, C. M. (2017). A compact groundbased interferometric radar for landslide monitoring: the xerém experiment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(3), 975–986. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2640316>
- Marcano, M. A., & Cartaya, R. S. (2013). Zonificación de la amenaza por procesos de remoción en masa originados por las precipitaciones entre Camurí Chico y Punta Tigrillo, estado Vargas, Venezuela. *Revista De Investigación*, 37 (80), 189–214. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376140395008>.
- Mardones, F. M., & Rojas, H. J. (2012). Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista De Geografía Norte Grande*, 53(53), 57–74. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022012000300004>
- Marques, O. M. C., Netto, C. A. L., & Sato, M. A. (2018). Influence of secondary forest and grass on deflagration of shallow landslides in Nova Friburgo, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, 19(4), 793–806. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1479>
- Marston, R. A., Butler, W. D., & Patch, N. L. (2017). International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg1117>
- Menon, V., & Muraleedharan, A. (2016). Salami slicing of data sets: What the young researcher needs to know. *Indian Journal of Psychological Medicine*, 38(6), 577–578. <https://doi.org/10.4103/0253-7176.194906>
- Mergili, M., Marchant, S. C. I., & Moreiras, S. M. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Cuadernos De Geografía-Revista Colombiana De Geografía*, 24(2), 113–131. <http://dx.doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50211>
- Michel, G. P., Goerl, R. F., & Kobiyama, M. (2015). Critical rainfall to trigger landslides in Cunha River basin, southern Brazil. *Natural Hazards*, 75(3), 2369–2384. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1435-6>
- Michel, G. P., Kobiyama, M., & Goerl, R. F. (2014). Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, 14(7), 1266–1277. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0886-4>
- Middelmann, M. H., [Ed.]. (2007). Natural hazard in Australia. Identifying risk analysis requirements. Canberra, Australia. Australian Government. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72103403>
- Miguel, S. E. (2011). Journals and scientific production in Latin America and the Caribbean: Its visibility in SciELO, RedALyC and SCOPUS. *Revista Interamericana De Bibliotecología*, 34 (2), 187–199. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/89672>.

- Montiel, A. K., Gouveia, M. E., & Montes, G. E. (2007). Influencia de la intervención antrópica en la ocurrencia de procesos de ladera. Microcuenca de la Quebrada Ramos, flanco norandino venezolano. *Terra*, *XXIII* (34), 35–69. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72103403>.
- Moragues, S., Lenzano, M. G., Moreiras, S., & Lenzano, L. (2019). Geomorfología periglacial asociada a la inestabilidad de laderas en el brazo norte del lago argentino, Patagonia, Argentina. *Cuadernos De Investigación Geográfica*, *45*(1), 367–392. <https://doi.org/10.18172/cig.3786>
- Moreiras, S. M., Lisboa, M. S., & Mastrantonio, L. (2012). The role of snow melting upon landslides in the central Argentinean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, *37*(10), 1106–1119. <https://doi.org/10.1002/esp.3239>
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals, R. L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: Análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*. 5:59-69. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000100005
- Murcia, H. F., Hurtado, B. O., Cortés, G. P., Macías, J. L., & Cepeda, H. (2008). The ~2500 yr B.P. Chicoral non-cohesive debris flow from Cerro Machín Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *171*(3–4), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.11.016>
- Nature Mater. (2005). The Cost of Salami Slicing. *Nature*, *1*(4), 1. <https://doi.org/10.1038/nmat1305>
- Niño, M., Jaimes, M. A., & Reinoso, E. (2014). Seismic-event-based methodology to obtain earthquake-induced translational landslide regional hazard maps. *Natural Hazards*, *73*(3), 1697–1713. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1163-y>
- Oppikofer, T., Hermanns, R. L., Redfield, T. F., Sepúlveda, S. A., Duhart, P., & Bascuñan, I. (2012). Morphologic description of the Punta Cola rock avalanche and associated minor rockslides caused by the 21 April 2007 aysén earthquake (Patagonia, Southern Chile). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, *69* (3), 339–353. <http://repositorio.conicyt.cl/handle/10533/242150>.
- Pazzi, V., Morelli, S., & Fanti, R. (2019). A review of the advantages and limitations of geophysical investigations in landslide studies. *International Journal of Geophysics*, *2019*(2983087) 1–27. <https://doi.org/10.1155/2019/2983087>
- Perucca, L., & Esper, Y. (2009). El deslizamiento de rocas y detritos sobre el río Santa Cruz y el aluvión resultante por el colapso del dique natural, andes centrales de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, *65* (3), 571–585. <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/892>.
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, *40*(10), 927–930. <http://dx.doi.org/10.1130/G33217.1>
- Pike, R. J. (1988). The geometric signature: Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology*, *20*(5), 491–511. <https://doi.org/10.1007/BF00890333>
- Pineda, M. C., Vilora, J., & Martínez, C. J. A. (2016). Landslides susceptibility change over time according to terrain conditions in a mountain area of the tropic region. *Environment Monitoring Assessment*, *188*(4), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5240-4>
- Pola, V. A., Garduño, M. V. H., Díaz, S. C., & Hernández, M. V. M. (2006). Estudio geotécnico y análisis de los problemas de remoción en masa y obras de mitigación del Parque Francisco Zarco (Ocosulem), Morelia (Michoacán, México). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *LVIII*(2), 183–193. <https://doi.org/10.18268/BSGM2006v58n2a1>
- Prada, S. L. F., Cabrera, M. A., Camacho, R., Estrada, N., & Ramos, C. A. M. (2019). The mocoa event on March 31 (2017): Analysis of a series of mass movements in a tropical environment of the andean-amazonian piedmont. *Landslides*, *16*(12), 2459–2468. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01263-y>
- Protti, R. (2013). Megadeslizamiento (debris avalanche?) del flanco norte del volcán cacahuatique, Morazán, El Salvador. *Revista Geológica de América Central*, *49*, 121–127. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242013000200010.

- Quesada, R. A., & Barrantes, C. G. (2016). Procesos de ladera cosísmicos del terremoto de Cinchona (Costa Rica) del 8 de enero de 2009 (Ms=6,2). *Cuadernos De Geografía-Revista Colombiana De Geografía*, 25(1), 217–232. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v25n1.52590>
- Quesada, R. A., & Feoli, B. S. (2018). Comparación de la metodología Mora-Vahrson y el método Morfométrico para determinar áreas susceptibles a deslizamientos en la microcuenca del Río Macho, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(61), 1–17. <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.1>
- RAE, Real Academia Española. (2005). Latinoamérica. Diccionario panhispánico de dudas. (2020, Enero 10). <https://www.rae.es/dpd/Latinoam%C3%A9rica>
- Ramírez, H. M. T., & Gaidzik, K. (2017). La pintada landslide – A complex double-staged extreme event, Guerrero, Mexico. *Cogent Geoscience*, 3(1), 1356012. <https://doi.org/10.1080/23312041.2017.1356012>
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- Rhoads, B. L. (2013). Process in geomorphology. *Earth Systems and Environmental Sciences*, 1, 190–214. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00011-7>
- Rib, H. T., & Liang, T. (1978). Recognition and identification. *Landslide Analysis and Control*. Special Report 176, 34–80. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176.pdf>
- Roberts, N. J., Rabus, B. T., Clague, J. J., Hermanns, R. L., Guzmán, M. A., & Minaya, E. (2019). Changes in ground deformation prior to and following a large urban landslide in La Paz, Bolivia, revealed by advanced InSAR. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(3), 679–696. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-679-2019>
- Salinas, J. J. A., Ramos, Z. L. G., & Montalvo, A. J. C. (2019). Regional landslide hazard assessment from seismically induced displacements in Monterrey Metropolitan area, Northeastern Mexico. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(2), 1127–1141. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1087-3>
- Salinas, J. J. A., Salinas, J. R. A., Montalvo, A. J. C., & Alva, N. E. (2017). Inventario de movimientos en masa en el sector sur de la Saliente de Monterrey. Caso de estudio: Cañón de Santa Rosa, Nuevo León, noreste de México. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 34(3), 182–198. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.3.459>
- Sánchez, C. A., & Liberali, A. M., [Ed.]. (2009). *La Geografía en América Latina: visión por países*. Buenos Aires. Centro de Estudios Alexander Von Humboldt. 1–263. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n69/n69a17.pdf>
- Santa, S., & Herrero, S. V. (2010). Producción científica de América Latina y el Caribe: Una aproximación a través de los datos de SCOPUS, 1996–2007. *Revista Interamericana De Bibliotecología*, 33 (2), 379–400. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179015630005>
- Scott, K. M., Macías, J. L., Naranjo, J. A., Rodríguez, S., & McGeehin, J. P. (2001). Catastrophic debris flows transformed from Landslides in Volcanic Terrains: mobility, hazard assessment, and mitigation strategies. USA. US Geological Survey.
- Sepúlveda, S. A., & Petley, D. N. (2015). Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(8), 1821–1833. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1821-2015>
- Sepúlveda, S. A., Rebolledo, S., McPhee, J., Lara, M., Cartes, M., Rubio, E., Silva, D., Correia, N., & Vásquez, J. P. (2014). Catastrophic, rainfall-induced debris flows in Andean villages of Tarapacá, Atacama Desert, northern Chile. *Landslides*, 11(3), 481–491. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0480-2>
- Sepúlveda, S. A., Rebolledo, S., & Vargas, G. (2006). Recent catastrophic debris flows in Chile: geological hazard, climatic relationships and human response. *Quaternary International*, 158 (1), 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.031>

- Sepúlveda, S. A., Serey, A., Lara, M., Pavez, A., & Rebolledo, S. (2010). Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia. *Landslides*, 7(4), 483–492. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0203-2>
- Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2009). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Slaymaker, O. (2010). *Mountain hazard. Geomorphological hazards and disaster prevention* (pp. 33–47). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807527>.
- Slaymaker, O., & Embleton, H. C. (2018). Advances in global mountain geomorphology. *Geomorphology*, 308, 230–264. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.016>
- Soeters, R., & van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. Landslides, investigation and mitigation. Special Report 247, 129–177. National Academy Press. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-008.pdf>
- Solís, C. B., Mendoza, C. M. E., Vázquez, C. G., & Bocco, G. (2019). Landslide inventory map of the tropical dry Sierra Costa Region, Michoacán México. *Physical Geography*, 40(06), 1–24. <https://doi.org/10.1080/02723646.2019.1574136>
- Spalletti, L. A., Veiga, G. D., & Franzese, J. R. (2013). Fluvial-gravitational processes and preservation of forest vegetation in a volcanic area: the Rancahué formation (Oligocene), Neuquén Andes, Argentina. *Andean Geology*, 40(3), 521–538. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n3-a07>
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Vázquez, S. L., Franco, R. O., & Palacios, D. (2011). Dendrogeomorphic dating of rockfalls on low-latitude, high-elevation slopes: Rodadero, Iztaccihuatl volcano, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(9), 1209–1217. <https://doi.org/10.1002/esp.2146>
- Stoffel, M., & Corona, C. (2014). Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Tree-ring Research*, 70(1), 3–20. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-70.1.3>
- Strozzi, T., Klimeš, J., Frey, H., Caduff, R., Huggel, C., Wegmüller, U., & Rapre, A. C. (2018). Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of activity of landslides: A case study from the cordilleras of Peru. *Remote Sensing of Environment*, 217, 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.014>
- Tapia, B. C., Rothlis, L. M., Perucca, L., Esper, A. M., Vargas, H., Ponce, D., & Allis, C. (2018). Analysis of La Dehesa paleo-landslide. Central Pre-Andes of Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 83, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.01.011>
- Tapia, B. C., & Trombotto, L. D. (2019). Rockslides and rock avalanches in the Central Andes of Argentina and their possible association with permafrost degradation. *Permafrost and Periglacial Processes*, 30(4), 330–347. <https://doi.org/10.1002/ppp.2024>
- Terzi, S., Torresan, S., Scheiderbauer, S., Critto, A., Zebisch, M., & Marcomini, A. (2019). Multi-risk assessment in mountain regions: A review of modelling approaches for climate change adaptation. *Journal of Environmental Management*, 232, 759–771. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.100>
- Tilloy, A., Malamud, B. D., Winter, H., & Joly, L. A. (2019). A review of quantification methodologies for multi-hazard interrelationships. *Earth-Science Reviews*, 196, 2–20. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102881>
- TWB, The World Bank. (2020). Development projects. 2020, April 01. <https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/projects-home?lang=es>
- UNDP, United Nations Development Programme. (2020). About Latin America and the Caribbean. The Region. 2020, February 18. <https://www.latinamerica.undp.org/content/rblac/en/home/regioninfo.html>
- UNGRD, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2015). *Objetivos y funciones*. 2020, April 02. <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/>
- UNISDR, United Nations International Strategy for Disaster Reduction. (2019). Terminology on disaster risk reduction. 2020, April 01. <http://www.unisdr.org/we/inform/terminology>

- van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- van Westen, C. J., Van Asch, T. W. J., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation – Why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167–184. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>
- Velásquez, R. L. V., & Sánchez, A. J. J. (2016). Análisis físico de la distribución espacial de los montículos del depósito de avalancha de escombros localizado en el área de las nereidas, flanco occidental del volcán nevado del Ruiz. *Boletín de Geología*, 38(2), 93–100. <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n2-2016006>
- Vieira, B. C., Fernandes, N. F., & Filho, O. A. (2010). Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(9), 1829–1837. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1829-2010>
- Villalpando, F., Tuxpan, J., Ramos, L. J. A., & Carranco, L. S. (2019). New framework based on fusion information from multiple landslide data sources and 3D visualization. *Journal of Earth Science*, xx(x), xxx–xxx. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1243-8>
- Villaseñor, R. C. I., Dávila, H. P., Hernández, M. V. M., & Figueroa, M. S. (2018). Deep-seated gravitational slope deformations triggered by extreme rainfall and agricultural practices (eastern Michoacan, Mexico). *Landslides*, 15(9), 1867–1879. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1031-z>
- Viltres, M. Y., Guardado, L. R., & Alfonso, O. L. D. (2019). Cartografía de la peligrosidad por deslizamientos en el municipio de Mayarí, Holguín. *Minería y Geología*, 35(2), 126–146. <https://doi.org/10.18050/rev.mg.v35i2.1410>
- WBG, The World Bank Group. (2019). Disaster risk management. 2020, February 19. <https://www.worldbank.org/en/topic/disasterriskmanagement/overview>
- Yépez, R. F. D., Ramírez, S. N. L., Aguilar, D. J. J., Caballero, R. V. H., Lozano, G. D. F., Guerra, C. V. H., & Jiménez, M. F. (2017). Modelo SIG para la zonificación de peligro por inestabilidad de laderas-Caso de estudio: área metropolitana de Monterrey, México. *Serie Correlación Geológica*, 33 (1–2), 27–40. <http://www.insugeo.org.ar/scg/ver-articulo.php?id=488>
- Zavala, B., Hermanns, R., Valderrama, P., Costa, C., & Rosado, M. (2009). Procesos geológicos e intensidad macrosísmica inqua del sismo de Pisco del 15/08/2007, Perú. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65 (4), 760–779. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/680>

Tabla A1. List of the 283 analyzed articles in this paper

Appendix

Table A1. List of the 283 analyzed articles in this paper.

No	Reference
1	Aristizábal, E., López, S., Sánchez, O., Vásquez, M., Rincón, F., Ruiz, V.D., Restrepo, S. & Valencia, J.S. (2019). Evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para una región de los Andes colombianos estimando la probabilidad espacial, temporal y magnitud. <i>Boletín de Geología</i> . 41 (3):85–105. https://doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2.019.004
2	Barella, C.F., García, S.F. & Zezere, J.L. (2019). A comparative analysis of statical landslides susceptibility mapping in the southeast region of Minas Gerais state, Brazil. <i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i> . 78:3205–3221. https://doi.org/10.1007/s10064-018-1341-3
3	Carvalho, C.R., Nunes, F.C. & Maciel, S.C. (2019). Condicionantes geomorfológicos e da cobertura da terra na ocorrência de movimentos de massa na região serrana do Rio de Janeiro. <i>Cadernos de Geografia</i> . 29 (56):27–44. https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29n56p27
4	Castro, M.R. & Legorreta, P.G. (2019). Application of the Continuum Neighborhood Spatial Analysis and Logistic Regression in the Spatial Modeling of Probability of Occurrence of Landslides. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 98:1–15. https://doi.org/10.14350/ig.59760
5	Coutinho, R.Q., Silva, M.M., Santos, A.N. & Lacerda, W.A. (2019). Geotechnical characterization and failure mechanism of landslide in granite residual soil. <i>Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering</i> . 145 (8):05019004. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002052
6	Cueto, G.C.J., Estévez, C.E. & Ordaz, H.A. (2019). Zonificación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la Cordillera de Guaniguanico, Cuba. Un aporte al ordenamiento del territorio. <i>Anales de Geografía de la Universidad Complutense</i> . 39 (1):11–38. https://doi.org/10.5209/AGUC.64675
7	Díaz, A., Acosta, D. & Sáez, D. (2019). Landslide susceptibility map of San Miguelito district, Panama, based on geographic information system. <i>Revista de I + D Tecnológico</i> . 15 (1):59–70. https://doi.org/10.33412/itd.v15.1.2100
8	Filho, O.A. & Fernandes, M.A. (2019). Landslide analysis of unsaturated soil slopes based on rainfall and matrix suction data. <i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i> . 78:4167–4185. https://doi.org/10.1007/s10064-018-1392-5
9	Forero, O.O.E. & Duarte, D.W.F. (2019). Caracterización e identificación de la geomorfología (ambientes y unidades geomorfológicas) en la plancha 121-Cerito, Colombia, aplicado a movimientos en masa escala 1:100,000. <i>Boletín de Geología</i> . 41 (2):35–44. https://doi.org/10.18273/revbol.v41n2-2.019.002
10	Franco, R.O., Stoffel, M. & Ballesteros, C.J.A. (2019). Reconstruction of debris-flow activity in a temperate mountain forest catchment of central Mexico. <i>Journal of Mountain Science</i> . 16 (9):2096–2109. https://doi.org/10.1007/s11629-019-5496-6
11	Gabelini, B.M., Correa, C.V.S., Cerri, R.I., Reis, F.A.G.V., Zaine, J.E. & Giordano, L.C. (2019). Avaliação da susceptibilidade a escorregamento na Serra do Mar pela aplicação da compartimentação fisiográfica. <i>Geologia USP</i> . 19 (1):193–211. https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v19-138.528
12	García, A.E.F., Aristizábal, E., Marín, R.J. & Guzmán, M.J.C. (2019). Implementation of the TRIGRS model with reliability analysis for hazard assessment of shallow rainfall-triggered landslides. <i>Tecnológicas</i> . 22 (44):111–129. https://doi.org/10.22430/22.565.337.1037
13	García, D.H., Machuca, S. & Medina, E. (2019). Dynamic and geomorphic characterizations of the Mocoa debris flow (31 March 2017, Putumayo Department, southern Colombia). <i>Landslides</i> . 16:597–609. https://doi.org/10.1007/s10346-018-01121-3
14	Garduño, M.V.H., Figueroa, S.A., Magaña, G.N., Ruiz, F.A., Gómez, C.J., Jiménez, H.A. & Hernández, M.V.M. (2019). The Mitla Landslide, an event that changed the fate of a Mixteco/Zapoteco civilization in Mesoamerica. <i>International Journal of Geophysics</i> . Hindawi. 1–14. https://doi.org/10.1155/2019/5.438.381
15	Hussain, Y., Hussain, S.M., Martino, S., Cardenas, S.M., Hamza, O., Rodriguez, R.J.F., Uagoda, R. & Martinez, C.H. (2019). Typological analysis of slidequakes emitted from landslides: experiments on an expander body pile and Sobradinho landslide (Brasília, Brazil). <i>REM – International Engineering Journal</i> . 72 (3):453–460. https://doi.org/10.1590/0370-44.672.018.720.110
16	Junquera, T.S., Moreiras, S.M. & Sepúlveda, S.A. (2019). Distribution of landslides along the Andean active orogenic front (Argentinean Precordillera 31–33° S). <i>Quaternary International</i> . 512:18–34. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.01.030
17	Konig, T., Kux, H.J.H. & Mendes, R.M. (2019). Shalstab mathematical model and Worldview-2 satellite images to identification of landslide susceptible areas. <i>Natural Hazards</i> . 97:1127–1149. https://doi.org/10.1007/s11069-019-03691-4
18	Lacroix, P., Araujo, G., Hollingsworth, J., & Taipe, E. (2019). Self-Entrainment Motion of a Slow-Moving Landslide Inferred from Landsat-8 Time Series. <i>Journal of Geophysical Research: Earth Surface</i> , 124 (5):1201–1216. https://doi.org/10.1029/2018JF004920

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
19	Marín, R.J., García, E. & Aristizábal, E. (2019). Rainfall thresholds for shallow landslides based on physical models: application in a subbasin of the Valle de Aburrá (Colombia). <i>DYNA</i> . 86 (210):312–322. https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.77166
20	Moragues, S., Lenzano, M.G., Moreiras, S. & Lenzano, L. (2019). Geomorfología periglacial asociada a la inestabilidad de laderas en el brazo norte del lago argentino, Patagonia, Argentina. <i>Cuadernos de Investigación Geográfica</i> . 45 (1):367–392. https://doi.org/10.18172/cig.3786
21	Moragues, S., Lenzano, M.G., Moreiras, S., Lo Vecchio, A., Lannutti, E. & Lenzano, L. (2019). Slope instability analysis in South Patagonia applying multivariate and bivariate techniques on Landsat images during 2001–2005 period. <i>Catena</i> . 174:339–352. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.024
22	Moreiras, S.M., Jeanneret, P., Lauro, C., Vergara, DalP.L., Correas, G.M. & Junquera, T.S. (2019). Deslizamientos asociados a la degradación del permafrost: evidencias geomorfológicas en el pasado y presente en los andes centrales (31°–34°S). <i>GEO UERJ</i> . 35:1–15. https://doi.org/10.12957/geouerj.2019.45036
23	Oliveira, G.G., Chimelo, R.L.F., Guasselli, L.A. & Haetinger, C. (2019). Random forest and artificial neural networks in landslide susceptibility modeling: a case study of the Fao River Basin, Southern Brazil. <i>Natural Hazards</i> . 99:1049–1073. https://doi.org/10.1007/s11069-019-03795-x
24	Ordaz, H.A., Esquivel, A.R.K., Hernández, S.J.R. & Cabadas, B.H.V. (2019). Susceptibilidad a desprendimientos de rocas en la urbanización La Teresona-Zopilocalco Norte, Toluca: premisas para el desarrollo comunitario. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 99. e59888. https://doi.org/10.14350/riq.59888
25	Prada, S.L.F., Cabrera, M.A., Camacho, R., Estrada, N. & Ramos, C.A.M. (2019). The Mocoa Event on March 31 (2017): analysis of a series of mass movements in a tropical environment of the Andean-Amazonian Piedmont. <i>Landslides</i> . 16:2459–2468. https://doi.org/10.1007/s10346-019-01263-y
26	Roberts, N.J., Rabus, B.T., Clague, J.J., Hermanns, R.L., Guzmán, M.A. & Minaya, E. (2019). Changes in ground deformation prior to and following a large urban landslide in La Paz, Bolivia, revealed by advanced InSAR. <i>Natural Hazards and Earth System Sciences</i> . 19:679–696. https://doi.org/10.5194/nhess-19-679-2019
27	Salazar, G.L.F., Hoyos, P.F., Echeverri, R.O. & Hincapié, G.E. (2019). Laboratory rainfall-induced slope failure in a soil from the Colombian coffee region. <i>AUC Geographica</i> . 54 (1):48–56. https://doi.org/10.14712/23.361.980.2019.5
28	Salinas, J.J.A., Ramos, Z.L.G. & Montalvo, A.J.C. (2019). Regional landslide hazard assessment from seismically induced displacements in Monterrey Metropolitan area, Northeastern Mexico. <i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i> . 78:1127–1141. https://doi.org/10.1007/s10064-017-1087-3
29	Solis, C.B., Mendoza, C.M.E., Vázquez, C.G. & Bocco, G. (2019). Landslide inventory map of the tropical dry Sierra Costa Region, Michoacán México. <i>Physical Geography</i> . 1–24. https://doi.org/10.1080/02723646.2019.1574136
30	Soto, J., Palenzuela, J.A., Galve, J.P., Luque, J.A., Azañón, J.M., Tamay, J. & Iriguy, C. (2019). Estimation of empirical rainfall thresholds for landslide triggering using partial duration series and their relation with climatic cycles. An application in southern Ecuador. <i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i> . 78:1971–1987. https://doi.org/10.1007/s10064-017-1216-z
31	Tapia, B.C. & Trombotto, L.D. (2019). Rockslides and rock avalanches in the Central Andes of Argentina and their possible association with permafrost degradation. <i>Permafrost and Periglacial Processes</i> . 30:330–347. https://doi.org/10.1002/ppp.2024
32	Uribe, E.M., Corral, F., Escamilla, J.C. & Cruz, E. (2019). Desarrollo y aplicación de una metodología para la elaboración de mapas de peligro municipales por deslizamiento de terreno mediante Sistemas de Información Geográfica. <i>Páidi</i> . 13:29–34. https://doi.org/10.29057/icbi.v7i13.3439
33	Vergara, DalP.L., Moreiras, S.M., Santibañez, O.F., Araneo, D. & Ferrando, F. (2019). Debris flows triggered from melt of seasonal snow and ice within the active layer in the semiarid Andes. <i>Permafrost and Periglacial Processes</i> . 1–12. https://doi.org/10.1002/ppp.2020
34	Villalpando, F., Tuxpan, J., Ramos, L.J.A. & Carranco, L.S. (2019). New framework based on fusion information from multiple landslide data sources and 3D visualization. <i>Journal of Earth Science</i> . xx (x):xxx–xxx. https://doi.org/10.1007/s12583-019-1243-8
35	Viltres, M.Y., Guardado, L.R. & Alfonso, O.L.D. (2019). Cartografía de la peligrosidad por deslizamientos en el municipio de Mayarí, Holguín. <i>Minería y Geología</i> . 35 (2):126–146. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223,558,779,001
36	Bispo, C.O., Listo, R.F.L. & Silva, G.D. (2018). Previsão de escorregamentos rasos a partir do modelo SHALSTAB na borda oriental da Chapada do Araripe. <i>Revista de Geografia (RECIFE)</i> . 35 (4):219–230. https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/238,220
37	Cardozo, C.P., Sampaio, L.E.S. & Vieira, M.A.M. (2018). Shallow landslide susceptibility assessment using SINMAP in Nova Friburgo (Rio de Janeiro, Brazil). <i>Revista Brasileira de Cartografia</i> . 70 (4):1206–1230. https://doi.org/10.14393/rbcv70n4-46,139
38	Cerri, R.L., Reis, F.A.G.V., Gramani, M.F., Gabelini, B.M., Zaine, J.E., Sisto, F.P. & Giordano, L.C. (2018). Análise da influência de atributos fisiográficos e morfométricos na definição da suscetibilidade de bacias hidrográficas à ocorrência de corridas de massa. <i>Geologia USP</i> . 18 (1):35–50. https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-133,737

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
39	Eger, P.M., Cagliari, J., Aquino, C.D. & Coelho, O.G.W. (2018). Rheologic survey of mass transport events from the geologic record of an Andean Precordilleran slope. <i>Geomorphology</i> . 315:57–67. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.05.004
40	Fallas, M., Prado, A., Mora, M.M., Ruiz, P., Alfaro, E.J. & Soto, G.J. (2018). El deslizamiento del 8 de diciembre de 1994 en el volcán Irazú (Costa Rica): aspectos históricos y geomorfología con base en fotografías aéreas históricas y recientes. <i>Revista Geológica de América Central</i> . 58:55–84. https://doi.org/10.15517/rqac.v58i0.32844
41	Folador, R.M., Silveira, T.S. & Fiori, A.P. (2018). Cálculo de Probabilidade e Quantificacao do Volume de Material Suscetível a Escorregamentos-Bacia do Rio Jacareí, Morretes-PR. <i>Boletim Paranaense de Geociências</i> . 74 (1):47–56. https://doi.org/10.5380/geo.v74i1.50642
42	García, R.S., Legorreta, P.G. & Aceves, Q.F. (2018). Susceptibilidad geomorfológica a procesos gravitacionales en arroyos secundarios del sur de la cuenca La Ciénega, volcán Nevado de Toluca. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 96:1–14. https://doi.org/10.14350/ig.59613
43	Jeanneret, P. & Moreiras, S.M. (2018). Inventario de procesos de remoción en masa en la cuenca baja del Río Blanco (31°S), Andes Centrales Argentinos. <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> . 35 (3):215–227. https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.787
44	Jiménez, J.A. & Aristizábal, E. (2018). A methodological proposal for landslide susceptibility mapping in linear projects: A study case, Medellín Turbo highway, Section 2. <i>Boletín de Ciencias de la Tierra</i> . 43:14–23. https://doi.org/10.15446/rbct.n43.64683
45	Lara, M., Sepúlveda, S.A., Celis, C., Rebolledo, S. & Ceballos, P. (2018). Landslide susceptibility maps of Santiago city Andean foothills, Chile. <i>Andean Geology</i> . 45 (3):433–442. https://doi.org/10.5027/andgeoV45n3-3151
46	Leal, V.J., Pérez, G.U. & Ortiz, L.N.E. (2018). Distribución espacial y temporal de deslizamientos (1999–2015) en la cuenca del río Combeima, Colombia. <i>Revista Geográfica Venezolana</i> . 59 (2):346–365. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347,760,473,008
47	Legorreta, P.G., Alanís, A.R.M., Arana, S.L. & Aceves, Q.F. (2018). Evaluación de la eficiencia de predicción a deslizamientos usando un modelo cartográfico-hidrológico: caso de estudio Cuenca la Carbonera, flanco SE del Volcán Pico de Orizaba. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 95:1–15. https://doi.org/10.14350/ig.58387
48	Listo, R.F.L., Gomes, V.M.C. & Vieira, C.B. (2018). Avaliação da variacao do fator de segurança com o modelo TRIGRS. <i>Revista Brasileira de Geomorfologia</i> . 19 (1):207–220. https://doi.org/10.20502/rbg.v19i1.1256
49	Marques, O.M.C., Netto, C.A.L. & Sato, M.A. (2018). Influence of secondary forest and grass on deflagration of shallow landslides in Nova Friburgo, Rio de Janeiro. <i>Revista Brasileira de Geomorfologia</i> . 19 (4):793–806. https://doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1479
50	Meirelles, E.O., Dourado, F. & Costa, V.C. (2018). Análise multicriterio para mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa na bacia do Rio Paquequer-RJ. <i>Geo UERJ</i> . 33:1–22. https://doi.org/10.12957/geouerj.2018.26037
51	Moreiras, S.M., Vergara, DalP.I. & Araneo, D. (2018). Were merely storm-landslides driven by the 2015–2016 Niño in the Mendoza River valley? <i>Landslides</i> . 15:997–1014. https://doi.org/10.1007/s10346-018-0959-3
52	Oliveira, G.G., Guasselli, L.A., Quevedo, R.P., Ruiz, L.F.CH., Bressani, L.A. & Riffel, E.S. (2018). Identificacao e análise de áreas suscetíveis a fluxos de detritos na bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. <i>Pesquisas em Geociências</i> . 45:1–25. https://doi.org/10.22456/1807-9806.88685
53	Quesada, R.A. & Feoli, B.S. (2018). Comparación de la metodología Mora-Vahrson y el método Morfométrico para determinar áreas susceptibles a deslizamientos en la microcuenca del Río Macho, Costa Rica. <i>Revista Geográfica de América Central</i> . 2 (61):1–17. https://doi.org/10.15359/rqac.61-2.1
54	Quesada, R.A., Moncada, L.R. & Paz, T.J.A. (2018). Las investigaciones sobre movimientos de laderas en Costa Rica, Honduras, México y Nicaragua: enseñanzas desde la academia, las agencias de cooperación y las instituciones públicas. <i>Revista Geográfica de América Central</i> . 1 (60):1–26. https://doi.org/10.15359/rqac.60-1.1
55	Ramos, B.R.N., Vázquez, J.R., Romero, C.R., Arrogante, F.P. & Novillo, C.J. (2018). Evaluation of unsupervised change detection methods applied to landslide inventory mapping using ASTER imagery. <i>Remote Sensing</i> . 10:1987. https://doi.org/10.3390/rs10121987
56	Salinas, J.J.A., Montalvo, A.J.C. & Reinoso, A.E. (2018). Landslides induced by a low magnitude seismic sequence at continental interior: a case study of the Santa Rosa Canyon, northeastern Mexico. <i>Landslides</i> . 15:783–795. https://doi.org/10.1007/s10346-018-0963-7
57	Sbroglia, S.M., Pereira, R.G.M., Reis, H.R.A. & Fontes, G.R. (2018). Mapping susceptible landslide areas using geotechnical homogeneous zones with different DEM resolutions in Ribeirão Bau basin, Ilhota/SC/Brasil. <i>Landslides</i> . 15:2093–2106. https://doi.org/10.1007/s10346-018-1052-7
58	Silva, C.A.C. da & Riedel, P.S. (2018). Comparacao entre as análises integrada e paramétrica na suscetibilidade a escorregamentos no entorno de dutos: faixa de dutos Orbel, Estado do Rio de Janeiro. <i>Pesquisas em Geociências</i> . 45:1–17. https://doi.org/10.22456/1807-9806.85636
59	Strozzi, T., Klimes, J., Frey, H., Caduff, R., Huggel, C., Wegmüller, U., & Rapre, A. C. (2018). Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of activity of landslides: A case study from the Cordilleras of Peru. <i>Remote sensing of environment</i> . 217, 111–125. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.014

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
60	Tapia, B.C., Rothlis, L.M., Perucca, L., Esper, A.M., Vargas, H., Ponce, D. & Allis, C. (2018). Analysis of La Dehesa paleo-landslide. Central Pre-Andes of Argentina. <i>Journal of South American Earth Sciences</i> . 83:1–13. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.01.011
61	Valencia, O.J.A. & Martínez, G.A.M. (2018). A neural network model applied to landslide susceptibility analysis (Capitanejo, Colombia). <i>Geomatics, Natural Hazards and Risk</i> . 9 (1):1106–1128. https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1513083
62	Vergara, DalP.L.P., Santibañez, O.F.A., Aranco, D., Ferrando, A.F.J. & Moreiras, S.M. (2018). Determination of probabilities for the generation of high-discharge flows in the middle basin of Elqui River, Chile. <i>Natural Hazards</i> . 93:531–546. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3313-0
63	Villaseñor, R.C.I., Dávila, H.P., Hernández, M.V.M. & Figueroa, M.S. (2018) Deep-seated gravitational slope deformations triggered by extreme rainfall and agricultural practices (eastern Michoacan, Mexico). <i>Landslides</i> . 15:1867–1879. https://doi.org/10.1007/s10346-018-1031-z
64	Alanís, A.R.M., Legorreta, P.G., Mas, J.F. & Granados, R.G.R. (2017). Susceptibility to gravitational processes due to land cover change in the Río Chiquito-Barranca del Muerto subbasin (Pico de Orizaba volcano, México). <i>Journal of Mountain Science</i> . 14 (12):2511–2526. https://doi.org/10.1007/s11629-016-4268-9
65	Alvarado, F.J.P., Castro, D., Estrada, N., Caicedo, B., Sánchez, S.M., Camacho, L.A. & Muñoz, F. (2017). Quantitative-mechanistic model of assessing landslide probability and pipeline failure probability due to landslides. <i>Engineering Geology</i> . 222:212–224. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.04.005
66	Brito, M.M., Weber, E.J. & Filho, L.C.P.S. (2017). Multi-criteria analysis applied to landslide susceptibility mapping. <i>Revista Brasileira de Geomorfologia</i> . 18 (4):719–735. https://doi.org/10.20502/rbg.v18i4.1117
67	Cerri, R.L., Reis, F.A.G.V., Gramani, M.F., Giordano, L.C. & Zaine, J.E. (2017). Landslides zonation hazard: relation between geological structures and landslides occurrence in hilly tropical regions of Brazil. <i>Anais da Academia Brasileira de Ciências</i> . 89 (4):2609–2623. https://doi.org/10.1590/0001-3765.2017.201.170.224
68	Correa, M.N.A., & Higido, C.J. F. (2017). Determination of landslide susceptibility in linear infrastructure. Case: aqueduct network in Palacé, Popayan (Colombia). <i>Ingeniería e Investigación</i> . 37 (2):17–24. https://doi.org/10.15446/ing.investig.v37n2.59654
69	Franco, R.O., Stoffel, M., Vásquez, S.L. (2017). Tree-ring based reconstruction of rockfalls at Cofre de Perote volcano, Mexico. <i>Geomorphology</i> . 290:142–152. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.003
70	Gaidzik, K., Ramírez, H.M.T., Bunn, M., Leshchinsky, B. A., Olsen, M., & Regmi, N. R. (2017). Landslide manual and automated inventories, and susceptibility mapping using LIDAR in the forested mountains of Guerrero, Mexico. <i>Geomatics, natural hazards and risk</i> , 8 (2):1054–1079. https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1292560
71	Gerente, J., Santos, P.M.A.J., Sothe, C. & Nunes, F.C. (2017). Classificação semiautomática de cicatrizes de movimentos de massa por meio de técnicas de detecção de mudanças. <i>Revista Brasileira de Geomorfologia</i> . 18 (4):801–812. https://doi.org/10.20502/rbg.v18i4.1249
72	Godoy, B., Rodríguez, I., Pizarro, M. & Rivera, G. (2017). Geomorphology, lithofacies, and block characteristics to determine the origin, and mobility, of a debris avalanche deposit at Apacheta-Aguilucho Volcanic Complex (AAVC), northern Chile. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> . 347:136–148. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.09.008
73	Gómez, A.J.C., Gómez, E.G., Guillén, C.B. & Chacón, A.N., (2017). Evaluación geodinámica y modelamiento geotectónico del deslizamiento de Madrigal-Arequipa. <i>Revista del Instituto de Investigación, FIGMMG-UNMSM</i> . 20 (39):49–56. https://doi.org/10.15381/iigeo.v20i39.14165
74	Hussain, Y., Martinez, C.H., Cárdenas, S.M., Uagoda, R., Martino, S. & Hussain, M.B. (2017). Microtremor response of a mass movement in Federal District of Brazil. <i>Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ</i> . 40 (3):212–221. https://doi.org/10.11137/2017_3_212_221
75	Legorreta, P.G., Bursik, M., Zamorano, O.J.J., Lugo, H.J., Martínez, H.B. & Bajo, S.J.V. (2017). Estimación del volumen de los depósitos asociados a deslizamientos a través de geofomas, en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 92:1–13. https://doi.org/10.14350/ig.51113
76	Londoño, L.J.P. (2017). Landslides susceptibility assesment using discriminant analysis. Application on a regional scale. <i>DYNA</i> . 84 (201):278–289. https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.61385
77	Macedo, C.K.A., Ramos, F.L.G., Gaboardi, C., Moreira, J.R., Vissirini, F. & Silva, C.M. (2017). A compact groundbased interferometric radar for landslide monitoring: The Xerém experiment. <i>IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing</i> . 10 (3):975–986 https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2640316
78	Mora, R. & Pirulli, M. (2017). Deslizamiento las torres, volcán irazú, Costa Rica: definición de su volumen y su dirección preferencial de movimiento. <i>Revista Geológica de América Central</i> . 56:51–67. https://doi.org/10.15517/rgac.v056.29236
79	Murillo, G.F.G. & Alcántara-Ayala, I. (2017). Landslide inventory, Teziutlán municipality, Puebla, México (1942–2015). <i>Journal of Maps</i> . 13 (2):767–776. https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1381194
80	Nery, T.D. (2017). O uso de parametros morfométricos como potencial indicador de ocorrência de fluxos de detritos no litoral norte de Sao Paulo. <i>Geosul</i> . 32 (63):179–200. https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/download/2177-5230.2017v32n63p201/34.442

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
81	Paz, T.J.A., González, H.R., Gómez, R.M. & Velasco, H.J.A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso de ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 92:1–16. https://doi.org/10.14350/ig.52822
82	Peña, R.C.A. (2017). Datos de precipitación con el modelo HSB para pronósticos de deslizamiento de suelos superficiales. <i>Boletín de Geología</i> . 39 (2):49–56. https://doi.org/10.18273/revbol.v39n2-2.017.003
83	Quesada, R.A. & Barrantes, C.G. (2017). Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 94:1–12. https://doi.org/10.14350/ig.57318
84	Ramírez, H.M.T., & Gaidzik, K. (2017). La Pintada landslide-A complex double-staged extreme event, Guerrero, Mexico. <i>Cogent Geoscience</i> , 3 (1):1,356,012. https://doi.org/10.1080/23,312,041.2017.1356012
85	Salinas, J.J.A., Salinas, J.R.A., Montalvo, A.J.C. & Alva, N.E. (2017). Inventario de movimientos en masa en el sector sur de la Saliente de Monterrey. Caso de estudio: cañón de Santa Rosa, Nuevo León, noreste de México. <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> . 34 (3):182–198. https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.3.459
86	Sandoval, S.E.M. & Ruiz, F.D. (2017). Zonificación de amenazas por deslizamientos a partir del modelo de Mora y Vahson. <i>Entorno Geográfico</i> . 13:114–141. https://doi.org/10.25100/eg.v0i13.6035
87	Soto, J., Galve, J.P., Palenzuela, J.A., Azañón, J.M., Tamay, J. & Irigaray, C. (2017). A multi-method approach for the characterization of landslides in an intramontane basin in the Andes (Loja, Ecuador). <i>Landslides</i> . 14:1929–1947. https://doi.org/10.1007/s10346-017-0830-y
88	Yépez, R.F.D., Ramírez, S.N.L., Aguilar, D.J.J., Caballero, R.V.H., Lozano, G.D.F., Guerra, C.V.H. & Jiménez, M.F. (2017). Modelo SIG para la zonificación de peligro por inestabilidad de laderas-Caso de estudio: área metropolitana de Monterrey, México. <i>Serie Correlación Geológica</i> . 33 (1–2):27–40. http://www.insugeo.org.ar/scg/ver-articulo.php?id=488
89	Aceves, Q.J.F., Legorreta, P.G., Lugo, H.J., Umaña, R.J. & Legorreta, C.H.A. (2016). Sistemas de información geográfica y cartográfica geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 91:43–55. https://doi.org/10.14350/ig.46503
90	Aristizábal, G.E.V., Vélez, U.J.I. & Martínez, C.H.E. (2016). A comparison of linear and nonlinear model performance of shia_landslide: a forecasting model for rainfall-induced landslides. <i>Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia</i> . 80:74–88. https://doi.org/10.17533/udea.redin.n80a09
91	Aristizábal, G.E.V., Vélez, U.J.I. & Martínez, C.H.E. (2016). Influencia de la lluvia antecedente y la conductividad hidráulica en la ocurrencia de deslizamientos detonados por lluvias utilizando el modelo shia_landslide. <i>Revista EIA</i> . 13 (26):31–46. https://doi.org/10.24050/rela.v13i26.863
92	Bustillos, J., Arciniega, F., Freire, A., Gómez, P., Iles, M., Masapanta, E., Quinto, V. & Toro, E. (2016). Una breve caracterización de los fenómenos de remoción en masa (FRM): Sigchos-Ecuador. <i>FIGEMPA: Investigación y Desarrollo</i> . 1 (6):81–88. https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.779
93	Cárdenas, S.M., Ramos, S.H. & Vidal, G.M.C. (2016). Interferometría de ruido sísmico para la caracterización de la estructura de velocidad 3D de un talud en la 3a Sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México. <i>Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana</i> . 68 (2):173–186. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-3322.2016000200173&script=sci_abstract&lng=es
94	Dias, V.C., Vieira, B.C. & Gramani, M.F. (2016). Parâmetros morfológicos e morfométricos como indicadores da magnitude das corridas de detritos na Serra do Mar Paulista. <i>Revista franco-brasileira de geografia</i> . 29:1–19. https://doi.org/10.4000/confins.11444
95	Galbán, R.L. & Guardado, L.R. (2016). Modelación del peligro a deslizamientos en el Municipio de Santiago de Cuba considerando el peso de las variables determinantes. <i>Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales</i> . 18 (1):89–99. http://revista.macn.gob.ar/ojs/index.php/RevMus/article/view/438
96	Gomes, M. C.V. & Vieira, B.C. (2016). Saturated hydraulic conductivity of soils in a shallow landslide area in the Serra do Mar, Sao Paulo, Brazil. <i>Zeitschrift für Geomorphologie</i> . 60 (1):53–65. https://doi.org/10.1127/zfg/2016/0229
97	Lopes, L.L.C.F., Prado, B.L.A. & Amorim, C.P.T. (2016). Assessment of the debris-flow susceptibility in tropical mountains using clast distribution patterns. <i>Geomorphology</i> . 275:16–25. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.026
98	Lorentz, J.F., Calijuri, M.L., Gomes, M.E. & Carreiro, B.A. (2016). Multicriteria analysis applied to landslide susceptibility mapping. <i>Natural Hazards</i> . 83:41–52. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2300-6
99	Martínez, O.A. (2016). Unidades gravitacionales relicticas y reactivadas en los alrededores de Esquel: clasificación, origen y edad. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 73 (3):319–329. http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/raga/article/view/5903
100	Paz, T.J.A., González, H.R., Gómez, R.M. & Velasco, H.J.A. (2016). Characterization of gravitational processes in different geological environments of Chiapas, Mexico. <i>ESPACIO I + D. Innovación más Desarrollo</i> . V (12):109–123. https://doi.org/10.31644/IMASD.12.2016.a08
101	Pineda, M.C., Vilora, J. & Martínez, C.J.A. (2016). Landslides susceptibility change over time according to terrain conditions in a mountain area of the tropic region. <i>Environment Monitoring Assessment</i> . 188:255:1–12. https://doi.org/10.1007/s10661-016-5240-4

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
102	Quesada, R.A. & Barrantes, C.G. (2016). Procesos de ladera cósmicos del terremoto de Cinchona (Costa Rica) del 8 de enero de 2009 (Ms = 6.2). Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía. 25 (1):217–232. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281.843.790.015
103	Ramos, C.A.M., Prada, S.L.F., Trujillo, V.M.G., Macías, J.P. & Santos, R.A.C. (2016). Linear discriminant analysis to describe the relationship between rainfall and landslides in Bogotá, Colombia. Landslides. 13:671–681. https://doi.org/10.1007/s10346-015-0593-2
104	Ríos, R., Ribó, A., Mejía, R. & Molina, G. (2016). Combining neural networks and geostatistics for landslide hazard assessment of San Salvador Metropolitan area, El Salvador. Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones. 23 (1):155–172. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45.343.487.007
105	Roverato, M. (2016). The Montesbelos mass-flow (southern Amazonian craton, Brazil): a Paleoproterozoic volcanic debris avalanche deposit? Bulletin of Volcanology. 78:49. https://doi.org/10.1007/s00445-016-1043-2
106	Velásquez, R.L.V. & Sánchez, A.J.J. (2016). Análisis físico de la distribución espacial de los montículos del depósito de avalancha de escombros localizado en el área de las nereidas, flanco occidental del volcán Nevado del Ruiz. Boletín de Geología. 38 (2):93–100. https://doi.org/10.18273/revbol.v38n2-2.016.006
107	Younes, C.N. & Erazo, M.E. (2016). Landslide susceptibility analysis using remote sensing and GIS in the western Ecuadorian Andes. Natural Hazards. 81:1829–1859. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2157-8
108	Zerathe, S., Lacroix, P., Jongmans, D., Marino, J., Taipe, E., Wathélet, M., Pari, W., Smoll, L.F., Norabuena, E., Guillier, B. & Tataru, L. (2016). Morphology, structure and kinematics of a rainfall controlled slow-moving Andean landslide, Peru. Earth Surface Processes and Landforms, 41 (11):1477–1493. https://doi.org/10.1002/esp.3913
109	Abascal, V.L. & González, B.G. (2015). Sedimentación coluvial e inestabilidad de laderas en los Andes de Tierra del Fuego. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 72 (4):470–481. http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/raga/article/view/6846
110	Aristizábal, E., García, E. & Martínez, C. (2015). Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountains terrains. Natural Hazards. 78:621–634. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1736-4
111	Ayala, O.R.L., Dal Pozzo, F. & Sanchez, D.D.I. (2015). Zonificación de la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos de masa. Microcuencas Agua Blanca y La Laja. Andes venezolanos. Revista Geográfica Venezolana. 56 (2):221–247. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347.743.079.005
112	Brenning, A., Schwinn, M., Ruiz-Páez, A. P., & Muenchow, J. (2015). Landslide susceptibility near highways is increased by 1 order of magnitude in the Andes of southern Ecuador, Loja province. Natural Hazards and Earth System Sciences. 15 (1):45–57. https://doi.org/10.5194/nhess-15-45-2015
113	Esper, A.M.Y. & Perucca, L.P. (2015). A large and active debris-rockslide in the Central Andes of Argentina (30.26° S): Morphometry and triggering mechanisms. Quaternary International. 374:182–188. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.12.019
114	Esper, A.M.Y. (2015). Application of logistic regression and frequency ratio in the spatial distribution of debris-rockslides: Precordillera de San Juan, Argentina. Quaternary International. 355:202–208. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.11.002
115	Galindo, S.J.A. & Alcántara-Ayala, I. (2015). Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México. Investigaciones Geográficas. 88:122–145. https://doi.org/10.14350/ig.43790
116	Jaimes, M.A., Niño, M. & Huerta, B. (2015). Hurricane event-based method to create regional hazard maps for heavy rainfall-induced translational landslides. Natural Hazards. 76:1143–1161. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1539-z
117	Lacroix, P., Berthier, E., & Maquerhua, E. T. (2015). Earthquake-driven acceleration of slow-moving landslides in the Colca valley, Peru, detected from Pleiades images. Remote Sensing of Environment. 165:148–158. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.010
118	Listo, R.F.L. & Vieira, C.B. (2015). Influencia de parámetros geotécnicos e hidrológicos na previsão de áreas instáveis a escorregamentos translacionais rasos utilizando o modelo TRIGRS. Revista Brasileira de Geomorfologia. 16 (3):485–500 https://doi.org/10.20502/rbg.v16i3.665
119	López, F.P.A. (2015). Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa, en laderas urbanizadas de costa de Chile centro-sur. Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía. 24 (2):93–112. https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50212
120	Margirier, A., Audin, L., Carcaillet, J., Schwartz, S., & Benavente, C. (2015). Tectonic and climatic controls on the Chuquibamba landslide (western Andes, southern Peru). Earth Surface Dynamics. 3 (2):281–289. https://doi.org/10.5194/esurf-3-281-2015
121	Mergili, M., Marchant, S.C.I. & Moreiras, S.M. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía. 24 (2):113–131. https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50211
122	Michel, G.P., Goerl, R.F. & Kobiyama, M. (2015). Critical rainfall to trigger landslides in Cunha River basin, southern Brazil. Natural Hazards. 75:2369–2384. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1435-6

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
123	Milana, J.P. (2015). Molards and their relation to landslides involving permafrost failure. <i>Permafrost and Periglacial Processes</i> , 27 (3):271–284. https://doi.org/10.1002/ppp.1878
124	Molina, E.A.N., Cardoso, A.O. & Nogueira, F.R. (2015). Relacao precipitacao-deslizamento no Município de Sao Bernardo do Campo-SP. <i>Geocia e Natura</i> , 37:46–54. https://doi.org/10.5902/2179460X16214
125	Moreda, M.M., Filho, M.V., Bertoldo, M.A. & Ferreira, S.M. (2015). Estudo de limiares críticos de chuva deflagradores de deslizamentos no município de Sao José Dos Campos/SP (Brasil). <i>Territorium, Riscos</i> , 22:119–129. https://doi.org/10.14195/1647-7723_22_8
126	Nery, T.D. & Vieira, B.C. (2015). Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, Sao Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. <i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i> , 74:369–378. https://doi.org/10.1007/s10064-014-0622-8
127	Peraldo, H.G., Badilla, C.E., Soto, A.D., González, A.M., Herra, H.D., Ramos, G.J., Méndez, S.H., Ceciliano, C.A., Vega, A.A.E. & Laan, E. (2015). El deslizamiento de Palo Alto, Turrialba, Costa Rica: Apuntes para su estudio. <i>Revista En Torno a la Prevención</i> , 15:7–23. https://relaciger.net/revista/pdf/spa/doc1501/doc1501.htm
128	Peralta, H.G. & Badilla, C.E. (2015). El área de deslizamientos de Torito: un proceso histórico de amenaza. <i>Revista En Torno a la Prevención</i> , 14:7–21. http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10.669/74.897
129	Pinto, R.C., Passos, E. & Caneparo, S.C. (2015). Mapeamento de susceptibilidade aos movimentos de massa com uso da Avaliação Multicritério pelo método da Média Ponderada Ordenada. <i>Caderno de Geografia</i> , 25 (43):116–143. https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2015v25n43p116
130	Ramos, C.A.M., Trujillo, V.M.G. & Prada, S.L.F. (2015). Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá. <i>Obras y Proyectos</i> , 18:63–75. https://doi.org/10.4067/S0718-28132015000200006
131	Santos, J.R., Norte, F., Moreiras, S., Araneo, D. & Simonelli, S. (2015). Predicción de episodios de precipitación que ocasionan aludes en el área montañosa del noroeste de la provincia de Mendoza, Argentina. <i>GEOACTA</i> , 40 (1):65–75. http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/geoacta/article/view/5452
132	Sepúlveda, S.A., Moreiras, S.M., Lara, M. & Alfaro, A. (2015). Debris flows in the Andean ranges of central Chile and Argentina triggered by 2013 summer storms: characteristics and consequences. <i>Landslides</i> , 12:115–133. https://doi.org/10.1007/s10346-014-0539-0
133	Soto, M.J.A. & Rojas, G.N.I. (2015). Evaluación de susceptibilidad de fenómenos de remoción en masa y uso de sistemas de información geográfica. <i>Ingenio Magno</i> , 6 (2):22–38. http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/artide/view/1090
134	Aceves, Q.F., Legorreta, P.G. & Álvarez, R.Y. (2014). Cartografía geomorfológica para el inventario de procesos gravitacionales en la cuenca endorreica del arroyo La Ciénega, flanco oriental del volcán Nevado de Toluca. <i>Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana</i> , 66 (2):329–342. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-3322.2014000200009&lng=pt&nrm=iso
135	Aceves, Q.F., Legorreta, P.G. & Álvarez, R.Y. (2014). Gravitational processes on the eastern flank of the Nevado de Toluca, Mexico. <i>Zeitschrift für Geomorphologie</i> , 58 (2):185–200. https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/0117
136	Almaguer, C.Y., Rodríguez, D.M.A., del Rosario, M.M. & Aguilar, S.A.M. (2014). Evaluación de la susceptibilidad por deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. <i>Minería y Geología</i> , 30 (2):19–41. http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/779
137	Caballero, L., Sarocchi, D., Soto, E. & Borselli, L. (2014). Rheological changes induced by clast fragmentation in debris flows. <i>Journal of Geophysical Research: Earth Surface</i> , 119:1800–1817. https://doi.org/10.1002/2013JF002942
138	Carignano, C.A., Cioccale, M.A. & Martino, R.D. (2014). El megadeslizamiento del Cerro Uritorco, ladera occidental de la Sierra Chica de Córdoba. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> , 71 (1):21–32. https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/32067
139	Chaves, S.I., Duran, M.M., Tierra, H.D. & Soto, A.D. (2014). Susceptibilidad de deslizamientos del Cantón de Escazú mediante los Métodos MORA VAHRSON (1992) y las modificaciones Mora et al., (2002) y Camacho et al., (2004). <i>Revista En Torno a la Prevención</i> , 13:7–13. https://relaciger.net/revista/pdf/spa/doc1301/doc1301.htm
140	Deckart, K., Pinochet, K., Sepúlveda, S.A., Pinto, L. & Moreiras, S.M. (2014). New insights on the origin of the Mesón Alto deposit, Yeso Valley, central Chile: A composite deposit of glacial and landslide processes? <i>Andean Geology</i> , 41 (1):248–258. https://doi.org/10.5027/andgeoV41n1-a10
141	Esper, A.M.Y. (2014). Susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos, mediante SIG, en una porción del departamento de Iglesia, San Juan. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> , 71 (2):267–274. http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/raga/article/view/1266/3852
142	Esper, A.M.Y., Perucca, L.P., Rothis, M., Tapia, C. & Vargas, N. (2014). Morphometric characterization of a large scale rockslide, and probable seismogenic origin of landslides on the western flank of Central Precordillera, Argentina. <i>Quaternary International</i> , 352:92–99. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.04.058
143	Gerente, J., Luis, E.L. & Dal Santo, M.A. (2014). Utilizacão de SHALSTAB como ferramenta para o diagnóstico preliminar de susceptibilidade a deslizamentos rasos no baixo vale do rio Luís Alves-SC. <i>Ambiência</i> , 10 (1):333–350. https://doi.org/10.5935/ambiencia.2014.supl.08

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
144	Hidalgo, M.C.A. & Vega, G.J.A. (2014). Estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismos y lluvia (Valle de Aburrá-Colombia). <i>Revista EIA</i> . 11 (22):103–117. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-12372014000200009&script=sci_abstract&lng=pt
145	Lregorreta, P.G. & Lugo, H.J. (2014). Zonación de peligros por procesos gravitacionales en el flanco suroccidental del volcán Pico de Orizaba, México. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 84:20–31 https://doi.org/10.14350/ig.37004
146	Lregorreta, P.G., Bursik, M., Solene, P., Lugo, H.J., Paredes, M.L.M. & Aceves, Q.F. (2014). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. <i>Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana</i> . 66 (2):343–354. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222014000200010
147	Michel, G.P., Kobiyama, M. & Goerl, R.F. (2014). Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha river basin, southern Brazil. <i>Journal Soils and Sediments</i> . 14:1266–1277. https://doi.org/10.1007/s11368-014-0886-4
148	Muñoz, E., Martínez, C.H., Arévalo, J. & Alvira, D. (2014). Quantification of the effect of precipitation as a triggering factor for landslides on the surroundings of Medellín-Colombia. <i>DYNA</i> . 81 (187):115–121. https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.40640
149	Niño, M., Jaimes, M.A. & Reinoso, E. (2014). Seismic-event-based methodology to obtain earthquake-induced translational landslide regional hazard maps. <i>Natural Hazards</i> . 73:1697–1713. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1163-y
150	Pola, A., Macías, J.L., Garduño, M.V.H., Osorio, O.S. & Cardona, M.S. (2014). Successive collapses of the El Estribo volcanic complex in the Pátzcuaro Lake, Michoacán, Mexico. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> . 289:41–50. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.10.011
151	Rodríguez, A., Tapia, A. & Albornoz, C. (2014). Susceptibilidad de movimientos en masa en el Valle de Socoroma, precordillera andina de Arica y Parinacota. <i>Diálogo Andino</i> . 44:25–39. https://doi.org/10.4067/S0719-26812014000200004
152	Sepúlveda, S.A., Rebolledo, S., McPhee, J., Lara, M., Cartes, M., Rubio, E., Silva, D., Correia, N. & Vásquez, J.P. (2014). Catastrophic, rainfall-induced debris flows in Andean villages of Tarapacá, Atacama Desert, northern Chile. <i>Landslides</i> . 11 (3):481–491. https://doi.org/10.1007/s10346-014-0480-2
153	Viltres, M.Y. & Guardado, L.R. (2014). Evaluación y cartografiado del peligro por deslizamientos en el municipio de Moa. <i>Minería y Geología</i> . 30 (3):16–32. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223532481002
154	Antinao, J.L. & Farfán, L.M. (2013). Occurrence of landslides during the approach of tropical cyclone Juliette (2001) to Baja California Sur, Mexico. <i>Atmósfera</i> . 26 (2):183–208. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-6236201300020005&lng=en&nrm=iso
155	Barrantes, C.G., Jiménez, C.C. & Ocoñ, G.M.J. (2013). Deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona de 2009, Costa Rica. <i>Revista Geográfica de América Central</i> . 2 (51):89–100. https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/5990
156	Esper, A.M.Y. & Perucca, L.P. (2013). Mass movement in Cordón de las Osamentas, de La Flecha river basin, San Juan, Argentina. <i>Quaternary International</i> . 301:150–157. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.03.009
157	Esper, A.M.Y. (2013). Debris flow susceptibility mapping in a portion of the Andes and Preandes of San Juan, Argentina using frequency ratio and logistic regression models. <i>Earth Sciences Research Journal</i> . 17 (2):159–167. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-61902013000200011&script=sci_abstract&lng=es
158	Gomes, R.A.T., Guimaraes, R.F., Junior, O.A.C., Fernandes, N.F. & Junior, E.V.A. (2013). Combining spatial models for shallow landslides and debris-flows prediction. <i>Remote Sensing</i> . 5 (5):2219–2237. https://doi.org/10.3390/rs5052219
159	Jaimes, M.A., Niño, M. & Reinoso, E. (2013). Una aproximación para la obtención de mapas de desplazamiento traslacional de laderas a nivel regional inducido por sismos. <i>Revista de Ingeniería Sísmica</i> . 89:1–24. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2013000200001
160	Lacroix, P., Zavala, B., Berthier, E., & Audin, L. (2013). Supervised method of landslide inventory using panchromatic SPOT5 images and application to the earthquake-triggered landslides of Pisco (Peru, 2007, Mw8.0). <i>Remote Sensing</i> . 5 (6), 2590–2616. https://doi.org/10.3390/rs5062590
161	Marcano, M.A. & Cartaya, R.S. (2013). Zonificación de la amenaza por procesos de remoción en masa originados por las precipitaciones entre Camurí Chico y Punta Tigrillo, estado Vargas, Venezuela. <i>Revista de Investigación</i> . 37 (80):189–214. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376140395008
162	Obregón, C. & Lara, J. (2013). El mapa de susceptibilidad a movimientos en masa: una herramienta para la gestión sostenible del territorio. <i>Espacio y Desarrollo</i> . 25:49–64. http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/10.622
163	Protti, R. (2013). Megadeslizamiento (debris avalanche?) del flanco Norte del volcán Cacahuatip, Morazán, El Salvador. <i>Revista Geológica de América Central</i> . 49:121–127. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242013000200010

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
164	Roverato, M. & Capra, L. (2013). Características microtexturales como indicadores del transporte y emplazamiento de los depósitos de avalancha de escombros del Volcán de Colima (México). <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> . 30 (3):512–525. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742013000300004
165	Sepúlveda, S.A. & Moreiras, S.M. (2013). Large volume landslides in the central andes of Chile and Argentina (32°–34°S) and related hazards. <i>Italian Journal of Engineering Geology and Environment</i> . 6:286–294. https://doi.org/10.4408/IJEGE.2013-06.B-26
166	Silveira, T.C., Fiori, P.A., Ferreira, A.M. & Góis, J.R. (2013). Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacaré, Paraná. <i>Sociedade & Natureza</i> . Uberlândia. 25 (3):623–639. https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000300014
167	Spalletti, L.A., Veiga, G.D. & Franzese, J.R. (2013). Procesos gravitacionales-fluviales y preservación de vegetación boscosa en un área volcánica: Formación Rancahué (Oligoceno), Andes neuquinos, Argentina. <i>Andean Geology</i> . 40 (3):521–538. https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-71062013000300007&lng=pt&nrm=iso
168	Alcántara-Ayala, I., López, G.J. & Garnica, R.J. (2012). On the landslide event in 2010 in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Angangueo, Michoacán, Mexico. <i>Landslides</i> . 9:263–273. https://doi.org/10.1007/s10346-011-0291-7
169	Bartali, R., Sarocchi, D., Nahmad, M.Y. & Rodríguez, S.L.A. (2012). Estudio de flujos granulares de tipo geológico por medio del simulador multisensor GRANFLOW-SIM. <i>Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana</i> . 64 (3):265–275. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-33222012000300001&script=sci_abstract
170	Caballero, L., Sarocchi, D., Borselli, L. & Cárdenas, A.I. (2012). Particle interaction inside debris flows: Evidence through experimental data and quantitative clast shape analysis. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> . 231–232:12–23. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.04.007
171	Carlos, V.C., López, M.C. & Alcántara-Ayala, I. (2012). Mass movement processes associated with volcanic structures in Mexico City. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 79:48–74. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000300005
172	Flores, P. & Alcántara-Ayala, I. (2012). Susceptibility to shallow landslides of soil in the municipality of Temoaya, México: multicriteria analysis. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 77:31–47. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56923353004
173	Godoy, B., Clavero, J., Rojas, C. & Godoy, E. (2012). Facies volcánicas del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya, Andes Centrales. <i>Andean Geology</i> . 39 (3):394–406. https://doi.org/10.5027/andgeo39n3-a03
174	González, D.A. & Di Tommaso, I. (2012). Grandes deslizamientos en las cuencas tributarias neuquinas del curso medio del Río Barrancas (Norte del Neuquén). <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 69 (3):466–474. http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/raga/article/view/494
175	Hermanns, R. L., Valderrama Murillo, P. A., Fauqué, L. E., Penna, I. M., Sepúlveda Valenzuela, S. A., Moreiras, S. M., & Zavala Carrión, B. L. (2012). Landslides in the Andes and the need to communicate on an interandean level on landslide mapping and research. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 69 (3):321–327. https://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/raga/article/view/1824
176	Mardones, F.M. & Rojas, H.J. (2012). Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27 F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. <i>Revista de Geografía Norte Grande</i> . 53:57–74. https://doi.org/10.4067/S0718-34022012000300004
177	Mora, R. & Granados, R. (2012). Análisis de estabilidad de taludes considerando la incertidumbre de los datos: caso comunidad de mansiones de Montes de Oca, San José, Costa Rica. <i>Revista Geológica de América Central</i> . 47:133–141. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0256-70242012000200007&lng=es&nrm=iso
178	Moreiras, S.M., Lisboa, M.S. & Mastrantonio, L. (2012). The role of snow melting upon landslides in the central Argentinean Andes. <i>Earth Surface Processes and Landforms</i> . 37 (10):1106–1119. https://doi.org/10.1002/esp.3239
179	Muñiz, J.J.A. & Hernández, M.V.M. (2012). Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico. <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> . 29 (1):103–114. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1026-87742012000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
180	Oppikofer, T., Hermanns, R.L., Redfield, T.F., Sepúlveda, S.A., Duhart, P. & Bascuñan, I. (2012). Morphologic description of the Punta Cola rock avalanche and associated minor rockslides caused by the 21 April 2007 Aysén earthquake (Patagonia, Southern Chile). <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 69 (3):339–353. http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/raga/article/view/1535
181	Ortega, R. & Schneevogt, N.J. (2012). Modelaje de flujos de detritos potenciales a partir de un modelo de elevación digital SRMT (Shuttle Radar Topography Mission): cuenca alta del río Chama, noroeste de Venezuela. <i>Revista Geográfica Venezolana</i> . 53 (1):93–108. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347730388006

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
182	Porto, J.R., Pinheiro, P.B., Rocha, G.G., Schwenck, B.V. & Meirin, C.N. (2012). Caracterizaco Geológico-Geotécnica do Movimento de Massa Ocorrido entre as Praias da Prainha e Grumari, no Município do Rio de Janeiro, RJ. <i>Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ</i> . 35 (2):5–13. https://doi.org/10.11137/2012_2_05_13
183	Souza, J.M., Asevedo, L.A., Soares, I.L.P. & Bertolino, A.V.F.A. (2012). Movimentos de massa na bacia do Rio Sao Pedro, município de Nova Friburgo, associado ao evento de Janeiro de 2011. <i>ACTA Geográfica. Boa Vista. Ed. Especial Climatologia Geográfica</i> . 149–163. https://doi.org/10.5654/acta.v0i0.1101
184	Tagliaferro, M. & Singer, A. (2012). Los deslizamientos ocurridos el 20 de noviembre del 2008 en las colinas del sur de Caracas: una visión general de su impacto geotécnico. <i>Revista de la Facultad de Ingeniería. U.C.V.</i> 27 (1):31–40. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652012000100004
185	Zavala, C.B., Rosado, M. & Lu, L.S. (2012). Susceptibilidad a los movimientos en masa en la región Cajamarca, Norte de Perú y el deslizamiento de Rodeopampa del 22 de febrero del 2010. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 69 (3):407–417. http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/raga/article/view/1271/1910
186	Aristizábal, E., González, T., Montoya, J.D., Vélez, J.L., Martínez, H. & Guerra, A. (2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el valle de Aburrá, Colombia. <i>Revista EIA</i> . 15:95–111. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-12372011000100009&script=sci_abstract&tng=es
187	Barrantes, C.G., Barrantes, S.O. & Nnuez, R.O. (2011). Efectividad de la metodología Mora-Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica. <i>Revista Geográfica de América Central</i> . 2 (47):141–162. https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/3970
188	Borselli, L., Capra, L., Sarocchi, D. & De la Cruz, R.S. (2011). Flank collapse scenarios at Volcán de Colima, Mexico: A relative instability analysis. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> . 208:51–65. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.08.004
189	Caballero, L. & Capra, L. (2011). Textural analysis of particles from El Zagun debris avalanche deposit, Nevado de Toluca volcano, Mexico: Evidence of flow behavior during emplacement. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> . 200 (1):75–82. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.12.003
190	Dávila, S.M. & Jiménez, O. (2011). A geologic study of the Juan Grijalva landslide, the most important mass movement during the last century in Mexico. <i>Natural Hazards</i> . 58:183–197. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9658-7
191	Esper, A.M.Y. (2011). Inventario de procesos de remoción en masa de un sector del departamento Iglesia, San Juan. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 68 (2):225–232. http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/raga/article/view/483
192	Hernández, M.V., Mora, Ch.J. & Garduño, M.V. (2011). Large block slide at San Juan Grijalva, Northwest Chiapas, Mexico. <i>Landslides</i> . 8 (1):109–115. https://doi.org/10.1007/s10346-010-0212-1
193	Hinojosa, C.A., Rodríguez, M.V.M., Munguía, O.L. & Meilln, M.O. (2011). El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México. <i>Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana</i> . 63 (1):15–38. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94319372003
194	Kobiyama, M., Almeida, M.A., Grison, F. & Nery, G.J. (2011). Landslide influence on turbidity and total solids in Cubatao do Norte River, Santa Catarina, Brazil. <i>Natural Hazards</i> . 59:1077–1086. https://doi.org/10.1007/s11069-011-9818-4
195	Reyes, C.Y. (2011). Evaluación de la susceptibilidad del terreno por deslizamientos en el territorio de Moa. <i>Ciencia & Futuro</i> . 1 (2):1–10. https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revista_estudiantil/article/view/253
196	Roldán, Q.J., Aguirre, D.G.J. & Rodríguez, C.J.L. (2011). Depósito de avalancha de escombros del volcán Temascalcingo en el graben de Acambay, Estado de México. <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> . 28 (1):118–131. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742011000100009
197	Sánchez, G.D. (2011). Precipitaciones extremas y sus implicaciones en procesos de remoción en masa en la planificación urbana de Tampico, México. <i>Cuadernos Geográficos</i> . 48:135–159. https://revistasueg.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/583
198	Segura, G., Badilla, E. & Obando, L. (2011). Susceptibilidad al deslizamiento en el Corredor Siquirres-Turrialba. <i>Revista Geológica de América Central</i> . 45:101–121. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242011000200006
199	Sepúlveda, S.A., Nquira, V. & Arenas, M. (2011). Susceptibility of coastal landslides and related hazards in the Chilean Patagonia: The case of Hornopirn area (42°S). <i>Investigaciones Geográficas</i> . 43:35–46. https://doi.org/10.5354/0719-5370.2011.18496
200	Soares, J., Garcia, C., Inzunza, E., Hernandez, J.M., Olgun, J.E., Camargo, C., Rousseau, P., Sandoval, C. & Medina, A.G. (2011). Preliminary results of landslide characteristics due to rainfall in the city of Ensenada, Baja California, Mexico using physical modelling. <i>WIT Transactions on Ecology and the Environment</i> . 145:623–630. https://doi.org/10.2495/WRM110551
201	Stoffel, M., Bollschweiler, M., Vázquez, S.L., Franco, R.O. & Palacios, D. (2011). Dendrogeomorphic dating of rockfalls on low-latitude, high-elevation slopes: Rodadero, Iztaccíhuatl volcano, Mexico. <i>Earth Surface Processes and Landforms</i> . 36:1209–1217. https://doi.org/10.1002/esp.2146

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
202	Borja, B.R.C. & Alcántara-Ayala, I. (2010). Susceptibility to mass movement processes in the municipality of Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 73:7–21. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46,112,010,000,300,002
203	Cortés, A., Macías, J.L., Capra, L. & Garduño, M.V.H. (2010). Sector collapse of the SW flank of Volcán de Colima, México. The 3600 yr BP La Lumbre–Los Ganchos debris avalanche and associated debris flows. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> . 197 (1–4):52–66. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.11.013
204	García, R.J.M. & Malpica, J.A. (2010). Assessment of earthquake-triggered landslide susceptibility in El Salvador based on an Artificial Neuronal Network model. <i>Natural Hazards and Earth System Sciences</i> . 10:1307–1315. https://doi.org/10.5194/nhess-10-1307-2010
205	Redin, V.L. (2010). Mapeamento da susceptibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC. <i>Mercator-Revista de Geografia de UFC</i> . 9 (19):175–190. https://doi.org/10.4215/RM2010.0919.0013
206	Biedel, S.P., Gomes, R.A., Ferreira, V.M., Lopes, S.E.S. & Sturaro, J.R. (2010). Identification of landslides scars in the Region of the Serra do Mar, Sao Paulo State, Brazil, using digital image processing and spatial analysis tools. <i>GIScience & Remote Sensing</i> . 47 (4):498–513. https://doi.org/10.2747/1548-1603.47.4.498
207	Salinas, S. & López, B.J. (2010). Geomorphic assessment of the debris avalanche deposit from the Jocotitlán volcano, Central Mexico. <i>Geomorphology</i> . 123 (1–2):142–153. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.006
208	Sepúlveda, S.A., Serey, A., Lara, M., Pavez, A. & Rebolledo, S. (2010). Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia. <i>Landslides</i> . 7:483–492. https://doi.org/10.1007/s10346-010-0203-2
209	Vieira, B.C., Fernandes, N.F. & Filho, O.A. (2010). Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, Sao Paulo, Brazil. <i>Natural Hazards Earth System Sciences</i> . 10:1829–1837. https://doi.org/10.5194/nhess-10-1829-2010
210	Banchig, A.L., Moreira, S.M. & Banchig, P.N. (2009). Eventos de avalanchas y represamientos reiterados de ocurrencia prehistórica en la cuenca del río villavil, sierras de aconquija, Andalgalá, Catamarca. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 65 (4):805–814. http://www.scielo.org.ar/pbidi.unam.mx:8080/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48,222,009,000,800,018&lng=en&lng=en#
211	Fauqué, L., Hermanns, R., Hewitt, K., Rosas, M., Wilson, C., Baumann, V., Lagorio, S. & Di Tommaso, I. (2009). Megadeslizamientos de la pared sur del cerro Aconcagua y su relación con depósitos asignados a la glaciación pleistocena. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 65 (4):691–712. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48,222,009,000,800,011&lang=es
212	Fernández, D.S. (2009). Eventos de remoción en masa en la provincia de Tucumán: tipos, características y distribución. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 65 (4):748–759. https://doi.org/
213	González, D.E.F. & Folguera, A. (2009). Los deslizamientos de la cordillera neuquina al sur de los 38° S: su inducción. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 64 (4):569–585. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48,222,009,000,400,002&lang=es
214	González, D.E.F. (2009). Deslizamientos al norte de la población de Tricao Malal, noroeste del Neuquén. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 65 (3):545–550. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48,222,009,000,700,011&lang=es
215	Montiel, A.K., Montes, G.E. & Gouveia, M.E. (2009). Un ensayo de zonificación de áreas susceptibles a inestabilidad de laderas en el flanco norandino de Venezuela. <i>Revista Geográfica Venezolana</i> . 50 (1):131–155. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347,730,382,007
216	Moreiras, S.M. (2009). Análisis estadístico probabilístico de las variables que condicionan la inestabilidad de las laderas en los valles de los Ríos Las Cuevas y Mendoza. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 65 (4):780–790. https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/876
217	Perucca, L. & Esper, Y. (2009). El deslizamiento de rocas y detritos sobre el río Santa Cruz y el aluvión resultante por el colapso del dique natural, andes centrales de San Juan. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 65 (3):571–585. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48,222,009,000,800,016&lang=es
218	Salcedo, D.A. (2009). Behavior of a landslide prior to inducing a viaduct failure, Caracas-La Guaira highway, Venezuela. <i>Engineering Geology</i> . 109 (1–2):16–30. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.02.001
219	Seluchi, M.E. & Chou, S.C. (2009). Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. <i>Theoretical and Applied Climatology</i> . 98:67–77. https://doi.org/10.1007/s00704-008-0101-x
220	Suárez, A.M., Peraldo, G., Badilla, E. & Obando, L.G. (2009). Zonificación geomorfológica para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la cuenca del Río Viejo, Puriscal, Costa Rica. <i>Revista Geológica de América Central</i> . 41:55–69. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45,437,348,005
221	Zavala, B., Hermanns, R., Valderrama, P., Costa, C. & Rosado, M. (2009). Procesos geológicos e intensidad macrosísmica inqua del sismo de Pisco del 15/08/2007, Perú. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 65 (4):760–779. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48,222,009,000,800,015&lang=es
222	Alcántara-Ayala, I. & Murillo, G.F.G. (2008). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. <i>Investigaciones Geográficas</i> . 66:47–64. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46,112,008,000,200,004

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
223	Aristizábal, E. & Yokota, S. (2008). Evolución geomorfológica del Valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa. <i>Boletín de Ciencias de la Tierra</i> . 24:5–18. https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/9268
224	Aristizábal, E. (2008). Características, dinámica y causas del movimiento en masa del Barrio el Socorro (31 de mayo de 2008) en Medellín. <i>Revista EIA</i> . 10:19–29. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149212844002
225	Carreras, S.L.M. & Capra, P.L. (2008). Estudio granulométrico comparativo de los depósitos epiclásticos en ambientes volcánicos. <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> . 25 (1):97–114. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742008000100006
227	Galván, R.I.N. & Montalvo, A.J.C. (2008). The historical seismicity and prediction of ground motion in northeast Mexico. <i>Journal of South American Earth Sciences</i> . 25 (1):37–48. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.07.004
227	García, R.J.M., Malpica, J.A., Benito, B. & Díaz, M. (2008). Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. <i>Geomorphology</i> . 95 (3–4):172–191. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.001
228	Moreiras, S.M., Lenzano, M.G. & Riveros, N. (2008). Inventario de procesos de remoción en masa en el parque provincial Aconcagua, Provincia de Mendoza, Argentina. <i>Multequina</i> . 17 (2):129–146. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-732920080002000003&lang=es
229	Murcia, H.F., Hurtado, B.O., Cortés, G.P., Macías, J.L. & Cepeda, H. (2008). The ~2500 yr B.P. Chicoral non-cohesive debris flow from Cerro Machín Volcano, Colombia. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> . 171 (3–4):201–214. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.11.016
230	Penna, I.M., Hermanns, R.L. & Folguera, A. (2008). Remoción en masa y colapso catastrófico de diques naturales generados en el frente orogénico andino (36°–38°S): los casos Navarrete y río Barrancas. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 63 (2):172–180. https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/93178
231	Sepúlveda, S.A. & Padilla, C. (2008). Rain-induced debris and mudflow triggering factors assessment in the Santiago cordilleran foothills, Central Chile. <i>Natural Hazards</i> . 47:201–215. https://doi.org/10.1007/s11069-007-9210-6
232	Soares, J., García, C., Mendoza, L., Inzunza, E., Jáuregui, F. & Obregón, J. (2008). Slope instability along some sectors of the road to La Bufadora. <i>WIT Transactions on Ecology and the Environment</i> . 115. https://doi.org/10.2495/ST080321
233	Andreas, M. & Allan, A. (2007). Incorporating geology and geomorphology in land management decisions in developing countries: A case study in Southern Costa Rica. <i>Geomorphology</i> . 87 (1–2):68–89. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.043
234	Carlos, V.V., García, P.A., López, M.C. & Galván, G.A.H. (2007). Geología y procesos de remoción en masa asociados a un domo volcánico tipo couleé: cerro El Tenayo Tlalnepantla, Estado de México. <i>Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana</i> . 59 (2):183–201. https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n2a4
235	Costa, C.H. & González, D.E.F. (2007). Age constraints and paleoseismic implication of rock avalanches in the northern Patagonian Andes, Argentina. <i>Journal of South American Earth Sciences</i> . 24 (1):48–57. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.03.001
236	Guinay, M., Vilajosana, I. & Vilaplana, J.M. (2007). GIS-based debris flow source and runoff susceptibility assessment from DEM data—a case study in NW Nicaragua. <i>Natural Hazards and Earth System Sciences</i> . 7:703–716. https://doi.org/10.5194/nhess-7-703-2007
237	Hernández, M.V.M., Garduño, M. V.H. & Alcántara-Ayala, I. (2007). Estudio geológico para entender los procesos de remoción en masa en la región de Zacapoaxtla, Puebla, México. <i>Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana</i> . 59 (2):147–162. https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n2a1
238	Lacerda, W.A. (2007). Landslide initiation in saprolite and colluvium in southern Brazil: Field and laboratory observations. <i>Geomorphology</i> . 87 (3):104–119. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.03.037
239	Montiel, A.K., Gouveia, M.E. & Montes, G.E. (2007). Influencia de la intervención antrópica en la ocurrencia de procesos de ladera. Microcuenca de la Quebrada Ramos, flanco norandino venezolano. <i>Terra</i> . XXIII (34):35–69. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72103403
240	Montiel, A.K., Maldonado, B.H. & Gouveia, M.E.L. (2007). Amenaza por inestabilidad de las laderas en la cuenca del río Mocoy. <i>Andes Venezolanos. Espacio y Desarrollo</i> . 19:119–134. http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espaciodesarrollo/article/view/10639
241	Ochoa, T.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. <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> . 24 (3):354–367. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1026-87742007000300006&lng=es&nrm=iso&lng=es
242	Roa, J.G. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocoties, estado Mérida-Venezuela. <i>Revista Geográfica Venezolana</i> . 48 (2):183–219. http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/24702/articulo2.pdf?sequence=2&isAllowed=y
243	Abascal, V.L. & González, B.G. (2006). Kinematics of a translational/rotational landslide, Central Andes, Northwestern Argentina. <i>Environmental & Engineering Geoscience</i> . XII (4):369–376. https://doi.org/10.2113/gseegi.12.4.369

(Continued)

Table A1. (Continued).

No	Reference
244	Almaguer, C.Y. & Guardado, L.R. (2006). Tipología de movimientos de masas desarrollados en el territorio de Moa, Cuba. <i>Minería y Geología</i> . 22 (1):1–16. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223,517,653,001
245	Capra, L., Lugo, H.J. & Zamorano, O.J.J. (2006). La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de Totomoxtlá, Sierra Norte de Puebla, México. <i>Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana</i> . LVIII (2):205–214. https://doi.org/10.18268/BSGM2006v58n2a3
246	Coelho, N.A.L., Avelar, A.S., Fernandes, M.C. & Lacerda, W.A. (2006). Landslide susceptibility in a mountainous geocosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The role of morphometric subdivision of the terrain. <i>Geomorphology</i> . 87 (3):120–131. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.03.041
247	García, P.A., Carlos, V.V., López, M.C., Galván, G.A. & Concha, D.A. (2006). Landslide inventory map of Sierra de Guadalupe, north of the México Basin. <i>Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana</i> . LVIII (2):195–204. https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n2a2
248	González, D.E.F. & Folguera, A. (2006). La avalancha de rocas de Pilun Challa: ratificación de una única glaciación en la región de Caviahué-Copahue y sus adyacencias (Neuquén). <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 61 (1):19–30. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-4822,2006,000,100,002&lang=es
249	González, D.E.F., Folguera, A., Costa, C.H., Wright, E. & Ellisondo, M. (2006). Los grandes deslizamientos de la región septentrional neuquina entre los 36°-38°S: una propuesta de inducción sísmica. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 61 (2):197–217. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-4822,2006,000,002,000,005&lang=es
250	Montiel, K. & Seco, R. (2006). Niveles de peligro de inestabilidad de las laderas de un sector del flanco norandino venezolano: Monte Camelo, Estado de Trujillo. <i>Espacio y Desarrollo</i> . 18:30–48. http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espaciodesarrollo/article/view/11,365
251	Moreiras, S.M. (2006). Chronology of a probable neotectonic Pleistocene rock avalanche, Cordon del Plata (Central Andes), Mendoza, Argentina. <i>Quaternary International</i> . 148 (1):138–148. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.11.009
252	Moreno, H.A., Vélez, M.V., Montoya, J.D. & Rhenals, R.L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. <i>Revista EIA</i> . 5:59–69. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-1237,2006,000,100,005
253	Pola, V.A., Garduño, M.V.H., Díaz, S.C., Hernández, M.V.M. (2006). Estudio geotécnico y análisis de los problemas de remoción en masa y obras de mitigación del Parque Francisco Zarco (Ocosulem), Morelia (Michoacán, México). <i>Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana</i> . LVIII (2):183–193. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94,320,213,003
254	Saboya, Jr.F., Alves, M.G. & Pinto, W.D. (2006). Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic. <i>Engineering Geology</i> . 86 (4):211–224. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.05.001
255	Sepúlveda, S.A., Rebolledo, S. & Vargas, G. (2006). Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. <i>Quaternary International</i> . 158 (1):83–95. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.031
256	Strieder, A.J., Buffon, S.A., Quadros, T.F.P. & Oliveira, H.R. (2006). Predicting favourable areas for landsliding through GIS modelling in Aparados da Serra (Brazil). <i>WIT Transactions on Ecology and Environment</i> . 89. https://doi.org/10.2495/GEO060461
257	Fernández, D.S. (2005). The giant paleolandslide deposits of Tafí del Valle, Tucumán Province, Argentina. <i>Geomorphology</i> . 70 (1–2):97–111. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.04.003
258	González, D.E.F. & Folguera, A. (2005). El reconocimiento de avalanchas de rocas y deslizamientos de bloques rocosos prehistóricos en el área andina de Neuquén (37°15'–37°30'S). <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 60 (3):446–460. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-4822,2005,000,300,002&lang=es
259	González, D.E.F., Folguera, A. & Hermanns, R. (2005). La avalancha de rocas del cerro Los Cardos (37°10'S, 70°53'O) en la región norte de la provincia del Neuquén. <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> . 60 (1):207–220. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-4822,2005,000,100,019&lang=es
260	Guinau, M., Pallas, R. & Vilaplana, J.M. (2005). A feasible methodology for landslide susceptibility assessment in developing countries: A case-study of NW Nicaragua after Hurricane Mitch. <i>Engineering Geology</i> . 80 (3–4):316–327. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.07.001
261	Lozano, P. & Bussmann, R. (2005). Importancia de los deslizamientos en el Parque Nacional Podocarpus, Loja, Ecuador. <i>Revista Peruana de Biología</i> . 12 (2):195–202. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-9933,2005,000,200,005
262	Lugo, H.J., Zamorano, O.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: causa y efectos. <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> . 22 (2):212–228. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1026-8774,2005,000,200,212&lang=es&nrm=iso
263	Moreiras, S.M. (2005). Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina. <i>Geomorphology</i> . 66 (1–4):345–357. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.019


(Continued)



Table A1. (Continued).


No	Reference
264	Rodríguez, S.R. (2005). Geology of Las Cumbres Volcanic Complex, Puebla and Veracruz states, Mexico. <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> , 22 (2):181–199. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742005000200181
265	Alcantara-Ayala, I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. <i>Geomorphology</i> , 61 (1–2):19–40. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.11.004
266	Clavero, J.E., Sparks, R.S.J., Polanco, E. & Pirngie, M.S. (2004). Evolution of Paríacota volcano, Central Andes, Northern Chile. <i>Revista Geológica de Chile</i> , 31 (2):317–347. https://doi.org/10.4067/S0716-02082004000200009
267	Moreiras, S.M. (2004). Landslide incidence zonation in the Río Mendoza valley, Mendoza province, Argentina. <i>Earth Surface Processes and Landforms</i> , 29:255–266. https://doi.org/10.1002/esp.1056
268	Pallas, R., Vileplana, J.M., Guirau, M., Falgas, E., Alenamy, X. & Muñoz, A. (2004). A pragmatic approach to debris flow hazard mapping in areas affected by Hurricane Mitch: example from NW Nicaragua. <i>Engineering Geology</i> , 72 (1–2):57–72. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.06.002
269	Suter, M. (2004). A neotectonics geomorphologic investigation of the prehistoric rock avalanche damming Laguna de Meztitlán (Hidalgo State, east-central Mexico). <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> , 21 (3):397–411. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57221307
270	Vieta, B.C. & Fernandes, N.F. (2004). Landslides in Rio de Janeiro: The role played by variations in soil hydraulic conductivity. <i>Hydrological Processes</i> , 18:791–805. https://doi.org/10.1002/hyp.1363
271	Ahrendt, A. & Zucquete, L.V. (2003). Triggering factors of Landslides in Campos do Jordao city, Brazil. <i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i> , 62:231–244. https://doi.org/10.1007/s10064-003-0191-8
272	Capra, L., Lugo, H.L. & Davila, H.N. (2003). Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez. <i>Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento</i> . <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> , 20 (2):95–106. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57220201
273	González, D.E.F., Costa, C.H. & Giacardi, A.D. (2003). El complejo deslizamiento de Alifonso-Cerro Papas-Las Olletas (Departamento Minas, norte del Neaquetán, Argentina). <i>Revista de la Asociación Geológica Argentina</i> , 58 (2):194–200. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-4822200300020005&lang=es
274	Wilcke, W., Valladares, H., Stoyan, R., Yasin, S., Valarezo, C. & Zech, W. (2003). Soil properties on a chronosequence of landslides in montane rain forest, Ecuador. <i>Catena</i> , 53 (1):79–95. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00196-0
275	Arreguay, R.E., Garduño, M.V.H., Canuti, P., Casadile, N., Lotfi, A. & Chiesa, S. (2002). Análisis geomecánico de la inestabilidad del escape La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. <i>Revista Mexicana de Ciencias Geológicas</i> , 19 (2):91–106. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=572219202
276	Capra, L. & Macías, J.L. (2002). The cohesive Naranjo debris-flow deposit (10 km ³): A dam breakout flow derived from the Pleistocene debris-avalanche deposit of Nevado de Colima Volcano (México). <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> , 117 (3):213–235. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00245-7
277	Dias, F.P. & Herrmann, M.L.P. (2002). Susceptibilidade a deslizamentos: estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis-SC. <i>Caminhos de Geografia</i> , 3 (6):57–73. http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/artic/view/15295
278	Hores, L.P. & Alcantara-Ayala, I. (2002). Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Tetzuhán, Puebla. <i>Investigaciones Geográficas</i> , 49:7–26. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112002000300002
279	De la Cruz, R.S. & Reyes, D.G.A. (2001). A model to describe precursory material-failure phenomena: applications to short-term forecasting at Colima volcano, Mexico. <i>Bulletin of Volcanology</i> , 63:297–308. https://doi.org/10.1007/s004450100152
280	Gaziev, E.G. (2001). Stability analysis of the rock slope in the Zimapan Arch Dam Reservoir, Mexico. <i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i> , 60:135–137. https://doi.org/10.1007/s100640000095
281	Alcantara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. <i>Investigaciones Geográficas</i> , 41:7–25. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-461120000001000002&lang=es&lang=es
282	Capra, L. & Macías, J.L. (2000). Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca Volcano, central Mexico. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> , 102 (1–2):149–167. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00186-4
283	Vargas, G., Ortlieb, L. & Rufflant, J. (2000). Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos: El Niño/Oscilación del Sur. <i>Revista Geológica de Chile</i> , 27 (2):157–176. https://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082000000200002


Capítulo II. Inventario multitemporal de procesos de remoción en masa, análisis de una montaña intertropical en el Centro-Oeste de México-Bases para la gestión del peligro

Multitemporal landslide inventory analysis of an intertropical mountain in west-central Mexico — Basis for hazard management

Alejandro César VALDÉS CARRERA¹  <https://orcid.org/0000-0002-9480-9331>; e-mail: avaldes@pmip.unam.mx

Manuel E. MENDOZA^{1*}  <https://orcid.org/0000-0003-1310-9702>;  e-mail: mmendoza@ciga.unam.mx

Teodoro CARLÓN ALLENDE²  <https://orcid.org/0000-0002-0080-6114>; e-mail: tearlon@igeofisica.unam.mx

José Luis MACÍAS³  <https://orcid.org/0000-0002-2494-9849>; e-mail: jlmacias@igeofisica.unam.mx

* Corresponding author

¹ Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia 58190, México

² Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Instituto de Geofísica-Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia 58190, México

³ Instituto de Geofísica-Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia 58190, México

Citation: Valdés Carrera AC, Mendoza ME, Carlón Allende T, Macías JL (2022) Multitemporal landslide inventory analysis of an intertropical mountain in west-central Mexico — Basis for hazard management. *Journal of Mountain Science* 19(6). <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7223-3>

© Science Press, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2022

Abstract: Landslides in intertropical mountainous areas of Mexico are a natural hazard that could potentially generate a disaster. Despite this, many areas lack landslide inventories, making it difficult to monitor and efficiently manage the associated risks for local populations. For this reason, the aim of this research was to undertake a multitemporal landslide inventory and analyze its conditioning factors in the Pico de Tancitaro stratovolcano, which, in recent decades, has presented several high-risk geomorphological events with disastrous consequences for nearby localities. The spatial distribution of landslides and its conditioning factors were mapped at a 1:50,000 scale for the 1995-2020 period, through visual interpretation of orthophotos and satellite images (Landsat, SPOT, and SENTINEL). The conditioning factors that link the most to landslides were Quaternary andesite and basaltic andesite rocks; volcanic cones, mountain river valleys, and very steep to steep slopes (30° to >45°), oriented to the South, North, and East; Andosols and Leptosols; and the oyamel fir and mixed forests. 505 landslide

events classified into slides and flows that occurred in 1995, 2004, 2010, and 2015 were identified. New scars generated by the reactivation of landslide processes were also observed. The landslides in the study area were triggered by torrential rains caused by hurricanes and tropical storms; such as hurricanes Alex and Patricia. The inventory and analysis of conditioning factors highlighted the distribution and dynamics of slides and flows in the study area. In addition, the most important factors for studies of landslide susceptibility, hazards, and risks in the Pico de Tancitaro stratovolcano were identified, contributing to the management of geomorphological risks in intertropical mountain areas.

Keywords: Geomorphology; Mass wasting; Natural hazards; Pico de Tancitaro stratovolcano; Risk management

1 Introduction

Landslides are frequent slope processes that occur in intertropical mountains (Slaymaker and Embleton 2018). They represent a natural hazard that

Received: 13-Nov-2021
Revised: 29-Mar-2022
Accepted: 30-May-2022

can be described in function of their conditioning and triggering factors (Van Westen et al. 2008). Conditioning factors are the static environmental factors that determinate or control the spatial landslide occurrence probability and are usually represented by geology, soil types, geomorphology, morphography, hydrology, land cover, and land use (Van Westen et al. 2008; Valdés et al. 2021). Most of them are triggered by intense precipitation, earthquakes, volcanism, and land-use changes and have a strong impact on the local inhabitants because intertropical zones concentrate the highest global population density (Huddleston et al. 2003; Slaymaker and Embleton 2018; Terzi et al. 2019; Arce et al. 2019).

Knowing the spatial distribution of landslides is instrumental for adequate risk assessment and management (Solís et al. 2019), which requires identifying and classifying landslide events in their spatiotemporal context (Alcántara-Ayala and Murillo 2008). Landslide inventory maps have proven their worth in defining the extension, distribution, typology, patterns, and recurrence of landslides, as well as providing statistical databases for evaluating the susceptibility, hazards, exposure, vulnerability, and risk from landslides (Schuster 1996; Guzzetti et al. 1999; Guzzetti et al. 2012; Petley 2012; UNDRR 2019; De la Peña et al. 2021). Generating inventory maps involves the use of several techniques and spatial analysis tools, which are selected depending on the inventory goal, the extent of the area of interest, the scale of base cartography, the analysis scale, the spatial resolution, the characteristics of inputs used (satellite images, aerial photographs, orthophotos), the availability of research resources, and the skill and experience of the participating researchers (van Westen et al. 2006; Guzzetti et al. 2012).

The conventional techniques applied to obtain inventory maps have included geomorphological mapping (Moreiras et al. 2008), aerial photo interpretation (Harp et al. 2002; Moreiras 2004), the compilation of historical information (Glade et al. 2001; Alcántara-Ayala and Murillo 2008) or all of them (Sánchez-Núñez et al. 2015; Fiorillo et al. 2019). Inventory maps have also been generated through the morphological analysis of high-resolution digital elevation models (DEM) (Alcántara-Ayala 2004; Antinao and Farfán 2013; Murillo and Alcántara-Ayala 2017), the visual and multispectral analysis of satellite images aided by the Global Positioning

System (GPS), laser imaging detection and ranging (LIDAR), digital photogrammetry, Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (DinSAR) and Geographical Information Systems (GIS) (Soares et al. 2008; Guzzetti et al. 2012; González et al. 2014; Golovko et al. 2015; Salinas et al. 2018; Liu et al. 2019; Solís et al. 2019; Fernández et al. 2021). In recent years, deep learning (DL) methods like U-Net and ResU-Net; and other approaches like object-based image analysis (OBIA) have proven their efficiency for automatic and semiautomatic landslide mapping (Höbling et al. 2020; Qi et al. 2020; Ghorbanzadeh et al. 2021).

The Mexican intertropical mountain zones are geomorphologically active and frequently present landslide events (Enríquez et al. 2010; Zepeda and González 2014; Franco et al. 2018). These landslides may be triggered by intense precipitation (extreme events coming from the Pacific Ocean and the Gulf of Mexico), earthquakes, and volcanic failures that have a negative impact on the population and generate large economic losses (Ferrari 2000; Macías 2005; Legorreta et al. 2014; Aceves et al. 2016). In Mexico, landslide inventory maps have identified susceptible areas, hazardous zones, triggering factors and risk management (Flores and Alcántara-Ayala 2012; Pola et al. 2014; Salinas et al. 2018; De la Peña et al. 2019; Solís et al. 2019). Aerial photo interpretation, fieldwork, and spatial analysis in GIS have been the main techniques applied (García et al. 2006; Alcántara-Ayala 2008; Salinas and López 2010; Ramos et al. 2018; Gómez-Castillo et al. 2020).

The National Center for Prevention of Disasters (CENAPRED (the Spanish acronym)) has promoted studies of landslides in Mexico with the construction of risk maps (Atlas in Spanish) from municipal to national scales (Guevara et al. 2014). Enríquez et al. (2010) stated that the damage reduction and risks associated with landslides require performing spatiotemporal, prevention, and mitigation studies. Such studies may prevent the occurrence of disasters caused by landslides in vulnerable and difficult access areas (Zepeda and González 2014; Solís et al. 2019). The state of Michoacán is frequently affected by tropical cyclones that cause intense precipitation and soil saturation, which trigger landslides and floods, resulting in a recurring impact on human settlements and transportation infrastructure (CEPCM 2020). The rainfall produced by Tropical Storm Manuel (2010), Hurricane Ingrid (2013), and Hurricane

Figura 1. Hypsometric map of the study area in the national, state Trans-mexican volcanic belt and Michoacán-Guanajuato field context

Patricia (2015) triggered the most destructive accumulation of rainfall events that has ever occurred in Michoacán (Alcántara-Ayala et al. 2012; CEPCM 2020).

The Pico de Tancitaro stratovolcano, located in Michoacán, is also frequently affected by cyclonic rainfall events commonly present from May to October (Fuentes et al. 2004). Such events have affected the population, roads, and the agricultural and forest areas in the region. For example, in October 2015, Hurricane Patricia caused landslides on highways and floods in the localities of Peribán and Tancitaro (Magaña 2015). Furthermore, in September 2018, the tropical depression DT19E caused the overflowing of the Cutio River which resulted in the loss of human life and material assets in Peribán (Arrieta 2018; SMN 2021a). The damage caused by these rainfalls highlighted the urgent need to produce the first multitemporal landslide inventory map of the Pico de Tancitaro stratovolcano based on two main aims: 1) the evaluation of landslide conditioning factors, and 2) the analysis of the spatiotemporal landslide distribution. The results yield new insights on the frequency and magnitude of landslide events in

the region.

2 Materials and Methods

2.1 Study area

The study area belongs to the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB) physiographic province (Fig. 1). This province is an active continental volcanic arc formed by Tertiary and Quaternary rocks, and is characterized by the presence of over 8,500 volcanic structures derived from the subduction of the Cocos and Rivera Plates beneath the North American Plate (Ferrari et al. 2012; Osorio et al. 2018; Macías and Arce 2019). The study area is located at the intersection of two geological regions; 1) The Tarasco Corridor, which contains the most recent (2.7 Ma) monogenetic volcanoes –including the Parícutin volcano (1943-1952 AC); and 2) The Zamora volcanic region, represented by shield volcanoes and stratovolcanoes that had experienced explosive activity. Furthermore, it is influenced by fractures derived from the interaction of Chapala-Oaxaca fault

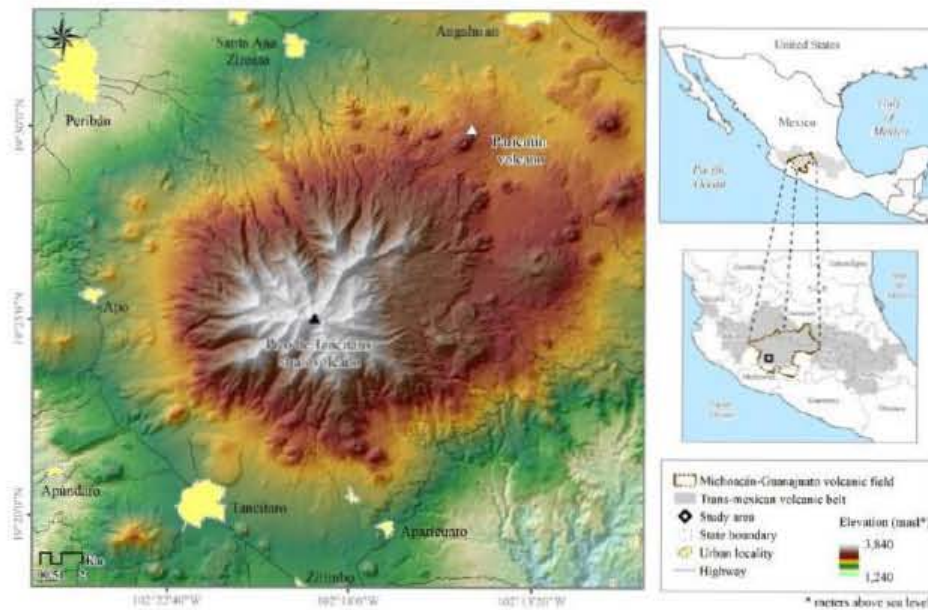


Fig. 1 Hypsometric map of the study area in the national, state, Trans-mexican volcanic belt and Michoacán-Guanajuato field context.

system and the NE-SW Tarasco Corridor structures (Morelli et al. 2010; Ownby et al. 2011; Ferrari et al. 2012; Pinzón et al. 2017). Within the TMVB, several volcanic fields occurred: Ceboruco-San Pedro Graben, The Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (MGVF), Chichinautzin Volcanic Field, The Apan-Tezontepec Volcanic Field, Serdan Oriental Volcanic Field, The Xalapa Monogenetic Volcanic Field, and The Tuxtla Volcanic Field. The study area is also part of the MGVF, that is made up of cinder cones, shield volcanoes, stratovolcanoes, lava domes, maars and fissural lava flows (Hasenaka and Carmichel 1985; Hasenaka 1994; Morelli et al. 2010; Di Traglia et al. 2014).

The study area is located in the western part of the state of Michoacan. The area falls between the coordinates 102°10'12.36" and 102°26'26.49" western longitude, and 19°33'01.49" and 19°18'06.02" northern latitude. It covers a surface of 782 km² and includes the Pico de Tancitaro stratovolcano –the highest mountain in the state of Michoacan that reaches 3,840 m above sea level (hereafter all elevations are given in meters above sea level). In addition to the Pico de Tancitaro stratovolcano, other landforms occur such as cones, domes, lava flows, tablelands, piedmonts, slopes, and summits, on which Andosols, Regosols, Luvisols, Leptosols, and Cambisols develop (INEGI 1983). The drainage patterns are radial-dendritic, and sub-dendritic (sub-parallel), with a stream order above five. Elongate and oblong sub-basins are predominant. The radial drainage pattern is present in volcanic cones and non-structured patterns are present in lava flows (Fuentes et al. 2004).

There are several climate types in the study area that from the summit to the piedmont are the following: semi-cold and subhumid C (w) (>3,000 m), subhumid with summer precipitation C (w_s) (2,000 to 3,000 m), semi-warm subhumid with summer precipitation (A)C(w_s) (1,600 a 2,000 m), and warm subhumid with summer precipitation Aw_s (1,600 to 2,000 m) (García 2004). Based on the edaphic climatic conditions, the plant communities are differentiated into mountain pine forest (*Pinus hartwegii*), mountain grassland (*Muhlenbergia macroura*), scrub (*Juniperus monticola*), oyamel fir forest (*Abies religiosa*), mixed forest (*Quercus laurina*, *Pinus pseudostrobus*, *P. leophylla*, *P. montezumae*, *Alnus jorullensis*), and cloud forest (*Alnus jorullensis*, *Bromeliaceae*) (Medina et al. 2020).

Because of its landscape and hydrological

characteristics, a portion of the study area is protected under the category of flora and fauna protection area (APFF Pico de Tancitaro) which is the largest natural protected area in the state (23,405 ha). This area is very important because of its location, biodiversity, and provision of environmental services. Finally, the territory is administrated by Nuevo San Juan Parangaricutiro, Uruapan, Peribán, and Tancitaro municipalities, that concentrate a total population of 440,609 inhabitants, mainly dedicated to avocado cultivation and lumber production (Carlón et al. 2021; Borrego and Carlón 2021; INEGI 2021).

2.2 Landslide conditioning factors

Landslide conditioning factors were chosen based on the Highland and Bobrowsky (2008) and van Westen et al. (2008) landslide susceptibility, hazard, and risk assessment method. The selected factors were geological (lithology and structures), geomorphological (landform, slope, and aspect), edaphological (soil groups), and related to land cover and land use (vegetation cover and land use), which were analyzed at a 1:50,000 scale. The geological map was compiled based on cartographic sources and scientific publications (Table 1). The geomorphological database was generated through visual interpretation following the criteria for the geomorphological survey (Gares et al. 1994; Peña 1997; Gutiérrez 2008) using the topographic map and its derived products (DEM, hillshade, slope, and aspect). The geomorphological map was classified using the hierarchical terrain system by Bocco et al. (2001) and Zinck (2013). Soil type distribution was updated according to the World Reference Base (IUSSWG 2015) and detailed based on the geopedological criteria of Zinck et al. (2016). Land cover and land use were interpreted using satellite images (Table 1). Maps and georeferenced data were analyzed in the ArcGis 10.6 GIS platform. The generated maps were validated in the field through sampling and transects, as well as information from scientific papers.

2.3 Multitemporal landslide inventory

The multitemporal landslide inventory was based on the assumption that landslide occurrence modifies the terrain surface, leaving a distinctive mark (scar) on the topography (Pike 1988), with a typology that will depend on morphology, inclination, and position

Tabla 1. Inputs used to generate the landslide conditioning factors, variables and the landslide inventory

(Dikau et al. 1996). These characteristics are recognizable through fieldwork, visual examination of satellite images and aerial photographs, or by the interpretation of DEM and its derived products (hillshade, slope, and aspect maps) (van Westen et al. 2006; Guzzetti et al. 2012). The multitemporal landslide inventory was made by the visual interpretation of digital orthophotos and satellite images at a scale of 1:50,000 that covered the years 1995 to 2020 (Table 1).

The landslides were described using the classification system of Cruden and Varnes (1996) updated by Hungr et al. (2014). Once landslides were mapped, the resulting map was verified and validated during fieldwork, which allowed the identification of the type of process and materials (Table 2.) After that, the landslide occurrence was extracted from satellite images or digital orthophotos as suggested by Guzzetti et al. (2012). Finally, landslide velocity was inferred following Hungr et al. (2014) that considered a velocity of reference for each landslide type (Table 2).

3 Results

3.1 Landslide conditioning factors

The oldest landslide conditioning factors are lithology, structures, and landforms. The rocks exposed in the study area are of Quaternary age. The

compiled geologic map (Fig. 2) shows three andesitic and basaltic-andesitic lithological units (z, aa, ab) of Lower Pleistocene age (2.59 Ma-780 ka). One of these units represents the basal rocks of the Pico de Tancitaro stratovolcano (793 ± 22 ka). During the Middle Pleistocene (780 ka-127 ka) the largest number of units (k-y) with rocks of predominantly andesitic composition were emplaced. Two units (m and n) represent the youngest rocks associated to the Pico de Tancitaro. The map contains four Upper Pleistocene (127 ka-10 ka) units of andesitic and basaltic-andesitic composition (g-j). The youngest units are Holocene (10 ka to the present) that consist of andesitic and basaltic-andesitic rocks, and include the Parícutín volcano (1943-1952 AC) (Fig. 2, Table 3). It is worth mentioning that two debris avalanche deposits occurred on the western and southeastern parts of Pico de Tancitaro. These flank collapses occurred during the Middle Pleistocene around 694-571 ka, and 261-238 ka, respectively. All these units are affected by faults and fractures that follow two main directions, NE-SW and SE-NW. Andesitic and basaltic-andesitic cinder cones and domes are the predominant volcanic apparatus (Fig. 2).

According to the evolution of its Morphogenetic Environment (TMVB), the study area was divided into six geomorphic landscapes: Mountain, High Hill, Low Hill, Piedmont, Plain, and Valley. Each landscape has its own stability conditions depending on its relief or

Table 1 Inputs used to generate the landslide conditioning factors, variables and the landslide inventory

Factor/Theme	Inputs	Scale/Resolution	Source
Geology	Geological and morphometric study	1:50,000	Scattolin (1996)
	Geological mapping and paleomagnetic ¹⁴ C dating	1:50,000	Larrea et al. (2019)
	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar geochronology	Regional	Ownby et al. (2007)
	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar geochronology	Regional	Ownby et al. (2011)
	Geological and historical review	1:50,000	Gómez-Vasconcelos (2018)
	Geological maps E13B28, E13B29, E13B38	1:50,000	INEGI (1978 1984 1985)
	Geological-mining map Colima E13-3	1:250,000	SGM (1999)
Geomorphology	Geological vectorial data set E13-3	1:250,000	INEGI (1989)
	Contour lines E13B28, E13B29, E13B38, E13B39	1:50,000	INEGI (2013 2014)
	Digital elevation model (DEM)	10 m × 10 m	Generated from contour line map
	Hillshade map	10 m × 10 m	Generated from DEM
Edaphology	Slope map	10 m × 10 m	Generated from DEM
	Aspect map	10 m × 10 m	Generated from DEM
Land cover and land use	Soil maps E13B28, E13B29, E13B38, E13B39	1:50,000	INEGI (1983)
	SENTINEL-2 satellite images	10 m × 10 m	COAH (2020)
Multitemporal inventory (1995-2020)	Digital orthophotos (1995)	2 m × 2 m	INEGI (1995)
	Landsat-5 satellite images (2004-2007)	30 m × 30 m	Google Earth Pro ©
	Landsat-7 satellite images (2004-2020)	30 m × 30 m	Google Earth Pro ©
	SPOT 5, 6, and 7 satellite images (2016-2019)	2.5 m × 2.5 m 1.5 m × 1.5 m	SIAP (2016)
	SENTINEL-2 satellite images (2020)	10 m × 10 m	COAH (2020)

Tabla 2. Classification criteria for inventoried landslides
 Tabla 3. Unit description in the geological map of the study area

modeling. Piedmont is by far the most extensive unit (382 km²). It surrounds the stratovolcano connecting the High Hills and Low Hills with the Plain and Valley landscapes. Based on the relative altitude, the piedmont is differentiated into upper and lower, and, according to its dissection degree, into slightly and moderate to strongly dissected. It also includes fluvial

valleys. The Mountain landscape is represented by the Pico de Tancitaro stratovolcano and it is the second most extensive (133 km²) landscape. It is divided into dome and irregular summits glacial and fluvial valleys, very steep to steep and moderate to gentle slopes, as well as terraces (Fig. 3).

Table 2 Classification criteria for inventoried landslides (Cruden and Varnes (1996), and Hungr et al. (2014))

Type	Definition	Material	Velocity
Flow	It is a spatially continuous movement in which shear surfaces are short-lived, closely spaced, and usually not preserved. The distribution of velocities in the displacing mass resembles that of a viscous liquid. The lower boundary of the displaced mass may be a surface along which appreciable differential movement, or a thick zone of distributed shear has taken place. Thus, there is a gradation from slides to flows depending on water content, mobility, and evolution of the movement.	Debris	ER to VR
		Earth	ER to VR
Slide	It is a downslope movement of a soil or rock mass occurring mainly on surfaces of rupture or on relatively thin zones of intense shear strain. Movement does not initially occur simultaneously over the whole of what eventually becomes the surface of rupture; the volume of displacing material enlarges from an area of local failure. It could be rotational and translational. Rotational slides move along a surface of rupture that is concave. In translational slides the mass displaces along a planar or undulating surface of rupture, sliding out over the original ground surface.	Debris	ER
		Earth	R

ER: Extremely Rapid (5 m/s), VR: Very Rapid (3 m/min), R: Rapid (1.8 m/h)

Table 3 Unit description in the geological map of the study area

Key	Unit	Type of volcano	Material	Chemical composition	Age	References
a	Parícutin	CC, L	Lavas	A, AB	1943 - 1952 AC	1,2
b	Astillero-Pedregal	CC, L	Lavas	A, AB	500 - 700 AC	4
c	Tecolote	CC, L	Lavas	A, AB	389 +/- 30 AC	4
d	Estiladero	CC	Lavas	A	7 +/- 70 ka	2
e	Chical-Tepamal	CC, L	Lavas	AB	8 +/- 49 ka	2
f	Angahuan-Peribán	L	Lavas	A	< 10 ka	5,6
g	Costillón-Chupadero	CC, L	Lavas	AB	24 +/- 22 ka	2
h	Parío	CC, L	Lavas	A	< 47 ka	2
i	Cerro Prieto	CC	Lavas	A	< 70 ka	2
j	Llano Teruto-Perita	L	Lavas	AB	< 76 ka	2
k	Parambén	CC	Bomb	AB	224 +/- 32 ka	2
l	Ciricuti	L	Lavas	AB	230 +/- 68 ka	2
m	Pico de Tancitaro C	D, L	Lavas	A	237 +/- 34 ka	3
n	Pico de Tancitaro B	SV	Lavas	A	239 +/- 22 ka	3
ñ	Guanimba	D	Cinder	A	256 +/- 18 ka	3
o	Coreuvi-Tanaco	L	Block	A	261 - 203 ka	3
p	SE debris avalanche	NA	Debris	A	261 - 238 ka	3
q	Cerro Grande	CC	Lavas	A	269 +/- 22 ka	3
r	Alberca-Chimenea	L	Flow band	A	298 +/- 29 ka	3
s	Tizcato	L	Block	A	305 +/- 18 ka	3
t	Zacándaro	D	Block	A	309 +/- 62 ka	3
u	Tancitaro-Zirimbo	CC, L	Cinder	A	339 +/- 23 ka	3
v	Cuesta-Cerro de San Miguel	CC, L	Lavas	A	374 +/- 31 ka	2
w	Apo-Apúndaro	CC, L	Lavas	A	439 +/- 29 ka	3
x	W debris avalanche	NA	Debris	A	694 - 571 ka	3
y	Copícuaro	L	Lavas	A	736 +/- 212 ka	2
z	Pico de Tancitaro A	L	Block	A	793 +/- 22 ka	3
aa	Agua nueva-Agua de Chepe	CC, L	Lavas	A, AB	< 1.2 Ma	2
ab	Zindio-Huanondio	CC, E, L	Lavas	A, AB	< 1.68 Ma	5, 6, 7, 8

Notes: CC: Cinder cone, L: Lavas, D: Dome, SV: Stratovolcano, E: Shield; NA: Not applicable; A: Andesitic, AB: Basaltic andesitic; 1: Gómez-Vasconcelos (2018), 2: Ownby et al. (2011), 3: Ownby et al. (2007), 4: Larrea et al. (2019), 5: Scattolin (1996), 6: SGM (1999), 7: INEGI (1978 1984 1985), 8: INEGI (1989).

Figura 2. Compiled geological map and the structural components in the study area

J. Mt. Sci. (2022) 19(6): 1650-1669

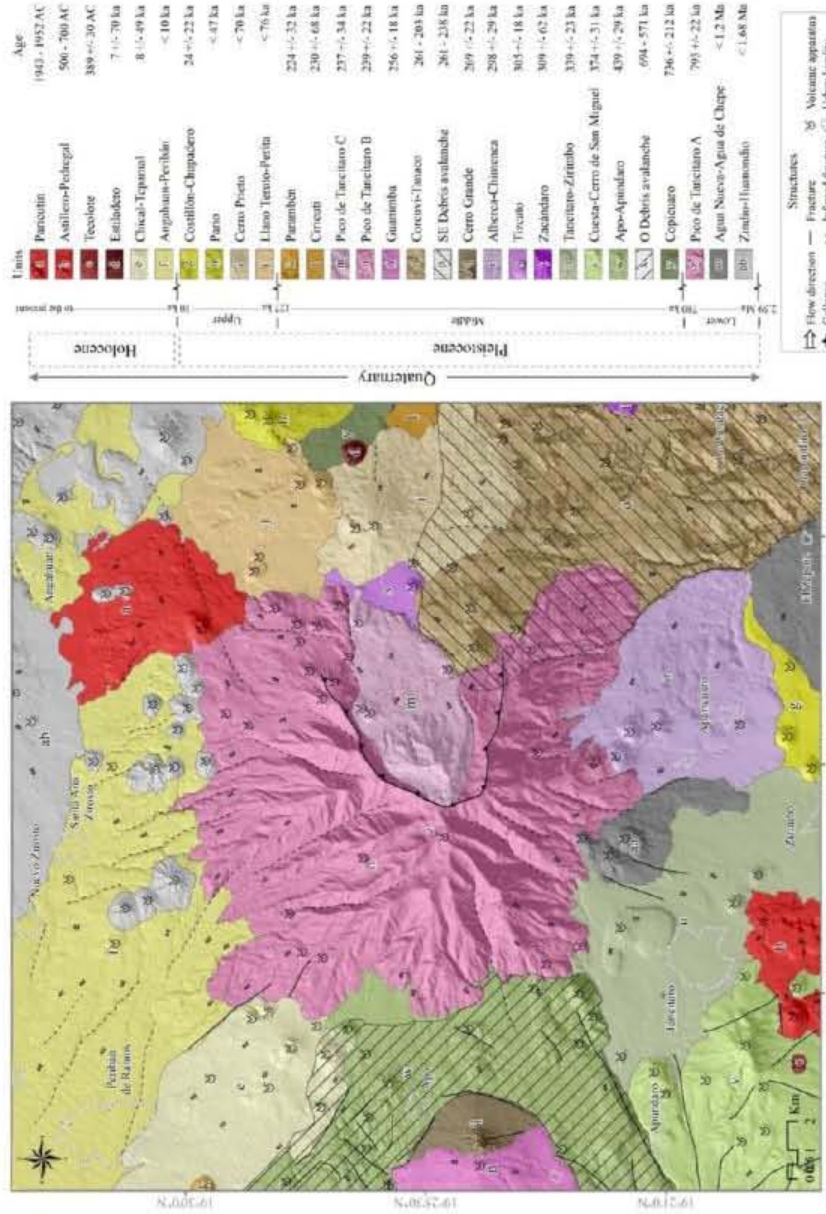


Fig. 2 Compiled geological map and the structural components in the study area (References, see Table 1).

Figura 3. Relief/modelling units that conform the Geomorphic landscapes units in the study area

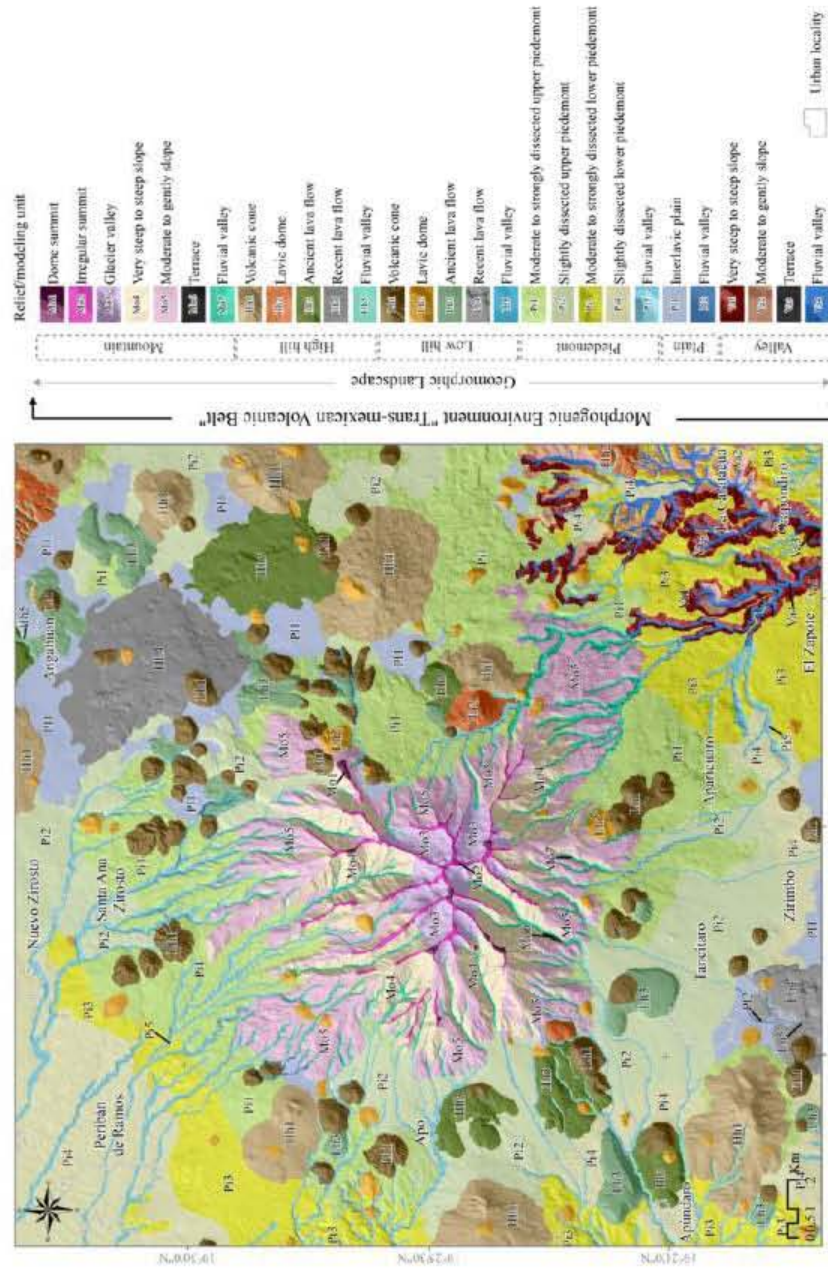


Fig. 3 Relief/modelling units that conform the Geomorphic landscapes units in the study area.

Figura 4. a) Slope map, and b) Aspect map in the study area

High Hills (117 km²) and Low Hills (80 km²) are the third and fourth most extensive landscapes. Both are associated with recent lavas, volcanic cones, lava domes, and fluvial valleys. Plains are the fifth most extensive (39 km²) landscape, represented by interlavic plains and fluvial valleys exposed to the northeast and southeast of the area. Finally, the Valley landscape is the least extensive (31 km²) with landforms differentiate in very steep to steep, and moderate to gentle slopes, terraces, and fluvial valleys, which are concentrated in the southeast (Fig.3).

The geomorphs determine the aspect and inclination of slopes; both key indicators in the assessment of their stability. Southern orientated slopes (265 km²) are concentrated in the center, south, and eastern parts of the study area, followed by slopes orientated to the north (223 km²) occurring northward and westward. Non-oriented slopes (118 km²) are located to the northeast and southeast. Western-oriented slopes (100 km²) occur in the northwest, west, and southwest of the study area while east-oriented slopes (69 km²) to the east and north (Fig. 4a). Gentle slopes (5°-15°; 295 km²) predominate in the study area, followed by moderately steep slopes (15°-30°; 181 km²) represented by piedmont, terraces, and lower slopes. The slopes between 0° and 1° were classified as flats

(127 km²) and those between 1° and 5°, as very gently slopes (106 km²), which are placed within plains and valley bottoms. Slopes between 30° and 45° (63 km²) were classified as steep, and when their inclination was over 45° (10 km²) as very steep. Those are associated with the Pico de Tancitaro stratovolcano flanks (Fig. 4b).

Soils are one of the moderate stability conditioning factors. These are differentiated and grouped according to the type and dynamic of the associated landforms. Andosol (578 km²) is the predominant soil group with humic, ochric, mollic, and vitric types mostly distributed in the Pico de Tancitaro stratovolcano. Dystric and eutric Regosols (110 km²) are distributed in the north and east. Leptosols (41 km²) are found on the summit of the Pico de Tancitaro stratovolcano and recent lavas. Chromic Luvisols (35 km²) are concentrated in the southeast of the study area. The soil groups covering the less extensive surfaces are chromic and humic Cambisols (15 km²) (northeast and center), eutric Fluvisols (1 km²) in the southeast, and pellic Vertisols (0.4 km²) in the northwest (Fig. 5a).

The youngest and most dynamic landslide conditioning factor is land cover-land use. In the study area, the predominant vegetation is mixed forest (247 km²) represented by associations of pines

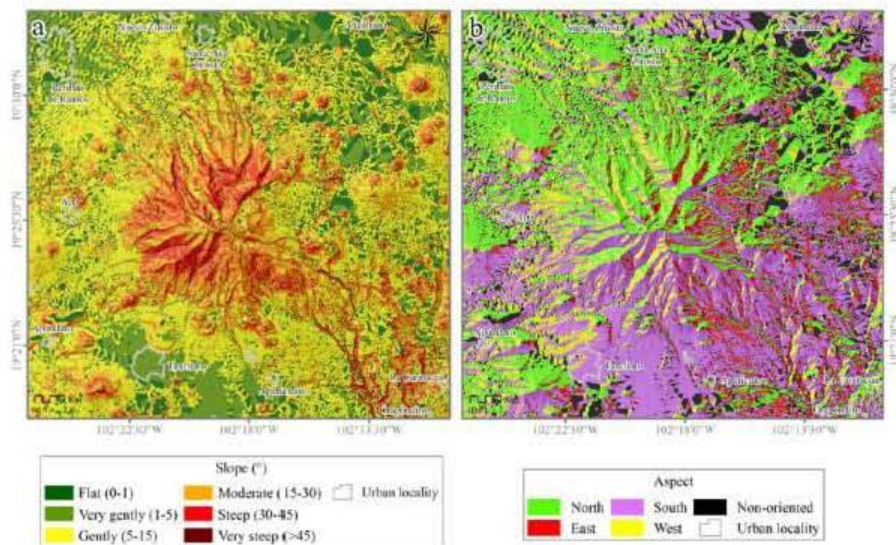


Fig. 4 a) Slope map, and b) Aspect map in the study area.

Figura 5. a) Soil group-type, and b) land cover and land use (2020) in the study area

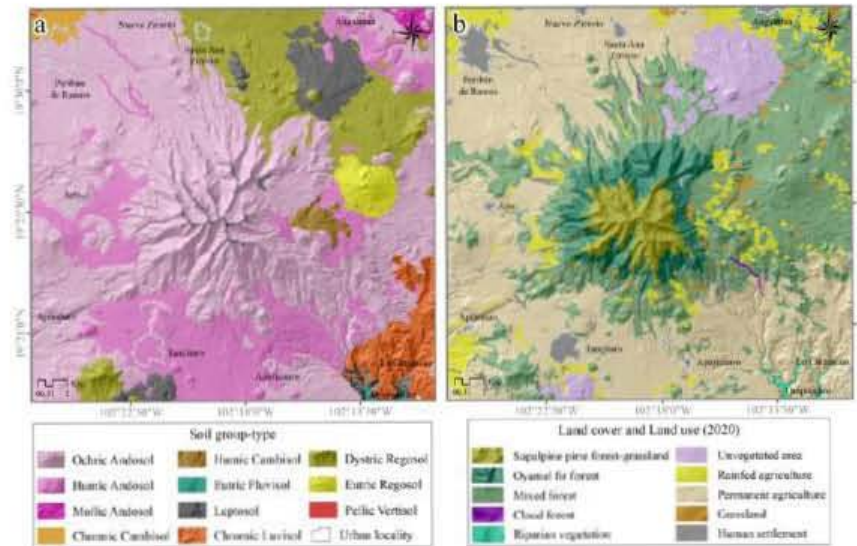


Fig. 5 a) Soil group-type, and b) land cover and land use (2020) in the study area.

(*Pinus pseudostrabus*, *P. leiophylla*, *P. douglasiana*, and *P. montezumae*), oaks (*Quercus rugosa*, *Q. martinezzi*, *Q. laurina*, *Q. crassifolia*, and *Q. obtusata*), Mexican alder (*Alnus jorullensis*), mountain juniper (*Juniperus monticola*), madrone (*Comarostaphylis discolor*). In addition, tepozán (*Buddleja cordata*) is present in the moderate and gentle slopes of the Pico de Tancitaro stratovolcano and in lava flows, high hills, and low hills in the southwest, west, and east. Following in extension are the following: the oyamel fir forest (*Abies religiosa*) (45 km²) growing on the flanks of the stratovolcano, unvegetated areas (40 km²) on recent lava flows, and subalpine pine forest and grassland (*Pinus hartwegii* and *Muhlenbergia macroura*) (28 km²) on the summits and glacial valleys of the Pico de Tancitaro stratovolcano. The less extensive vegetation covers in the study area are riparian vegetation (*Salix paradoxa* and *Oreopanax xalapensis*) (3 km²) and cloud forest (*Alnus jorullensis*, *Bromeliaceae*, among others) (2 km²) (Fig. 5b).

The more extensive land-use category was permanent agriculture (332 km²), located mostly on the piedmont in the north, west, south, and southeast of the study area—where citrus fruits and avocado are cultivated, followed by rainfed agriculture (60 km²) in the northwest, northeast, east, south, southwest, and

west of the study area, where maize and vegetables are grown. The human settlements (15 km²) are located at the base of the stratovolcano, and grassland (11 km²) is distributed in the center, east and northeast of the study area (Fig. 5b).

3.2 Multitemporal landslide inventory

We identified 505 landslides in the study area that were classified in slides and flows, and occurred in 1995, 2004, 2010, and 2015 (Table 4).

We observed spatial coincidence of some recent and old landslide events (17 events in 1995, 3 in 2004, 4 in 2010, and 15 in 2015) and their effect on previous landslide scars, which is evidence the reactivation of landslide processes (Fig. 6).

The identified landslides occurred in a range of velocity that goes from 5 meter/second to 3 meter/minute (flows), and from 5 meter/second to 1.8 meter/hour (slides). These events were mainly distributed on the flanks of the Pico de Tancitaro stratovolcano, mountain fluvial valleys, and volcanic cones. Landslides were predominant in SW-NE and SE-NW orientations associated with the local fracture system and developed on andesitic and basaltic andesitic rocks, on steep slopes (30-45°) oriented to the south, north, and east, with coarse-textured

Tabla 4. Description of landslide events in the multitemporal inventory
 Figura 6. Multitemporal landslide distribution and typology map in the study area

Table 4 Description of landslide events in the multitemporal inventory

Year	Type/Material			Number of events	Extension*			Total (ha)
					Maximum	Minimum (m ²)	Mean	
Before 1995	Slide (19)	Debris	16	8,024	505	3,849	6.2	
		Earth	3	403	762	2,181	0.7	
	Flow (8)	Debris	4	24,723	2,209	8,580	3.4	
		Earth	4	7,742	2,041	3,992	1.6	
2004	Slide (2)	Debris	2	21,775	11,470	16,622	3.3	
		Earth	1	6,004	1,956	4,602	1.4	
	Flow (4)	Earth	1	16,049	16,049	16,049	1.6	
2010	Flow (2)	Debris	2	53,660	8,390	31,025	6.2	
		Earth	2	25,520	74	1,695	49.5	
2015	Slide (360)	Debris	68	18,426	64	2,045	13.9	
		Earth	74	34,799	145	3,990	29.5	
	Flow (110)	Earth	36	16,210	341	4,580	16.5	
Subtotal			Slides	381				
Total			Flows	124				
				505				

Note: *Estimated based on the events polygon's extension inventoried using the inputs described in Table 1.

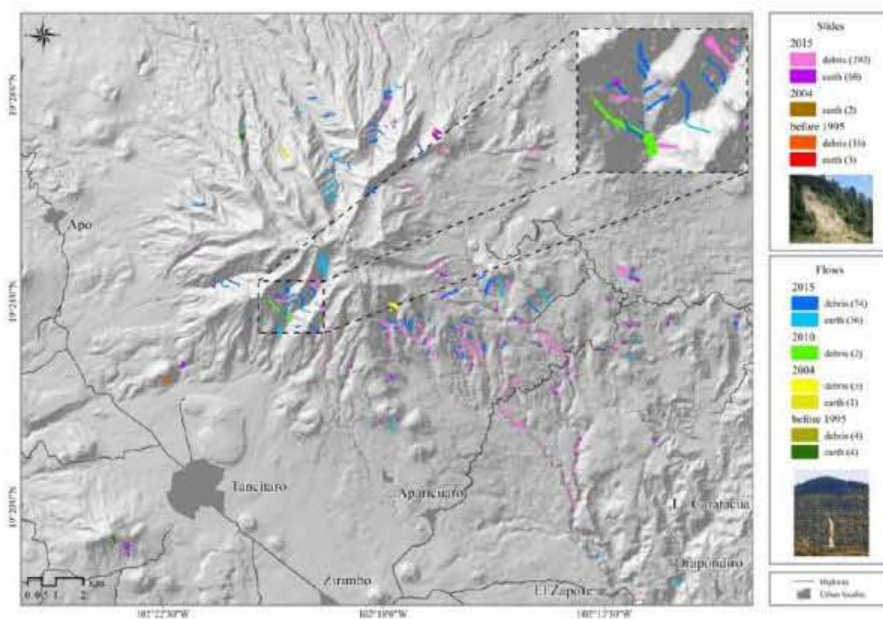


Fig. 6 Multitemporal landslide distribution and typology map in the study area.

Andosols and Leptosols, as well as mixed and oyamel fir forests (Table 5).

Intense precipitation caused by hurricanes and tropical storms triggered the identified landslides. The triggering factor for the 27 events identified in 1995 was Hurricane Calvin with 100 to 125 mm

accumulated rainfall between July 4 and 9 of the year 1993, those events covered 11.9 ha. The accumulated rainfall of 50 to 60 mm between October 12 and 13 of 2004 from Tropical Storm Lester, added to the 50-60 mm of accumulated rainfall caused by the tropical depression DT16E on October 26 of that same year,

Table 5 Multitemporal landslide inventory associated with the Conditioning Factors (CF) (-Continued-)

CF	Key/ Name	% of total surface*											
		Slides						Flows					
		Debris		Earth				Debris		Earth			
		95	04	10	15	95	04	10	15	95	04	15	
Land cover and land use	Sfg	3	7	0	0	1	14	2	15	9	0	0	28
	Of	14	25	0	100	27	76	98	85	42	0	100	28
	Mf	74	36	72	0	43	10	0	0	35	100	0	24
	Cf	2	10	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	G	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	10
	Pa	5	21	28	0	21	0	0	0	1	0	0	3
	Ra	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4
	Rv	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	Ua	0	1	0	0	0	0	0	0	11	0	0	1

Notes: * Numbers in major values are expressed in **bold**; 95, 04, 10, 15, are respectively the year of 1995, 2004, 2010, and 2015. Mo: Mountain (Mo1: Dome summit, Mo3: Glacial valley, Mo4: Very steep to steep slope, Mo5: Moderate to gentle slope, M6: Terrace, Mo7: Fluvial valley); Hh: High hill (Hh1: Volcanic cone, Hh2: Lavic dome); Lh: Low hill (Lh1: Volcanic cone, Lh2: Lavic dome), Pi: Piedmont (Pi1: Moderate to strongly dissected upper piedmont, Pi5: Fluvial valley); Va: Valley (Va1: Very steep to steep slope, Va2: Moderate to gentle slope, Va4: Fluvial valley). A: Andesite, BA: Basaltic andesite. AN: Andosol, LP: Leptosol, CM: Cambisol, RG: Regosol, LV: Luvisol, FL: Fluvisol, h: humic, o: ochric, m: mollic, v: vitric, d: dystic, e: eutric, c: chromic; Texture (1: coarse, 2: medium, 3: fine). Sfg: Subalpine pine forest-grassland; Of: Oyamel fir forest; Mf: Mixed forest; Cf: Cloud forest; G: Grassland; Pa: Permanent agriculture; Ra: Rainfed agriculture; Rv: Riparian vegetation; Ua: Unvegetated area.

triggered the six landslides identified in 2004, affected 6.3 ha, the biggest earth slide was reported during this season (2.1 ha). In 2010, the two events were associated with Hurricane Alex that produced 100-125 mm of accumulated rainfall between July 1 and 2; this season had the smallest number of landslides covering 6.2 ha, and the biggest debris flow (5.3 ha). Finally, the 470 landslides identified in 2015 were the consequence of the 125-150 mm of accumulated rainfall between October 22 and 24 that was generated by Hurricane Patricia, this season reported the biggest debris slide (2.5 ha), the biggest earth flow (1.6 ha), and was affected 104.4 ha.

3.3 Slides

We observed 381 translational slides – 75% of the total landslides identified in the study area – that occurred in 1995, 2004, and 2015 at velocities that go from 5 meter/second to 1.8 meter/hour. 2015 had the highest number of slides (360), with the most extensive one reported as covering 2.5 ha (Table 4). Furthermore, 81% of these slides were classified as debris slides (308) concentrated in the southeast, north, and southwest of the Pico de Tancitaro stratovolcano (Fig. 6). Debris slides were present in volcanic cones (Lh1), fluvial valleys (Mo7), and on very steep to steep mountain slopes (Mo4). Most debris slides developed on andesite at inclinations between 30° and 45°, concurrently with southern and

eastern-oriented fractures, coarse-textured Andosols, Leptosols, and Regosols, and mixed forest. The remaining 73 slides (19%) were classified as earth slides. They were concentrated on very steep to steep slopes, mountain fluvial valleys, and volcanic cones, as well as on andesitic rocks and steep slopes (30°-45°), mostly oriented towards the south and north. These slides also developed on coarse and medium-textured Andosols and medium-textured Leptosols covered by mixed and oyamel fir forests (Fig. 7).

3.4 Flows

The remaining 25% of the total landslides were flows (124) with a velocity that goes from 5 meter/second to 3 meter/minute, that occurred in 1995, 2004, 2010, and 2015. Flows were more abundant in the north, east, southwest, and southeast of the Pico de Tancitaro stratovolcano, and the most extensive events occurred in 2010 (5.3 ha) and 2015 (3.4 ha) (Fig. 6). The 77% of flows (83) were classified as debris flows; these are located on andesitic rocks, mountain very steep to steep slopes, fractured surfaces southern and eastern fractures surfaces oriented, and on coarse-textured Andosols and Leptosols covered by oyamel fir forest (Fig. 7). The remaining 33% of flows were earth flows (41) that were distributed on andesitic very steep to steep slopes on the mountain, oriented towards the south and north with Andosol and Leptosol development

Figura 7. More recent flows and slides observed in fieldwork in the study area

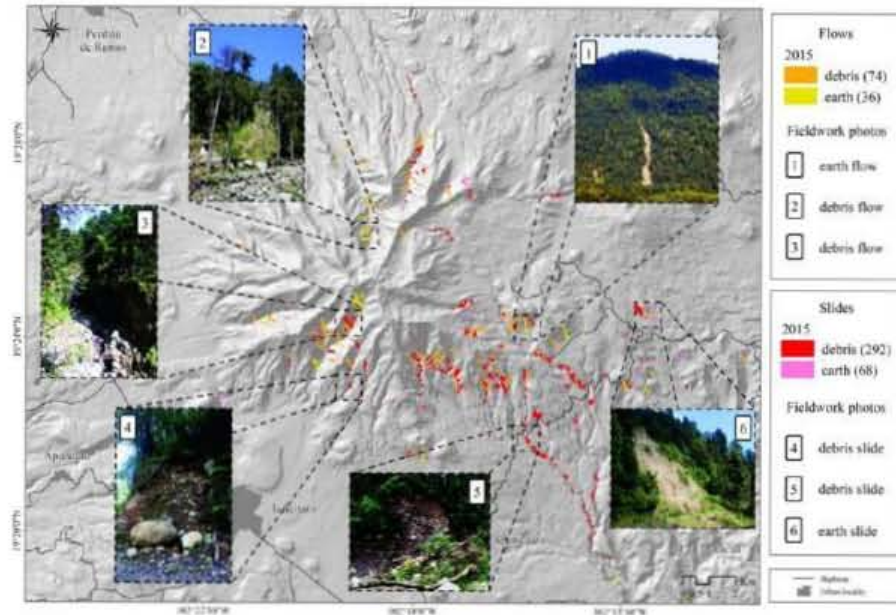


Fig. 7 More recent flows and slides observed in fieldwork in the study area.

that was covered by oyamel fir forest and subalpine forest-grassland (Table 4).

4 Discussion

Several studies and landslide inventories performed in mountain regions have analyzed biophysical components like rocks, geomorphs, slope and aspect, soils, land cover and land use, identifying them as landslide conditional factors (van Westen et al. 2006; Guzzetti et al. 2012; Murillo and Alcántara-Ayala 2017; Solís et al. 2019).

Our spatial analysis allowed the identification of the conditioning factors with the greatest presence in the slides and flows of the studied area. The landforms with the highest number of landslides were very steep and steep slopes, mountain fluvial valleys, and volcanic cones, with slopes between 30° and 45° and oriented towards the south, north, and east, which suggests that the Pico de Tancitaro stratovolcano is highly susceptible to landslide events. These results concord with previous studies made on other mountains within the same morphogenetic

environment of the Trans-Mexican Volcanic Belt as follows: Colima (Cortés et al. 2010), Nevado de Toluca (García et al. 2018), and Pico de Orizaba (Aceves et al. 2016) volcanoes, and the Sierra de Angangueo (Alcántara-Ayala et al. 2012) and Sierra de Guadalupe (García et al. 2006) mountain ranges. Our results also line up with those stated by Enriquez and collaborators (2010) who indicated that slope instability processes are more common in mountain zones, stratovolcanoes, and in geomorphs with steep slopes.

The oldest rocks (fractured andesites) presented the highest number of slides and flows because of their weakening caused by their longer exposure to exogenous processes. Previously, Alcántara-Ayala and Murillo (2008), Highland and Bobrowsky (2008), van Westen et al. (2008), Enriquez et al. (2010), Muñoz and Hernández (2012), and De la Peña et al. (2021) reported similar results, identifying rock type and stratigraphy as the main factors for characterizing landslides, as well as observing that landslides are most frequent on fractured surfaces underlain by sliding bedrocks and in poorly consolidated materials.

Andosols and Leptosols were the soil groups that

coincided the most with slides and flows because of the relationship among soils, parent material and geoforms. Incipient soils (Leptosols) develop on more tilted geoforms where highly fractured andesite blocks outcrop, but deep Andosols develop on gentle and moderate slopes formed on andesitic tuff underlying andesitic lava flows, which act as sliding surfaces when are saturated with water. Similar behaviors have been observed in soils from other intertropical mountain regions. On the one hand, there are deep, clayey, and silty soils that are quickly saturated and tend to slide downwards on steep geoforms (Kobiyama et al. 2011; Gomes and Vieira 2016; Salazar et al. 2019), and on the other, there are underdeveloped, coarse-textured soils where the moving surface is rocky and poorly consolidated (Lacerda 2007; Coutinho et al. 2019).

Most of the landslides we identified in the study area occurred in mixed and oyamel fir forests because these are the land covers where precipitation is highest (Fuentes et al. 2004). In general, the vegetation stabilizes slopes by distributing the humidity throughout its vertical strata and by the soil cohesion provided by root systems (Schmidt et al. 2001; Mao et al. 2012). These areas, however, coincide with mountain slopes and Andosols used for forestry, recreational, and agricultural (cultivation of annual and perennial crops and animal husbandry) activities, which increase their susceptibility to landslides by promoting deforestation for opening roads, trails, and parcels (Fuentes et al. 2004; van Westen et al. 2008). Similar behaviors have been observed in other mountain regions with uses ranging from tourist and recreational (in natural protected areas) to agricultural by Lozano and Bussmann (2005), Marques et al. (2008), Franco et al. (2018), and Carvalho et al. (2019).

The spatial coincidence between recent and old landslide events we observed in the study area is evidence of the reactivation of processes that caused damage on previous scars, as reported by Samia and collaborators (2016). In their landslide inventory within a mountain zone, they found that surfaces where landslides have occurred are susceptible to developing such future processes that might be more extensive than the previous. According to Cruden and Varnes (1996), and Hungr and collaborators (2014), the identified landslides can be classified according to their occurrence velocity as extremely rapid to very rapid (flows), and extremely rapid to rapid (slides)

movements.

Huddleston et al. (2003), Legorreta et al. (2014), Aceves et al. (2016), and Terzi et al. (2019) have stated that intensive rainfall caused by extreme hydrometeorological events, like hurricanes originating in the Pacific or Atlantic Oceans, are among the main triggers of landslides. Our results in the study area support the latter statement. Landslide events in the study area were triggered by intense rainfall caused by hydrometeorological phenomena from either the Pacific Ocean, like Hurricane Calvin in 1993 (100 to 125 mm 6-day accumulation), Tropical Storm Lester and the tropical depression DT16E in 2004 (together accumulating 100 to 120 mm in 3 days), and Hurricane Alex in 2010 (100-125 mm 2-day accumulation), or the Atlantic Ocean, like Hurricane Patricia in 2015 (125-150 mm 2-day accumulation) (SMN 2021a, b). The data above suggests that the frequency in the occurrence of landslides in the study area is every 6 to 7 years, which may be associated with the behavior and effects of ENSO in Mexico exposed by Magaña et al. (2003). We also observed that while higher amount of precipitation that triggering a landslide in a shorter period of time, that will cause the magnitude (area affected) by the landslides to be larger (Fig. 8).

According to Domínguez et al. (2016), the rainfall generated in the study area by the latter meteorological events ranged between medium (117.07 mm) and high (175.61 mm) threshold values of accumulated precipitation in 24 hr that might trigger landslides in the Trans-Mexican Volcanic Belt. The comparison of the accumulated precipitation during these meteorological events with the precipitation database of Fuentes et al. (2004) shows that rainfall represents between 11% and 16.5% of the annual precipitation recorded in the Tancitaro meteorological station (910.5 mm).

Examples of landslides triggered by intense precipitation from hurricanes and tropical storms have been observed in other mountain regions in Mexico. For example, they have been observed in the coastal region of Guerrero where Hurricane Paulina in 1997 accumulated 411 mm in one day, exceeding the highest threshold value (269.7 mm) for triggering landslides; in the Sierra Norte de Puebla, where a tropical cyclone (1999) caused 743 mm of accumulated precipitation in four days, which is over three times the highest threshold value recorded for the region; and in the Sierra de Anganguao (2010) the

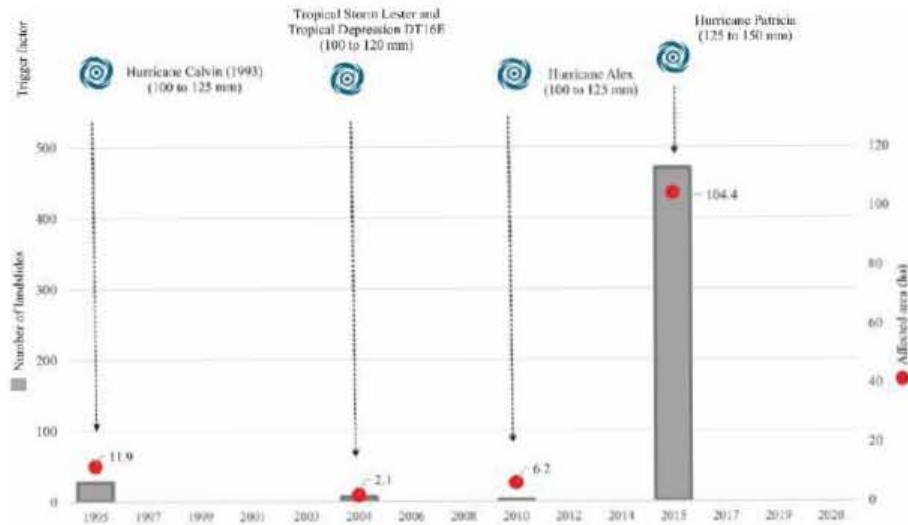


Fig. 8 Landslide frequency and magnitude in the study area.

accumulated precipitation in five days was 146-246 mm, placing it between the high (175 mm) and very high (234.1 mm) threshold values for triggering sudden landslide events (Alcántara-Ayala 2004; Alcántara-Ayala et al. 2012).

Earthquakes can also trigger landslides (Ferrari 2000; Legorreta et al. 2014; Aceves et al. 2016). The study area is located within the moderate seismic zone in Mexico, which is an area where earthquakes are infrequent, and, when they do occur, their acceleration values is less than 70% of gravity acceleration (SGM 2017). Between 1990 and 2020, 66 earthquakes were recorded in the study area with magnitudes between 3.2 and 4.3 (classified as microseisms), but none of them occurred either in previous months or during the development of landslide events, which proves that earthquakes were not triggering factors of these events (SSN 2021).

The generation of multitemporal landslide inventories in mountain zones is essential for knowing the magnitude and frequency of landslide events to aid in decision-making for the prevention, mitigation, and management of the associated risks, as exemplified by successful experiences in the Sierra de Guadalupe (García et al. 2006), Sierra de Anganguero (Alcántara-Ayala et al. 2012), Sierra Costa de Jalisco (Muñiz and Hernández 2012), Sierra Norte de Puebla (Murillo and Alcántara-Ayala 2017), Sierra

de Guerrero (Alcántara-Ayala et al. 2017), and the Sierra-Costa de Michoacán region (Solís et al. 2019).

5 Conclusions

Here we documented how it is possible to study the distribution, typology, velocity, and composition of landslides occurring in intertropical mountain regions through multitemporal inventories from the geographic perspective. At present, however, these studies are few and lack information at a detailed scale, which can be overcome by compiling and generating cartographic information about landslides and their conditioning and triggering factors at a higher spatial resolution.

Our inventory identified the areas affected by landslides, and the results from our conditioning factor spatial analysis allowed identifying that, volcanic cones, slopes and mountain river valleys, covered by Andosols and Leptosols, >30° slopes, with oyamel fir and mixed forests, mainly oriented to South, North and East, were the classes with higher relative importance for assessment and cartographic modeling of the study area's susceptibility and hazardness caused by landslides.

The multitemporal landslide inventory and the spatial analysis of conditioning factors at the 1:50,000

scale allowed a detailed characterization, as well as an increase in the knowledge level of the frequency and magnitude of landslides in the study area. This information is useful for future studies of susceptibility, hazardness, vulnerability and risks to natural hazards, which could be represented by detailed maps, cartographic modelling, risk atlas, and territorial planning programs in the intertropical mountain areas to support land use planning and the disaster risk management.

Acknowledgments

The author(s) disclosed receipt of the following

References

- Aceves QJF, Legorreta PG, Lugo HJ, et al. (2016) Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Invest Geog* 91:43-55. (In Spanish)
<https://doi.org/10.14350/ing.46503>
- Alcántara-Ayala I (2008) On the historical account of disastrous landslides in Mexico: the challenge of risk management and disaster prevention. *Adv Geosci* 14:159-164.
<https://doi.org/10.5194/adgeo-14-159-2008>
- Alcántara-Ayala I (2004) Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology* 61(1-2):19-40.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.11.004>
- Alcántara-Ayala I, Murillo GFG (2008) Procesos de remoción en masa en México. Hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Invest Geog* 66: 47-64. (In Spanish)
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000200004
- Alcántara-Ayala I, López GJ, Garnica RJ (2012) On the landslide event in 2010 in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Angangueo, Michoacán, Mexico. *Landslides* 9:263-273.
<https://doi.org/10.1007/s10346-011-0291-7>
- Alcántara-Ayala I, Garnica PRJ, Domínguez ML, et al. (2017) The La Pintada landslide, Guerrero, Mexico: hints from the pre-classic to the disasters of modern times. *Landslides* 14:1195-1205.
<https://doi.org/10.1007/s10346-017-0808-9>
- Antinao JL, Farfán LM (2013) Occurrence of landslides during the approach of tropical cyclone Juliette (2001) to Baja California Sur, Mexico. *Atmósfera* 26(2):183-208.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56526154005>
- Arce MTJ, Nehren U, Sudmeier RK, et al. (2019) Nature-based solutions (Nbs) for reducing the risk of shallow landslides: Where do we stand? *Int J Disast Risk Re* 41:1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101293>
- Arrieta C (2018) Aumenta a 5 el número de muertos por inundaciones en Peribán, Michoacán. *El Universal*. (In Spanish)
<https://www.eluniversal.com.mx/estados/aumenta-5-el-numero-de-muertos-por-inundaciones-en-periban-michoacan>
- Bocco G, Mendoza M, Velázquez A (2001) Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping—a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology* 39(3-4):211-219.
[https://doi.org/10.1016/S0169-353X\(01\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0169-353X(01)00027-7)
- Borrego A, Carlon AT (2021) Principales detonantes y efectos socioambientales del boom del aguacate en México. *J Lat Am Geogr* 20(1):154-184. (In Spanish)
<https://doi.org/10.1353/lag.2021.0006>
- Capra L, Macías JL (2002) The cohesive Naranjo debris-flow deposit (10 km³): A dam breakout flow derived from the Pleistocene debris-avalanche deposit of Nevado de Colima Volcano (México). *J Volcanol Geoth Res* 117:213-235.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00245-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00245-7)
- Carlón AT, Villanueva DJ, Soto CG, et al. (2021) Tree rings as indicators of climatic variation in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Central Mexico. *Ecol Indic* 120:106920.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106920>
- Carvalho RC, Francisco CN, Salgado CM (2019) Condicionantes geomorfológicos e da cobertura da terra na ocorrência de movimentos de massa na região serrana do Rio de Janeiro. *Cad Geogr* 29(56):27-44. (In Portuguese)
<https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29n56p27>
- CEPCM (Coordinación Estatal de Protección Civil, Michoacán) (2020) Programa Especial Temporada de Lluvias y Ciclones Tropicales 2020. (In Spanish)
<http://pcivil.michoacan.gob.mx/planes-y-programas/>
- COAH (Copernicus Open Access Hub) (2020) Sentinel-2 Satellite Images.
<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Cortés A, Macías JL, Capra L, et al. (2010) Sector collapse of the SW flank of Volcán de Colima, México The 3600 yr BP La Lumbre–Los Ganchos debris avalanche and associated debris flows. *J Volcanol Geoth Res* 197:52-66.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.11.013>
- Coutinho RQ, Silva MM, Santos AN, et al. (2019) Geotechnical Characterization and Failure Mechanism of Landslide in Granitic Residual Soil. *J Geotech Geoenviron* 145(8):05019004-16.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002052](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002052)
- Cruden DM, Varnes DJ (1996) Landslides Types and Processes. *Landslides Investigation and Mitigation*. 36-75. Washington, DC. USA. Transportation Research Board.
<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>
- De la Peña GK, Mendoza ME, Macías JL, et al. (2021) Landslide susceptibility analysis base on a semiquantitative method in the Sierra-Costa region, Michoacán, México. *Phys Geogr*
<https://doi.org/10.1080/02723646.2021.1899476>
- Di Traglia F, Morelli S, Casagli N, et al. (2014) Semi-automatic delimitation of volcanic edifice boundaries: Validation and application to the cinder cones of the Tancitaro–Nueva Italia

- region (Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, Mexico). *Geomorphology* 219: 152-160.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.05.002>
- Dikau R, Cavallin A, Jager S (1996) Databases and GIS for landslide research in Europe. *Geomorphology* 15(3-4): 227-239.
[https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00072-D](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00072-D)
- Domínguez ML, Castañeda MA, González HAE (2016) Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un sistema de alerta temprana por inestabilidad de laderas. *Cenapred*. (In Spanish)
http://www1.cenapred.unam.mx/COORDINACION_ADMINISTRATIVA/SRM/FRACCION_XLI_A/23.pdf
- Enriquez GC, Oropeza OO, Ortiz PMA (2010) Peligros geológico-geomorfológicos. Las cuencas hidrográficas de México. 38-44. México. Pluralia (Eds.) Impres. (In Spanish)
<https://agua.org.mx/biblioteca/las-cuencas-hidrograficas-de-mexico-diagnostico-y-priorizacion/>
- Fernández T, Pérez GJL, Gómez LJM, et al. (2021) Multitemporal landslide inventory and activity analysis by means of aerial photogrammetry and LIDAR techniques in an area of southern Spain. *Remote Sens* 13(11):1-32.
<https://doi.org/10.3390/rs13112110>
- Ferrari L (2000) Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Bol Soc Geol Mex* 53:84-92.
<https://doi.org/10.18268/BSGM2000v53n115> (In Spanish)
- Ferrari L, Orozco ET, Manera V, et al. (2012) The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics* 522-523: 122-149.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>
- Fiorillo F, Guerriero L, Capobianco L, et al. (2019) Inventory of Vietri-Maiori landslide induced by the storm of October 1954 (southern Italy). *J Maps* 15(2): 330-337.
<https://doi.org/10.1080/17445047.2019.1626777>
- Flores P, Alcántara-Ayala I (2012) Susceptibility to shallow landslides of soil in the municipality of Temoaya, Mexico: multicriteria analysis. *Invest Geog* 77:3-47.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56923353004>
- Franco RO, Vázquez SL, Stoffel M, et al. (2018) Potencial dendrogeomorfológico de coníferas en volcanes del centro de México. *Bosque (Valdivia)* 39(2): 191-204.
<http://doi.org/10.4067/S0717-920201800200191> (In Spanish)
- Fuentes JJJ, Bravo EM, Bocco GV (2004) Water balance and landscape degradation of an ungauged mountain watershed: case study of the Pico de Tancitaro National Park, Michoacán, Mexico. *J Environ Hydrol* 12:1-13.
<http://hydroweb.com/jeh/jeh2004/fuente.pdf>
- García E (2004) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. México. p 98. (In Spanish)
- García RS, Legorreta PG, Aceves QF (2018) Susceptibilidad geomorfológica a procesos gravitacionales en arroyos secundarios del sur de la cuenca La Ciénega, volcán Nevado de Toluca. *Invest Geog* 96.
<https://doi.org/10.14350/ig.59613> (In Spanish)
- García PA, Carlos VV, López MC, et al. (2006) Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the Mexico Basin. *Bol Soc Geol Mex* (2):195-204.
<https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n2a2>
- Gares PA, Sherman DJ, Nordstrom KF (1994) Geomorphology and natural hazards. *Geomorphology* 10:1-18.
[https://doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90004-3)
- Ghorbanzadeh O, Crivellari A, Ghamsi P, et al. (2021) A comprehensive transferability evaluation of U-Net and ResU-Net for landslide detection from Sentinel-2 data (case study areas from Taiwan, China, and Japan). *Sci Rep-UK* 11:14629.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-94190-9>
- Glade T, Albini P, Francis F (2001) The use of historical data in natural hazard assessments. 51-168. Dordrecht. Springer.
<http://doi.org/10.1007/978-94-017-3490-5>
- Golovko D, Behling R, Wetzel HU, et al. (2015) GIS Methods and Multi-Temporal Remote Sensing Data for Improved Landslide Hazard Mapping in Southern Kyrgyzstan. *Int J Geoinf* 11(4):23-29.
<https://journals.sfu.ca/ijg/index.php/journal/article/view/907>
- Gomes MCV, Vieira BC (2016) Saturated hydraulic conductivity of soils in a shallow landslide area in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. *Z Geomorphol* 60(1):53-65.
<http://doi.org/10.1127/zfg/2016/0229>
- Gómez-Castillo G, Mendoza ME, Macías JL, et al. (2020) Detailed geomorphology of debris avalanche of El Estribo volcanic complex (Central Mexico). *J Maps* 16(2):552-564.
<https://doi.org/10.1080/17445047.2020.1782784>
- Gómez-Vasconcelos MG (2018) El volcán Parícutin en el campo volcánico Michoacán-Guanajuato: una revisión. *Cienc Nicolaita* 74:15-30. (In Spanish)
<https://www.cic.cn.unimich.mx/cn/article/view/400>
- González DA, Fernández MG, Doughty MW, et al. (2014) Development of a methodological approach for the accurate measurement of slope changes due to landslides, using digital photogrammetry. *Landslides* 11:615-628.
<https://doi.org/10.1007/s10346-013-0413-5>
- Guevara OE, Quiras WR, Fernández VG, et al. (2014) Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Conceptos Básicos sobre Peligros, Riesgos y su Representación Geográfica. pp 1-87. México. Cenapred. (In Spanish)
<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/44.pdf>
- Gutiérrez EM (2008) *Geomorfología*. Zaragoza, España. Pearson Educación. (In Spanish)
- Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, et al. (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31(1-4):181-216.
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Guzzetti F, Mondini AC, Cardinali M, et al. (2012) Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Sci Rev* 112:42-66.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Harp EL, Hagaman KW, Heid MD, et al. (2002) Digital Inventory of Landslides and Related Deposits in Honduras Triggered by Hurricane Mitch. U.S. Geological Survey. pp 1-16.
https://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-0061/OFR0201_Text.access.pdf
- Hasenaka T (1994) Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Central Mexico. *J Volcanol Geoth Res* 63:13-31.
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90016-7)
- Hasenaka T, Carmichael ISE (1985) Compilation of location, size, and geomorphological parameters of volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, central Mexico. *Geofis Int* 24:577-607.
<https://doi.org/10.2201/igprof.00167169p.1985.24.4.2179>
- Highland LM, Bobrowsky P (2008) The landslide handbook. A guide to understanding landslides. Virginia. U.S. Geological Survey Circular 1325.
<https://pubs.usgs.gov/circ/1325/>
- Höbbling D, Abad L, Dabiri Z, et al. (2020) Mapping and analyzing the evolution of the Butangbanasi landslide using landsat time series with respect to heavy rainfall events during typhoons. *Appl Sci-Basel* 10(2):1-22.
<https://doi.org/10.3390/app10020630>
- Huddleston BA, Ataman B, de Sales P, et al. (2003) Towards a GIS-based Analysis of Mountain Environments and Populations. Environment and Natural Resources Service. Working Paper 10
<http://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/285416/>
- Hung O, Leroueil S, Picarelli L (2014) The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11(2):167-194.
<https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2021) Principales resultados por localidad (ITER) del Censo de Población y Vivienda 2020. Entidad federativa Michoacán de Ocampo. México.
https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Datos_abiertos (In Spanish)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2014)

- <https://doi.org/10.1007/BF00890333>
- Pinzón JI, Núñez CFJ, Rowe CA (2017) Magma intrusion near Volcan Tacaná: Evidence from seismic analysis. *Phys Earth Planet In* 262:66-79.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.11.004>
- Pola A, Macías JL, Garduño MVH, et al. (2014) Successive collapses of the El Estribo volcanic complex in the Pátzcuaro Lake, Michoacán, Mexico. *J Volcanol Geoth Res* 289:41-50.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.10.011>
- Qi W, Wei M, Yang W, et al. (2020) Automatic Mapping of Landslides by the ResU-Net. *Remote Sens-Basel* 12(15):1-14.
<https://doi.org/10.3390/rs12152487>
- Ramos BRN, Vázquez JR, Romero CR, et al. (2018) Evaluation of unsupervised change detection methods applied to landslide inventory mapping using ASTER imagery. *Remote Sens-Basel* 10:1-24.
<https://doi.org/10.3390/rs10121987>
- Salazar GLF, Hoyos PF, Echeverri RO, et al. (2019) Laboratory rainfall induced slope failure in a soil from the Colombian coffee region. *AUC Geogr* 54(1):48-56.
<https://doi.org/10.14712/23361980.2019.5>
- Salinas S, López BJ (2010) Geomorphologic assessment of the debris avalanche deposit from the Jocotitlán volcano, Central Mexico. *Geomorphology* 123:142-153.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.006>
- Salinas JJA, Montalvo AJC, Reinoso AE (2018) Landslides induced by a low magnitude seismic sequence at continental interiors: a case study of the Santa Rosa Canyon, northeastern Mexico. *Landslides* 15:783-795.
<https://doi.org/10.1007/s10346-018-0963-7>
- Samia J, Teunne A, Bregt A, et al. (2016) Do landslides follow landslides? Insights in path dependency from a multi-temporal landslide inventory. *Landslides* 14(2): 547-558.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10346-016-0739-x>
- Sánchez-Núñez JM, Macías JL, Saucedo R, et al. (2015) Geomorphology, internal structure and evolution of alluvial fans at Motozintla, Chiapas, Mexico. *Geomorphology* 230: 1-12.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.003>
- Scattolon M (1996) Studio geologico e morfometrico del settore centro occidentale della Meseta Tarasca, Michoacan, Messico. Bachelor's thesis. Università degli Studi di Milano-Università Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Milano. Italia. pp 1-136. (In Italian)
- Schmidt KM, Roering JJ, Stock JD, et al. (2001) The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Can Geotech J* 38(5): 995-1024.
<https://doi.org/10.1139/t01-031>
- Schuster RL (1996) Socioeconomic significance of landslides. *Landslides: Investigation and Mitigation*. pp 12-35. Washington, D.C. USA. Transportation Research Board Special Report.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano) (2017) Sismología de México. Regiones sísmicas en México.
<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html> (In Spanish)
- SGM (Servicio Geológico Mexicano) (1999) Carta Geológico-Minera Colima E13-3. Colima, Jalisco y Michoacán. Hidalgo.
https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/66_E13-3_GM.pdf (In Spanish)
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2016) Imágenes satélite SPOT. Ermex. (In Spanish)
<https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/ermex-monitoreo-satelital>
- Slaymaker O, Embleton HC (2018) Advances in global mountain geomorphology. *Geomorphology* 308:230-264.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.016>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional) (2021a) Lluvias asociadas a ciclones tropicales. Comisión Nacional del Agua. México.
<https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/lluvias-asociadas-a-ciclones-tropicales> (In Spanish)
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional) (2021b) Información histórica. Consulta de historial y resúmenes de ciclones tropicales. Comisión Nacional del Agua. México. (In Spanish)
<https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- Soares J, García C, Mendoza L, et al. (2008) Slope instability along some sectors of the road to La Bufadora. *WIT Trans Ecol Envir* 115:329-336.
<https://doi.org/10.2495/ST080321>
- Solis CB, Mendoza ME, Vázquez CG, et al. (2019) Landslide inventory map of the tropical dry Sierra Costa Region, Michoacán México. *Phys Geogr* 1-24.
<https://doi.org/10.1080/02723646.2019.1574136>
- SSN (Servicio Sismológico Nacional) (2021) Catálogo de sismos. Mapa de epicentros del 01-01-1990 al 01-01-2020. Cuadrante Latitud (mínima 19.19, máxima 19.66) Longitud (mínima -102.62 máxima -102). Universidad Nacional Autónoma de México. México. (In Spanish)
<https://doi.org/10.21766/SSNMX/EC/MX>
- Terzi S, Torresan S, Scheiderbauer S, et al. (2019) Multi-risk assessment in mountain regions: A review of modelling approaches for climate change adaptation. *J Environ Manage* 232:759-771.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.100>
- UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (2019) Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2019.
<https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-disaster-risk-reduction-2019>
- Valdés CAC, Mendoza ME, Carlón AT, et al. (2021) A review of recent studies on landslide hazard in Latin America. *Phys Geogr* 1-44.
<https://doi.org/10.1080/02723646.2021.1978372>
- van Westen CJ, Castellanos E, Kuriakose SL (2008) Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Eng Geol* 102:112-131.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- van Westen CJ, van Asch TWJ, Soeters R (2006) Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult? *B Eng Geol Environ* 65:167-184.
<https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>
- Zepeda RO, González MS (2014) Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México. pp 1-225. México. Cenapred. (In Spanish)
<http://www.cenapred.gob.mx/es/publicaciones/archivos/36>
- Zinck AJ (2013) Geopedology. Elements of geomorphology for soil and geohazard studies. Enschede. The Netherlands. ITC.
- Zinck AJ, Metternicht G, Bocco G, Del Valle HF (2016) Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies. Switzerland. Springer.
<https://doi-org.pblidi.unam.mx:2443/10.1007/978-3-319-19159-1>

**Capítulo III. Análisis dendrogeomorfológico de un proceso de
remoción en masa complejo en el estratovolcán Pico de
Tancítaro, México**

Resumen

La ocurrencia de Procesos de Remoción en Masa (PRM) en montañas intertropicales es recurrente, debido a las precipitaciones torrenciales y sismos. El análisis de estos procesos depende de la calidad de los datos disponibles, debido a que éstos son claves en la evaluación de su peligrosidad. El uso de técnicas dendrogeomorfológicas aporta dataciones precisas de la ocurrencia y magnitud de los eventos de remoción en masa. Por ello, esta investigación tiene como objetivo, reconstruir espacio-temporalmente el Proceso de Remoción en Masa Complejo (PRMC) “La Culebra” mediante técnicas dendrogeomorfológicas, el cual es el evento de mayor magnitud inventariado recientemente en el estratovolcán Pico de Tancítaro. Se realizó la caracterización geomorfológica, la descripción de la estructura del paisaje, y la reconstrucción de la frecuencia y magnitud del evento. La cartografía geomorfológica se realizó con base en el diagrama de las partes de un PRMC, y se representó por medio de perfiles longitudinales y transversales, describiendo a su vez las características geológicas, edáficas y vegetales a escala detallada. La reconstrucción de la frecuencia y de la magnitud del evento se llevó a cabo mediante análisis dendrocronológicos y geomorfológicos. A partir de la caracterización geomorfológica y la descripción de la estructura del paisaje se identificaron geoformas asociadas a deslizamientos y flujos de escombros las cuales conforman el PRMC, en ellas se encuentran suelos enterrados de origen volcánico, cuya vegetación arbórea (*Abies religiosa*) registró favorablemente el evento. Se realizó un muestreo dendrocronológico para generar la cronología de eventos, este consistió en obtener 122 núcleos de crecimiento de 72 árboles (*Abies religiosa*), estos árboles presentaron marcas derivadas del PRMC, las muestras fueron analizadas mediante COFECHA, para posteriormente con el programa ARSTAN generar una cronología e identificar los eventos. También se generó una cronología de referencia, para lo cual se muestrearon 20 árboles (17 *Pinus hartwegii*, 3 *Abies religiosa*), para obtener un total de 26 muestras. El análisis de la cronología de árboles impactados permitió identificar en el 100% de las muestras ductos de resina traumáticos. Los análisis de las mediciones de ancho de anillo dieron como resultado un valor de intercorrelación de 0.48 para la cronología de referencia y 0.52 para la cronología de eventos. Al calcular el índice de Shroder se identificó al año 2016 con una respuesta significativa (96%). El evento de remoción en masa fue detonado por las lluvias (125 a 150 mm) del huracán Patricia ocurrido del 22 al 24 octubre de 2015. Debido a su volumen y velocidad de ocurrencia el PRMC se clasificó como altamente peligroso. Lo anterior demostró que los análisis dendrogeomorfológicos permiten identificar con exactitud la fecha de la ocurrencia de eventos de remoción en masa, con ello es posible identificar su frecuencia y magnitud, abonando a la generación de bases de datos que permitan caracterizar los peligros geomorfológicos, monitorear y modelar su comportamiento, para así poder mitigar sus efectos desastrosos y gestionar los riesgos asociados a su ocurrencia en zonas de montaña intertropical.

Palabras clave: Anillos de crecimiento de árboles, Dendrogeomorfología, Precipitación extrema

Introducción

Durante las últimas dos décadas (2000-2019), el continente americano ha concentrado el 24% de los eventos desastrosos causados por Procesos de Remoción en Masa (PRM), los cuales han sido detonados principalmente por precipitaciones extremas (CRED, 2020; Valdés et al., 2021; 2022). Estos procesos también pueden ser detonados por sismos, derretimiento rápido de nieve, actividad volcánica, inundaciones y diversas actividades humanas (Alcántara-Ayala, 2000; Mergili et al., 2015). La comprensión de la distribución, magnitud y frecuencia de los eventos pasados y presentes de remoción en masa es clave para la evaluación de peligros y para la mitigación de los riesgos asociados (Slaymaker, 2010; Corominas & Moya, 2010). En los ambientes montañosos, así como en áreas remotas los datos disponibles para el análisis de los peligros son escasos o no existen (Franco et al., 2019), lo que dificulta la comprensión de su evolución y dinámica y por lo tanto su gestión.

En los últimos años se han aplicado técnicas dendrocronológicas para entender la dinámica, magnitud y frecuencia de diversos peligros geológicos y geomorfológicos, demostrando su idoneidad en la elaboración de estudios paleoambientales (Franco et al., 2018). La dendrogeomorfología usa como indicador la respuesta de los anillos de los árboles ante eventos geomorfológicos, permitiendo fecharlos con exactitud anual y/o estacional, por lo que su interpretación puede utilizarse para reconstruir procesos morfodinámicos y determinar periodos de estabilización-desestabilización en laderas y barrancos, y aportar dataciones precisas de la ocurrencia de eventos (Stoffel & Bollschweiler, 2008; Stoffel & Corona, 2014; Šilhán & Stoffel, 2015; Franco et al., 2018).

En Norteamérica y Europa durante las últimas décadas, esto ha sido demostrado mediante varias investigaciones enfocadas al estudio de flujos de escombros (Stoffel et al., 2008; Schraml et al., 2015; Šilhán et al., 2015), caída de rocas (Stoffel et al., 2005; Stoffel et al., 2011), y avalanchas de nieve (Stoffel et al., 2006). En México, la dendrogeomorfología ha sido escasamente aplicada para el análisis de peligros por PRM, los estudios se han concentrado en la identificación de zonas con potencial dendrogeomorfológico en zonas de montaña (Franco et al., 2018); en el estudio de caídas de roca (Stoffel et al., 2011; Franco et al., 2017), caída de rocas y deslizamientos (Vázquez & Franco, 2022), y flujos de detritos (Pablo et al., 2020; De la Peña, 2023); estos estudios se han centrado principalmente en las especies de: *Pinus hartwegii*, *Pinus leiophylla*, *Pinus ayacahuite* y *Pinus patula*, *Abies religiosa* y *Juniperus deppeana*, siendo el *Abies religiosa* la de mayor potencial para estudios dendrogeomorfológicos.

En México, cerca del 90 % de las áreas susceptibles a inestabilidad de laderas se localizan en las zonas altas de las cuencas, predominando en ambientes montañosos como el Sistema Volcánico Transmexicano, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Chiapaneca y la Sierra de Baja California, por lo que es necesario la elaboración de estudios relacionados con la caracterización, la prevención y la mitigación de esta amenaza (Enríquez et al., 2010). En la actualidad, su ocurrencia se ha incrementado de manera alarmante debido al cambio climático, la deforestación, la erosión, la alteración del drenaje y por la construcción de

asentamientos humanos en sitios inadecuados, lo que ha incrementado el riesgo de sufrir desastres (Alcántara-Ayala, 2004).

En ese sentido, esta investigación tiene como objetivo reconstruir espaciotemporalmente el Proceso de Remoción en Masa Complejo (PRMC) “La Culebra”, el cual es el evento más reciente y de mayor tamaño registrado en el estratovolcán Pico de Tancítaro (Valdés et al., 2022). Su estudio representará la primera aproximación dendrogeomorfológica a un Proceso de Remoción en Masa Complejo (PRMC) en zonas de montaña intertropical, generar información sobre el peligro por este tipo de procesos geomorfológicos, y corroborar el potencial de los análisis dendrogeomorfológicos para la caracterización del peligro, con lo cual se aporte información para la gestión del riesgo por PRM en zonas montañosas.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde al proceso de remoción en masa complejo “La Culebra” (Figura 1c), el cual se localiza en el flanco Sureste del Estratovolcán Pico de Tancítaro, entre las coordenadas $102^{\circ}16'42.09''$ y $102^{\circ}16'22.85''$ de longitud Oeste y $19^{\circ}24'07.02''$ y $19^{\circ}23'55.74''$ de latitud Norte (Figura 1b). Se ubica dentro del Sistema Volcánico Transversal (Figura 1a), en el Campo Volcánico Michoacán Guanajuato, considerado un arco volcánico continental activo, desde el Terciario, caracterizado por presentar volcanes poligenéticos y monogenéticos, formados a partir de la subducción de la placa de Cocos y Rivera debajo de la placa norteamericana (Ferrari et al., 2012; Macías & Arce, 2019).

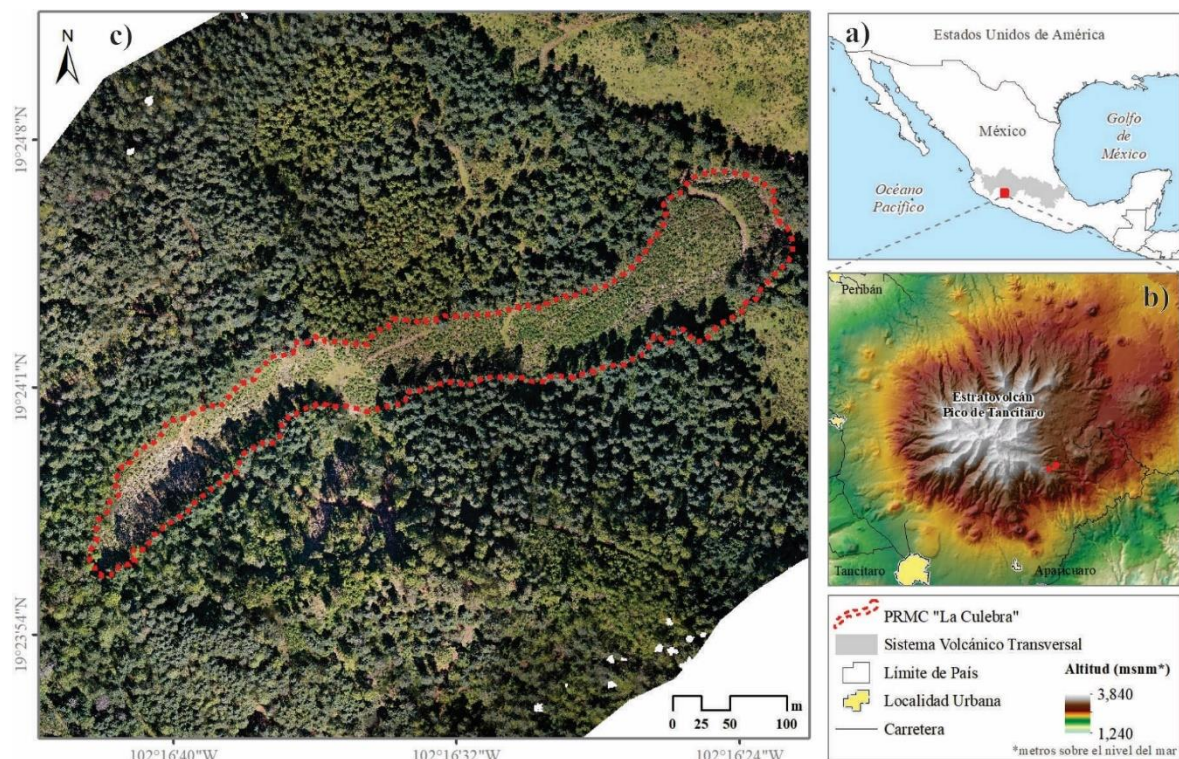


Figura 1. a) Localización del estratovolcán Pico de Tancítaro en el Sistema Volcánico Transversal, b) Localización del PRMC “La Culebra” en el Pico de Tancítaro, c) Imagen de vuelo de dron de alta resolución donde se aprecia el PRMC “La Culebra” delimitado por el polígono rojo discontinuo.

La zona de estudio se ubica sobre lavas de composición andesítica (239 +/- 22 ka), que conforman cimas irregulares y laderas de montaña (muy escarpadas a escarpadas y medias a suaves), cuya pendiente va de 5° a >45°, con orientación predominante al Este. Tiene influencia del clima semifrío subhúmedo C(w) y subhúmedo con lluvias en verano (w₂). Estas condiciones han permitido la formación de suelos con propiedades ándicas (principalmente andosoles), sobre los que se establece el bosque de oyamel (*Abies religiosa*), y algunos pinos (*Pinus pseudostrobus*) sujetos a manejo forestal. Esta área forma parte de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro y del Área de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancítaro (Velázquez et al., 2003; CONANP, 2014). El evento de remoción en masa “La Culebra” es considerado el de mayor magnitud en el estratovolcán Pico de Tancítaro, el cual fue detonado por la precipitación extrema generada por el huracán Patricia en octubre de 2015 que reportó una precipitación de 125 a 150 mm en 3 días, lo que saturó el suelo y desencadenó un movimiento complejo y rápido que arrastró escombros (Valdés et al., 2022).

Caracterización geomorfológica y estructura del paisaje del proceso de remoción en masa complejo

La comprensión de la evolución y la dinámica del proceso de remoción en masa requirió de la generación de la cartografía de las unidades geomorfológicas y de la descripción de la estructura paisajística. La cartografía de las geoformas se realizó a escala de gran detalle (1:500), a partir del Modelo Digital de Superficie (MDS) generado con la nube de puntos obtenida de las imágenes tomadas mediante un vuelo de dron (Mavic 2 pro) (Tabla 1). Las geoformas fueron interpretadas y clasificadas siguiendo el diagrama de las partes de un proceso de remoción en masa complejo de Cruden & Varnes (1996) y Highland & Brobowsky (2008). La descripción de su comportamiento implicó la elaboración del perfil longitudinal anterior y posterior al evento, los cuales fueron generados a partir de modelos digitales de elevación (Tabla 1). El análisis espacial y la representación cartográfica se realizó en el Sistema de Información Geográfica Arc Gis 10.8.

Se realizó la descripción paisajística del depósito y su área aledaña analizando las características geológicas, edáficas y vegetativas, las cuales fueron obtenidas y verificadas mediante muestreos en campo y se representaron mediante perfiles transversales (Tabla 1). Las características geológicas se obtuvieron mediante un levantamiento en campo siguiendo la metodología propuesta por Silva & Mendoza (2016), se analizaron cinco sitios, levantando información sobre las siguientes características: 1) ubicación (coordenadas X,Y, altitud (msnm), orientación y pendiente (°); 2) estratigrafía (superposición, edad relativa); 3) estructuras falla (tipo, material asociado, sentido del movimiento, rodamiento); fracturas (ancho, orientación, grado y apertura del material fracturado, desprendimiento); 4) hipótesis

de formación; 5) litología; 6) textura de la roca (textura, origen, clasificación, cristalinidad, forma, madurez, mineralogía, clasificación, color, granulometría, poros, permeabilidad, meteorización (grado, tipo, observaciones)); 7) geoforma; y, 8) vegetación. Las herramientas necesarias para esta verificación fueron la brújula Brunton, clinómetro, dispositivo GPS, pica, flexómetro, calibrador vernier (regla de precisión) y pica geológica.

La descripción de las características edáficas se llevó a cabo siguiendo la metodología del sistema de clasificación internacional de suelos y las metodologías estándar de muestreo de suelos en campo (IUSSWG, 2015); se realizaron ocho calicatas, cuatro dentro y cuatro fuera del depósito, recabando las siguientes características: 1) datos del sitio (nombre, coordenadas (x,y), altitud (msnm), pendiente del terreno (°), roca, geoforma, vegetación y uso de suelo), 2) descripción del perfil (horizontes, profundidad, textura, color, alófanos, pH, pedregosidad (cantidad, tamaño, forma), estructura, raíces (cantidad, tamaño), y fauna). Las herramientas necesarias para estas verificaciones fueron el GPS, clinómetro, cinta métrica, navaja, agua destilada, agua normal, tiras medidoras de pH, fenolftaleina, fluoruro de sodio y contenedores plásticos de tamaño pequeño.

La descripción de las características vegetativas se realizó conforme a la metodología de Walker & Shiels (2013), la cual es aplicada para analizar la sucesión natural de la vegetación después de presentarse un PRM; las características analizadas fueron: tipo de vegetación, altura, número de individuos, estructura vegetativa, distribución y densidad. Las herramientas utilizadas fueron el altímetro, flexómetro y cinta métrica (Tabla 1).

Tabla 1. Insumos utilizados para generar el mapa geomorfológico detallado, los perfiles longitudinales y los perfiles transversales del PRMC “La Culebra”.

Tema	Insumos	Resolución	Fuente
Mapa geomorfológico	Ortomosaico	0.05 x 0.05 m	Generado a partir de vuelos con dron en el año 2021
	Modelo Digital de Elevación (MDE)	0.1 x 0.1 m	Generado a partir del ortomosaico
	Modelo Digital de Superficie (MDS)	0.1 x 0.1 m	Generado a partir del ortomosaico
	Mapa de sombras	0.1 x 0.1 m	Generado a partir MDE
	Mapa de pendiente	0.1 x 0.1 m	Generado a partir MDE
Perfil longitudinal del PRMC	Modelo Digital de Elevación (MDE)	0.1 x 0.1 m	Generado a partir de las imágenes del dron
Perfil longitudinal de la superficie original del terreno	Modelo Digital de Elevación (MDE)	0.1 x 0.1 m	Generado a partir de las curvas de nivel del mapa topográfico (INEGI, 2013)
Perfiles transversales	Modelo Digital de Elevación (MDE)	0.1 x 0.1 m	Generado a partir de las imágenes del dron
	5 sitios de verificación geológica (escarpe (1), zona alta (1), zona media (1) y zona baja (2))	1 x 1 m	Muestreo en campo
	8 sitios de verificación edáfica (4 dentro del PRMC y 4 en la superficie original del terreno)	1 x 1 m	Muestreo en campo

	3 sitios de verificación vegetativa (zona alta, media y baja)	1 x 1 m	Muestreo en campo
--	---	---------	-------------------

Reconstrucción dendrogeomorfológica de la frecuencia y magnitud del evento

El análisis y el mapeo dendrogeomorfológico permitieron realizar la reconstrucción de la frecuencia y magnitud del proceso de remoción en masa complejo. El análisis dendrogeomorfológico consistió en la construcción de la cronología de eventos de remoción en masa y en una cronología de referencia.

La cronología de eventos se realizó mediante el análisis de los árboles con cicatrices ocasionadas por el proceso de remoción en masa complejo (Stoffel & Bollschweiler, 2008, 2009; Stoffel et al., 2010), siguiendo el modelo Proceso-Evento-Respuesta (Shroder, 1980). Se muestrearon 72 árboles (*Abies religiosa*) que presentaron cicatrices, con un barrenado tipo Pressler, obteniendo de tres a cuatro núcleos por árbol (a los lados de la cicatriz y en la parte posterior al golpe). En total fueron 122 núcleos, los árboles muestreados se ubicaron en los extremos del proceso de remoción en masa complejo, lo cual permitió realizar una mejor lectura de los anillos y fechar los eventos (Franco et al., 2017).

Por cada árbol muestreado se llenó un registro que contempló clave (sitio, número de muestra), coordenadas, diámetro (cinta diamétrica), pendiente de la base en grados, inclinación, altura y orientación del árbol, orientación del impacto, número, altura y ancho de las cicatrices, altura de la muestra, geofoma, tipo de suelo, tipo de vegetación, uso de suelo y observaciones; las herramientas necesarias para la toma de estos datos fueron: flexómetro, cinta diamétrica, hipsómetro, clinómetro y GPS. Las muestras fueron procesadas en el laboratorio montándolas en molduras de madera, y dejándolas secar, posteriormente se lijaron siguiendo la metodología estándar de Stoffel & Bollschweiler (2008).

Posteriormente, los anillos se dataron para determinar su edad tal como lo indica Corona et al. (2014). Primeramente, se elaboraron los skeleton-plots de cada muestra, los cuales fueron comparados para identificar años faltantes, supresiones, años con anillos angostos y anillos anchos. Posteriormente, se llevó a cabo el correcto conteo y fechado, el cual se realizó mediante inspección visual y con la ayuda de un microscopio estereoscópico según la metodología de Altman et al. (2016), el ancho de los anillos se midió con un equipo Velmex cuya resolución es de 0.001mm (Robinson & Evans, 1980). La calidad del fechado y la medición se verificó con el programa COFECHA (Stokes & Smiley, 1968; Holmes, 1983), para la generación de la cronología solo se consideraron las series dendrocronológicas que presentaron coeficiente de intercorrelación mayor a 0.3281. Finalmente, con el programa ARSTAN (Cook & Holmes, 1986), se generó una cronología de índice de ancho de anillo (IAA).

A continuación, se llevó a cabo el análisis de disturbios en los anillos de los árboles para evaluar con exactitud el año de ocurrencia y la frecuencia de eventos geomórficos. Las respuestas expresadas en los anillos de los árboles fueron representadas en el programa Fire History Analysis and Exploration System (FHAES). Adicionalmente, se realizó el índice de

Respuesta de Shroder, para comprobar que los eventos identificados fueran provocados por eventos de remoción en masa, este índice divide el número de árboles dañados para el año t entre el número total de árboles vivos del año t , esto se multiplica por 100 para expresarlo en porcentaje (Shroder, 1978). El valor del índice debe ser mayor al 30% para tener certidumbre de la existencia de un evento geomorfológico (Butler & Stoffel, 2013).

También se generó una cronología de referencia, esta cronología se elaboró a partir del muestreo 20 árboles (17 *Pinus hartwegii*, 3 *Abies religiosa*) no dañados por el proceso de remoción en masa, obteniendo 26 muestras, estas muestras se colectaron fuera de la zona afectada por el PRM. El procesamiento, fechado y medición siguió los mismos procedimientos usados para construir la cronología de eventos.

Finalmente se generó la cartografía de magnitud (superficie afectada y cicatrices) a partir de los árboles dañados y la información recabada en campo. Se realizaron los mapas de edad de arbolado, número, alto y ancho de las cicatrices ocasionadas por el PRMC esto de acuerdo con las metodologías planteadas por Stoffel & Bollschweiler (2008); la interpolación de los datos puntuales se realizó aplicando el algoritmo IDW (Distancia Inversa Ponderada). También, se calculó el volumen del material removido mediante la diferencia algebraica de los volúmenes reportados para la superficie anterior y posterior al evento, esto se obtuvo procesando los modelos digitales de elevación con la herramienta Surface Volume de Arc Gis. Para tener un cálculo más preciso el resultado se multiplicó por los valores de densidad media (2.1 ton/m^3) reportados para deslizamientos y flujos de escombros por Iverson (1997) y Wang et al. (2018).

Resultados

Cartografía geomorfológica del proceso de remoción en masa complejo

El proceso de remoción en masa “La Culebra” se clasifica como complejo. Este se desarrolla en el ambiente morfogenético conocido como Sistema Volcánico Transversal, y es característico del paisaje geomorfológico clasificado como “Montaña”; la descripción a mayor detalle de este proceso (desde su parte alta a su parte baja), muestra que coincide con cimas irregulares, laderas muy escarpadas a escarpadas, y laderas moderadas a suaves. Las características geomorfológicas referidas anteriormente condicionaron el desarrollo del evento de remoción en masa, su formación se divide en dos eventos simultáneos: 1) la formación de un deslizamiento traslacional de escombros y, 2) el desarrollo de un flujo de escombros. El deslizamiento traslacional constituye la zona de desprendimiento (3,140-2,985 m s.n.m.) y el flujo la zona de deposición (2,985-2900 m s.n.m.) del PRMC. El deslizamiento está conformado por la corona (20.2 m^2), el escarpe principal (37.2 m^2) y el cuerpo principal ($8,287.5 \text{ m}^2$); el material transportado por el deslizamiento fue acumulado en la zona del pie ($5,642.2 \text{ m}^2$). No se observa lóbulo frontal del deslizamiento traslacional, lo cual indica que el material acumulado al pie del deslizamiento fue el principal insumo para formar el flujo, transportando y depositando el material (escombros) en su pie ($28,917 \text{ m}^2$). Dentro del pie

del flujo se observan fracturamientos radiales (596.5 m²), los cuales evidencian el avance de la erosión hídrica al disectar verticalmente la zona de acumulación del evento (Figura 2).

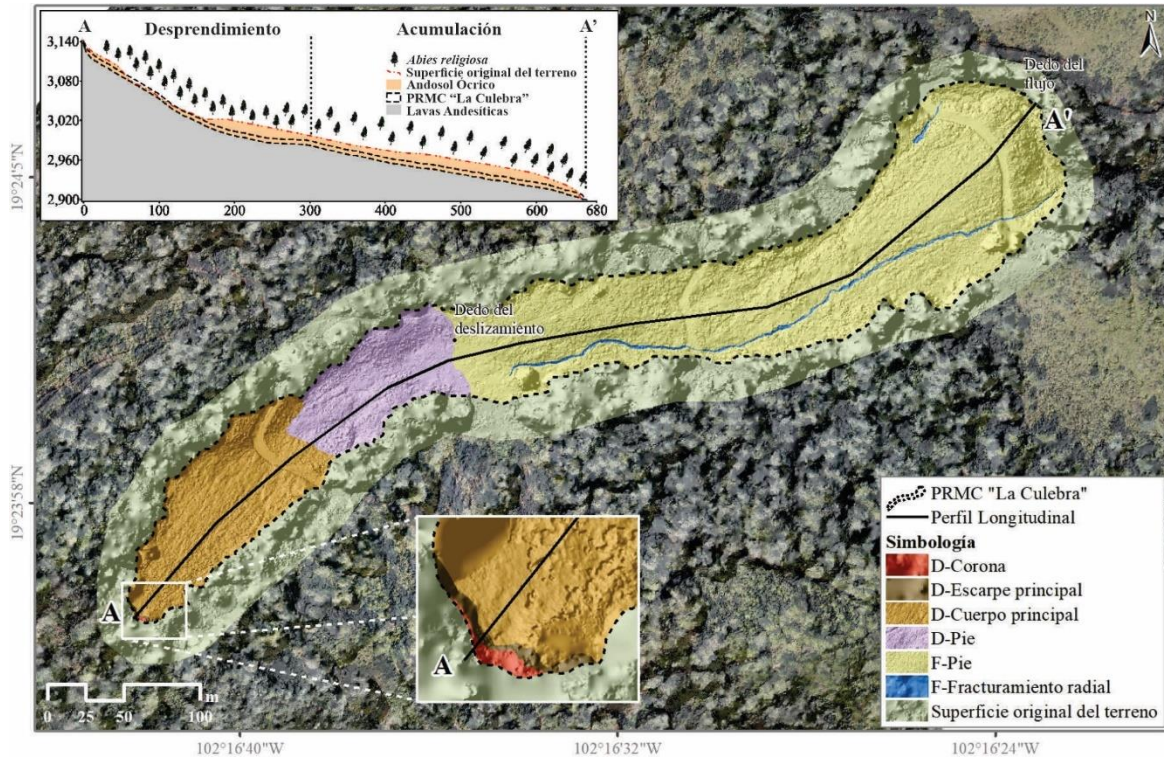


Figura 2. Perfil longitudinal y mapa geomorfológico detallado del PRMC “La Culebra”; D: Deslizamiento; F: Flujo.

Estructura del paisaje del proceso de remoción en masa complejo

El análisis en campo de la estructura paisajística (roca, suelos y vegetación) (Figura 3) del PRMC permite identificar que la corona y el escarpe principal están constituidos por el afloramiento de un derrame lávico, cuya roca tiene composición andesítica, este afloramiento está orientado al noroeste y tiene una pendiente mayor a 40°. El material litológico presenta alto grado de fracturación, las fracturas tienen un ancho de 6 a 12 centímetros, lo cual genera el desprendimiento de bloques que ruedan a favor de la pendiente. Se observa también alto grado de intemperismo físico y biológico causado por las bajas temperaturas y por la presencia de musgo, arbustos, árboles y fauna (Figura 3-1r, 4a).

Se observan suelos someros como el Leptosol y el Regosol eútrico (Figura 4f) con características ándicas, los primeros encontrados en la parte alta de la corona y entre las paredes del escarpe principal; y los segundos al pie del escarpe en la superficie anterior al cuerpo del deslizamiento. Los Leptosoles tienen una profundidad de 10 centímetros, dos horizontes (O y A) antes de llegar a la roca madre (andesita), textura limosa, presencia de alófanos (+, ++), pH de 7.08 a 7.59, y alta pedregosidad (Figura 3-1s). Los Regosoles tienen una profundidad de 45 centímetros, cuatro horizontes (O, AC1, AC2 y C), textura limosa y areno-limosa, alófanos (+, ++), pH de 7.29 a 8.01, y alta pedregosidad (Figura 3-2s).

Finalmente, dentro de la cicatriz causada por el evento se presentan pastos y renuevos de árboles dispersos de un año de edad, y fuera de ella un bosque denso de árboles de oyamel de 25 metros de altura aproximadamente y varios renuevos de un año de edad (Figura 4g).

En cuanto al cuerpo y al pie del deslizamiento, estos presentan depósitos de caída representado por lapilli (4b) y depósito de ceniza de la erupción del volcán Parícutin (Figura 3-2r, 4d), están orientados al Este con una pendiente de 25°. El suelo que se desarrolla en la superficie original es el Andosol ócrico (Figura 3-3s), este suelo tiene una profundidad variable; sin embargo, se observa que en algunas partes es mayor a 1.55 metros. Se diferencian cinco horizontes (OH, A1, A2, A3, AC1 y AC2). Este suelo evolucionó a partir del intemperismo de las cenizas provenientes del volcán Parícutín. Su textura principal es limosa, limo-arenosa y areno limosa, su contenido de alófanos de + a +++, su pH de 7.51 a 7.95, no reporta pedregosidad y su contenido de raíces es alto (Figura 4e).

Dentro de la cicatriz se observa el resultado de la remoción del suelo más superficial y de las cenizas sobre las que este se desarrolló, debido al avance del PRMC, dejando expuesto el andosol ócrico más antiguo (Figura 3-4s, 4c), el cual tiene una profundidad de hasta 2.30 metros, presenta cuatro horizontes (BC1, C, BC21 y BC22), su textura es franca, arcillo arenosa y arcillo limosa, su contenido de alófanos (+, ++), su pH de 7.75 a 7.95, su pedregosidad alta, y en la base se observa el lapilli. La vegetación dentro de la cicatriz está conformada por árboles jóvenes dispersos, arbustos, herbáceas y pastos de altura no mayor a 1.5 metros; fuera de la cicatriz se presentan árboles jóvenes y maduros de oyamel, y algunos pinos, ambos con una altura promedio de 25 metros.

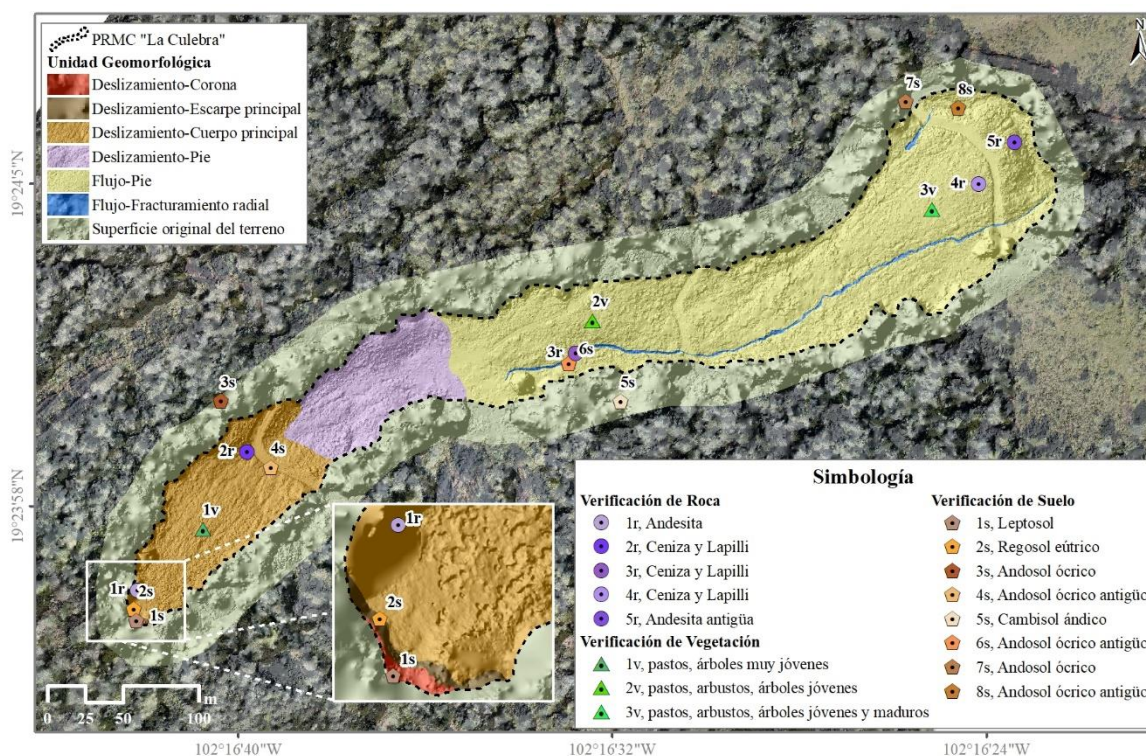


Figura 3. Sitios de análisis y verificación en campo de la estructura del paisaje (roca, suelo y vegetación).

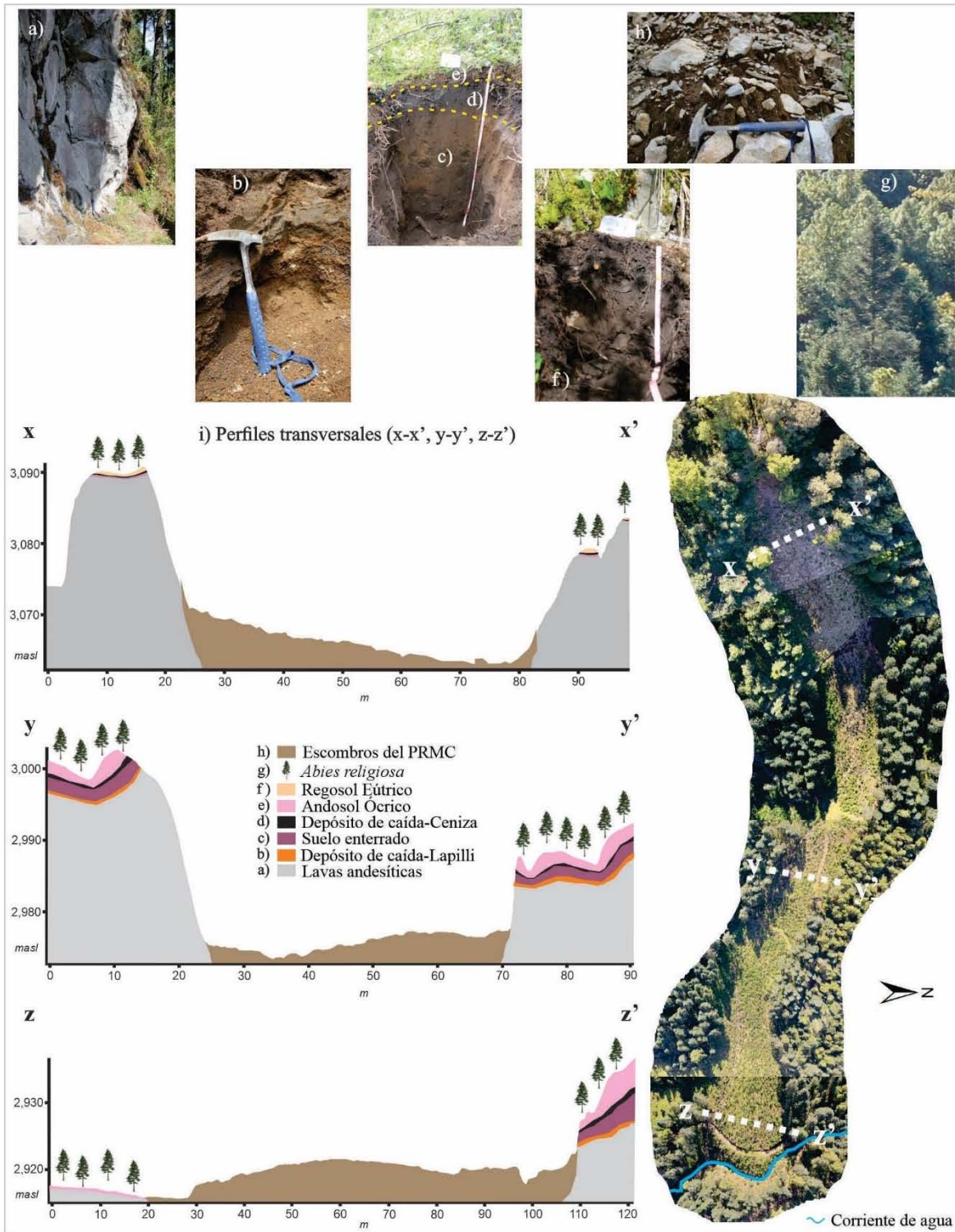


Figura 4. Estructura del paisaje del PRMC “La Culebra”: a) lavas andesíticas, b) depósitos de caída-Lapilli, c) suelo enterrado, d) depósitos de caída-ceniza de la erupción del volcán Parícutín, e) andosol ócrico, f) regosol eútrico, g) *Abies religiosa*, h) escombros del PRMC, i) perfiles transversales (x-x', y-y', z-z').

Finalmente, el pie y los fracturamientos radiales del flujo tienen un comportamiento similar al cuerpo y al pie del deslizamiento, presentando depósitos de caída (ceniza y lapilli) (Figura

3-3r) en su estructura, estos materiales están orientados al Este con pendiente de 20°, tienen un espesor aproximado de 60 centímetros a 3 metros, y alto grado de intemperismo físico y biológico. En su parte baja aflora un derrame lávico de andesita basáltica (Figura 3-5r) cuya posición en el relieve sugiere que es más antiguo que el que conforma el escarpe y la corona, su orientación es Este y su pendiente de 10°, su espesor es mayor a 6 metros y su grado de meteorización va de medio a bajo. Al pie del derrame se observan acumulaciones de arcillas intercaladas con lapilli, con un espesor de 2 metros y algunos cantos rodados transportados por el cauce que se ubica al final del PRMC (Figura 4).

En la superficie original se presentaron Cambisoles ándicos (Figura 3-5s) y Andosoles ócricos (Figura 3-7s), los primeros con una profundidad de 65 centímetros, cinco horizontes (OH, OA, A, AC, D), textura limosa, limo arenosa y franca, alófanos ++ y +++, pH de 7.02 a 7.42, bajo pedregosidad y alto contenido de raíces. Los segundos y más predominantes tienen una profundidad mayor a los 3 metros, ocho horizontes (O, AB11, AB12, A, AB21, AB22, AB23, B), textura limo arenosa, limo arcillosa, arcillo limosa y limosa, alta presencia de alófanos (+, ++, +++, +++++), pH de 7.21 a 7.5, media pedregosidad y alto contenido de raíces. Debajo de los suelos analizados se observa acumulación de ceniza y algunos fragmentos de rocas. El suelo presente en el deslizamiento está representado también por un andosol decapitado (Figura 3-6s y 8s) de cerca de 2 metros de profundidad, cuyo basamento está conformado por lapilli (Figura 3-4r), su textura es arcillo limosa, franca, franca limosa, areno arcillosa, arcillo arenosa, y arenosa, sus horizontes son el B, BC y C, su contenido de alófanos (++ a ++++), su pH va de 6.9 a 7.5, tiene de media a alta pedregosidad y contenido medio de raíces.

Finalmente, en la parte alta y media del flujo se observa el ensanchamiento de los pastos y arbustos, la presencia de jarilla y una mayor densidad en la vegetación con regeneración de oyamel y pino (Figura 3-1v y 2v), en su parte baja se encuentran árboles de mayor tamaño y la vegetación es aún más densa (Figura 3-3v). Fuera del PRM la vegetación predominante es bosque de oyamel y se observan también algunos pinos sometidos a manejo forestal.

Frecuencia y magnitud del proceso de remoción en masa complejo “La Culebra”

Análisis dendrogeomorfológico

La cronología de árboles impactados se construyó con 122 núcleos de crecimiento, extraídos de 72 árboles (*Abies religiosa*) que presentaron daño por el evento de remoción en masa. El valor de intercorrelación entre series y el coeficiente de sensibilidad fueron de 0.52 y 0.27, respectivamente. El ancho de anillo promedio fue de 4.91 mm (mínimo 0.66 mm, máximo 13.6 mm), mientras que la desviación estándar promedio es de 2.39. Esta cronología abarca de 1904 a 2018, siendo representativa de 1966 al 2018 (> 10 muestras, Figura 5).

La cronología de referencia incluye 26 núcleos de crecimiento colectados en 20 árboles (17 *Pinus hartwegii*, 3 *Abies religiosa*) que no presentaron daño por procesos de remoción en masa, estos árboles se ubican cerca de los márgenes (40 metros

aproximadamente) de la zona afectada por el evento. Los valores reportados por COFECHA muestran que el valor de intercorrelación de las series es de 0.48 y el coeficiente de sensibilidad de 0.28. El ancho de anillo promedio fue de 3.03 mm (mínimo 0.75 mm, máximo 6.58 mm), mientras que la desviación estándar promedio es de 1.95. Esta cronología de referencia abarca de 1966 a 2020, siendo representativa de 1966 al 2018 (> 10 muestras, Figura 5).

Se observa que el comportamiento de ambas cronologías es similar del año 1966 a 1996. Presentan un comportamiento diferente de 1997 al 2009, donde la cronología de referencia disminuye el índice de ancho de anillo y en la de árboles impactados aumenta; posteriormente vuelven a tener comportamiento similar hasta el 2016 (Figura 4). En 2016 la cronología de referencia muestra una disminución en el ancho de anillo y posteriormente un crecimiento normal, mientras que la cronología de árboles impactados disminuye aún más el ancho del anillo teniendo una recuperación rápida en el siguiente año, lo cual indica una clara respuesta de los árboles que fueron dañados por el PRMC.

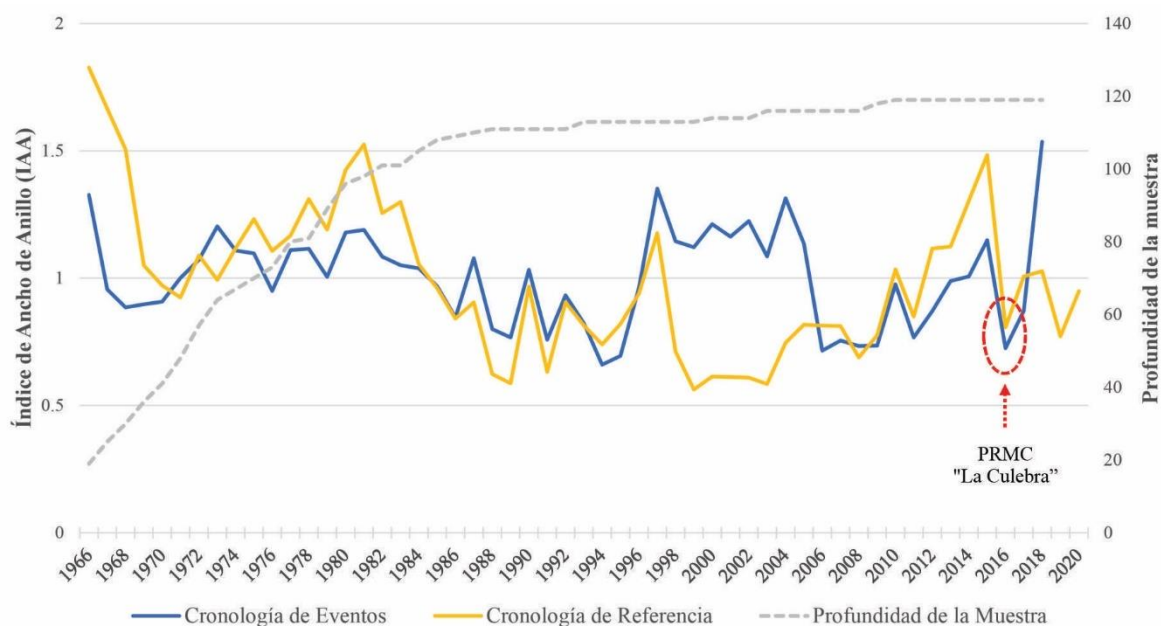


Figura 5. Índice de ancho de anillo Cronología de árboles de referencia vs Cronología de árboles impactados (*Abies religiosa*), por el PRMC “La Culebra”; la profundidad de la muestra refiere a la cronología de árboles impactados.

Análisis de las reacciones y potencial de *Abies religiosa* en la evaluación de PRMC

El análisis dendrogeomorfológico mediante el modelo Proceso-Evento-Respuesta permitió identificar que el PRMC (Figura 6a), propició eventos (cicatrices) que presentaron depósitos de escombros en la base (Figura 6b,d), los cuales respondieron principalmente mediante ductos de resina traumáticos identificados en los barrenos (Figura 6c,e).

En la cronología de respuesta (1904 a 2018), se identifican respuestas en 39 años diferentes, de las cuales, el 100% corresponden a ductos de resina traumáticos. En el año

2016 se identificaron respuestas en 111 series dendrocronológicas (91% de las muestras). La muestra más longeva tiene 114 años y se ubica en la zona de acumulación, la edad promedio de los árboles muestreados es de 45 años (Figura 7).



▼ **Ductos de resina traumáticos (año 2016)**

Figura 6. a) Ubicación de los árboles utilizados para construir la cronología de árboles impactados, b) árbol golpeado por el PRMC “La Culebra”, c) Acercamiento a ducto de resina traumático del 201, d) muestreo con taladro de Pressler en árbol con cicatriz de impacto generada por el PRMC, e) evidencia de ductos de resina traumáticos en los núcleos obtenidos de los árboles dañados por el PRMC “La Culebra”.

En la zona de desprendimiento se colectaron 41 muestras (33.6 %), de las cuales 30 muestras corresponden al cuerpo principal del deslizamiento, y 11 muestras al pie del deslizamiento. En la zona de deposición, se colectó el mayor número de muestras con 81, (66.4%). Lo anterior indica que la mayor evidencia del efecto del PRMC se presenta en la zona de deposición, área en la que predominan árboles de 40 a 60 años (Figura 8).

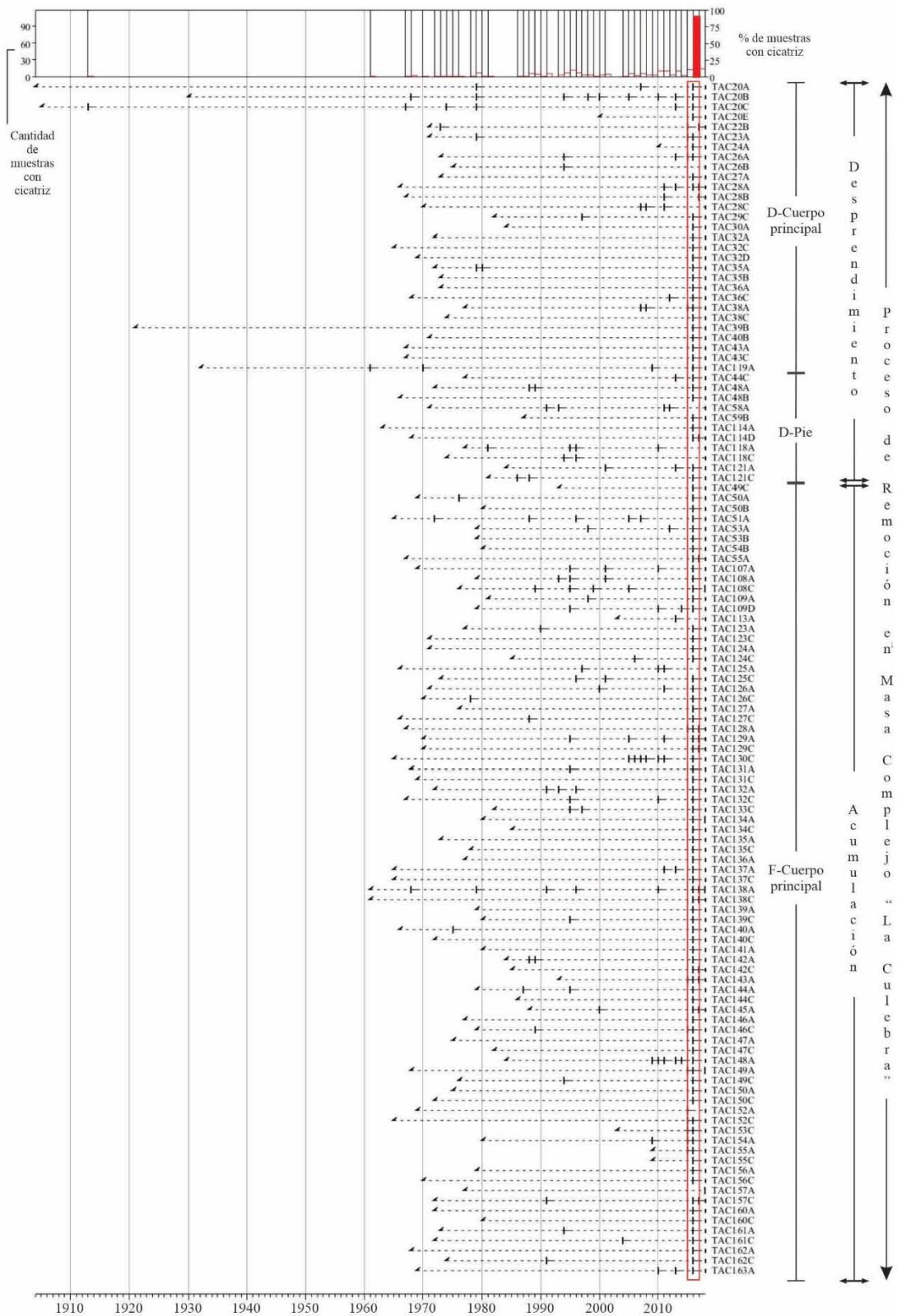


Figura 7. Eventos registrados por los árboles a lo largo del PRMC “La Culebra”, las líneas verticales describen el año en el que se registró respuesta en la muestra, el polígono rojo señala el año (2016), año en el que se identificaron la mayoría de respuestas en las muestras, el gráfico superior indica el porcentaje de muestras con cicatrices y la cantidad de muestras con cicatrices por año.

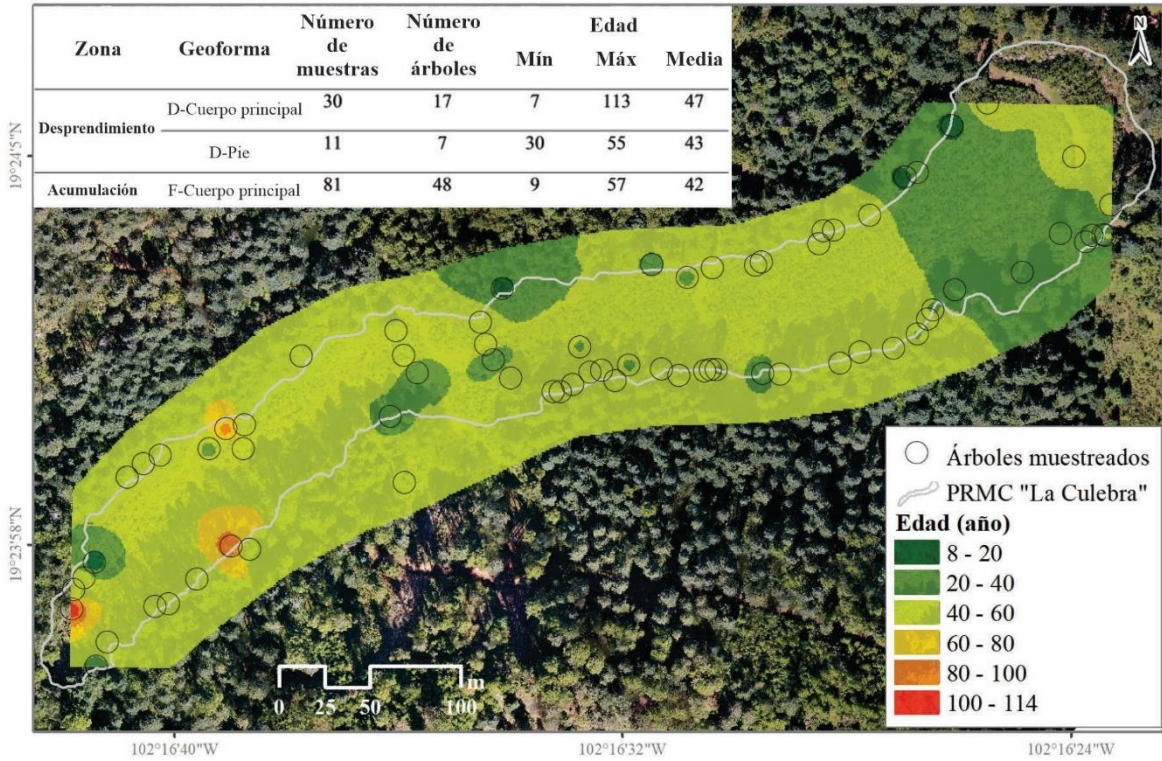


Figura 8. Distribución espacial de la edad de los árboles, número de muestras y número de árboles por geoforma

El Índice de respuesta de Shroder indica que el año 2016 es el único año con resultados significativos (96%) para ser considerado como una señal del evento de remoción en masa, no obstante, en otros 38 años también se presentaron respuestas, pero no superan el umbral del 30 % (Figura 9) recomendado para fechar eventos de remoción en masa, por lo que no fue posible realizar el análisis de frecuencia y se trabajó sólo con este evento.

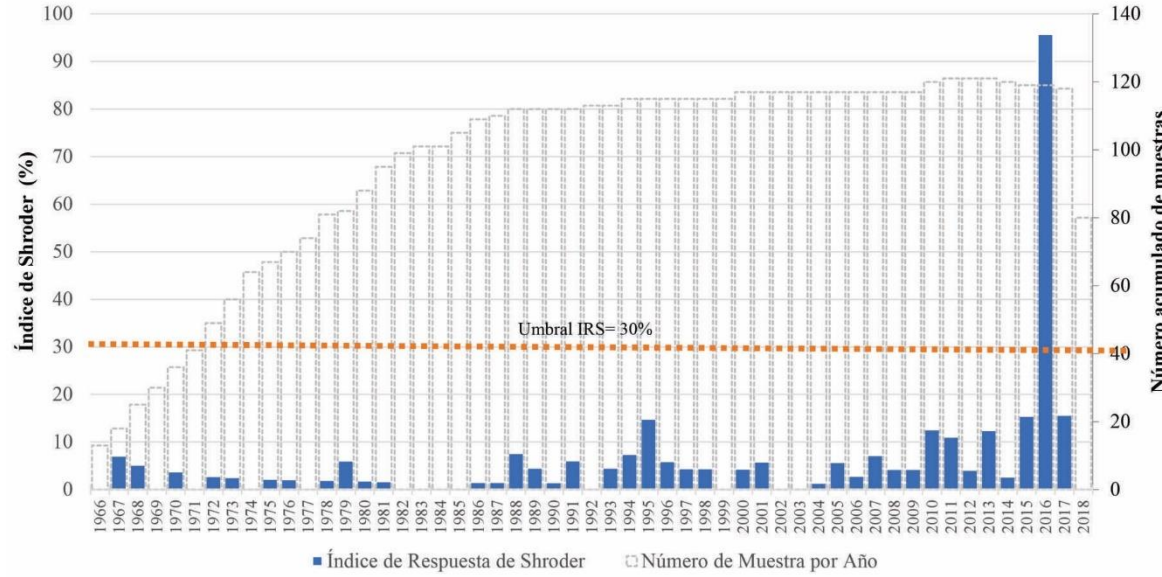


Figura 9. Índice de Respuesta de Shroder de las muestras tomadas del PRMC “La Culebra”, para el periodo (1966-2018).

Magnitud del PRMC “La Culebra”

De los 72 árboles muestreados impactados por el evento de remoción en masa complejo; la zona de desprendimiento concentra 24 árboles, de estos 17 árboles se ubican en el cuerpo principal del deslizamiento y tienen una edad promedio de 53 años (114 años el más longevo, 8 años el de menor edad), en estos árboles reportaron una sola cicatriz de impacto (Figura 10a), siendo la de mayor altura de 5 metros y la menor de 15 centímetros; la altura promedio de las cicatrices es de 1.17 metros. En cuanto al ancho de las cicatrices, el ancho promedio es de 42 centímetros, siendo el ancho máximo de 1.2 metros. Los árboles ubicados en el pie del deslizamiento (7), tiene una edad máxima de 52 años y una edad mínima de 31 años (44 en promedio); 6 árboles presentan una cicatriz y un sólo árbol 3 cicatrices, la mayor altura de las cicatrices es de 1.38 metros y la mínima de 25 centímetros (68 centímetros en promedio) (Figura 10b); el mayor ancho reportado es de 1.32 metros y el mínimo de 12 centímetros (53 centímetros en promedio).

En la zona de deposición se muestrearon 48 árboles, que corresponden en su totalidad al cuerpo principal del flujo, el árbol de mayor edad fue de 57 años y el de menor 9 años, la edad promedio de los árboles fue de 42 años; aquí se ubican los árboles con el mayor número de cicatrices (1 árbol con 4 cicatrices y 2 con tres cicatrices), nueve árboles presentan dos cicatrices y 36 una cicatriz; el alto promedio de las cicatrices es de 1.6 metros, el máximo de 4.4 metros y el mínimo de 36 centímetros; el ancho promedio fue de 90 centímetros, con un máximo 1.83 metros y el mínimo de 12 centímetros (Figura 10c).

El proceso de remoción en masa complejo “La Culebra”, se desarrolla en una superficie de 43,501.6 m², siendo el volumen de remoción de masa aproximado de 744,489.8 m³, el cual considerando la densidad de los escombros removió 1’563,428.6 toneladas. El volumen de material removido fue depositado al pie del proceso, siendo delimitado por el dedo del flujo, este punto coincide con la presencia de un cauce de segundo orden que, debido a su actividad, gradualmente ha transportado los escombros aguas abajo de la cuenca.



Figura 10. a) Número de cicatrices, b) Altura de la cicatriz, y c) Ancho de la cicatriz provocadas por el PRMC

Discusión

El análisis dendrogeomorfológico del PRMC “La Culebra” aportó información base para caracterizar su peligrosidad, la cual es importante para la gestión de los riesgos asociados a los PRM que ocurren en la zona. La utilidad de estos estudios se ha comprobado en otras investigaciones dendrogeomorfológicas desarrolladas en zonas de montaña intertropical, que han abordado PRM con características similares a los flujos de escombros (Stoffel et al., 2008; Schraml et al., 2015; Šilhán et al., 2015; Pablo et al., 2020; De la Peña et al., 2023); y a la caída de rocas (Stoffel, et al., 2005; Stoffel et al., 2011; Franco et al., 2017).

El detonante del PRMC “La Culebra” fue una lluvia intensa ocurrida del 22 al 24 de octubre de 2015, que acumuló de 125 a 150 mm, generada por el huracán Patricia, esta cantidad de lluvia representa entre el 11 y 16.5% de la precipitación anual reportada para el estratovolcán Pico de Tancítaro (SMN, 2024; Carlón-Allende et al., 2021; Valdés et al., 2022). A pesar de que Funk et al. (2014) reportó que la lluvia acumulada durante ese periodo fue menor (62.9 mm) (Figura 11). Lo anterior sugiere que el umbral de lluvia de un evento de precipitación necesario para detonar procesos de remoción en masa para la zona de estudio puede representar el 7 % de la precipitación anual. Este comportamiento se debe a que los eventos que se presentan al final de la temporada de lluvias, ocurren sobre suelos saturados, desencadenando con mayor facilidad procesos de remoción en masa (Hincapié & Tobón, 2012; Picarelli et al., 2012) y provocando inundaciones como la ocurrida el 23 de septiembre de 2018 en la localidad de Peribán de Ramos (Vázquez et al., 2023). Este comportamiento coincide con lo encontrado en otros estudios sobre PRM detonados por lluvias torrenciales en montañas intertropicales de México, como los flujos de escombros de la Sierra de Angangueo, Michoacán (Alcántara-Ayala et al., 2012), los flujos de escombros de la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca, Michoacán (De la Peña, 2023), los deslizamientos de escombros en el Cañón de Santa Rosa, Monterrey (Salinas et al., 2020), los deslizamientos de la Sierra Norte, Puebla (Alcántara-Ayala, 2004) y la Malinche (Franco et al., 2019).

La descripción detallada de la geomorfología del evento de remoción en masa permitió interpretar su evolución y dinámica a escala de gran detalle, tal como ha sido expresado por Griffiths & Whitworth (2012) para otros sitios, quienes indican que el estudio a detalle de los PRM mediante el uso de cartografía y trabajo de campo, representa una escala adecuada que permite entender la complejidad de los PRM. Las unidades geomorfológicas identificadas permitieron clasificar al PRM analizado como un proceso complejo, el cual al ser descrito mediante el esquema base de Cruden & Varnes (1996), hizo posible identificar que es un proceso dinámico constituido por dos procesos simultáneos cuya inestabilidad de las laderas generó un transporte rápido del material hacia las partes bajas coincidiendo con el comportamiento descrito por Highland & Bobrowsky (2008) para los procesos de remoción en masa complejos.

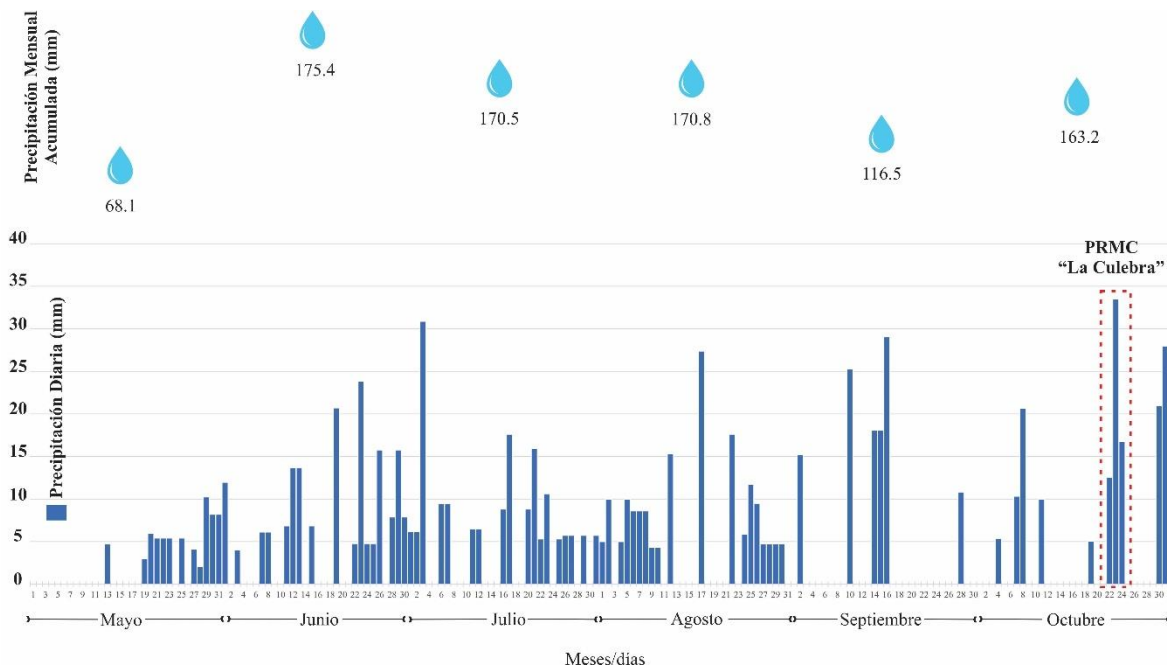


Figura 11. Precipitación diaria durante la temporada de lluvias (Mayo a Octubre) registrado para el estratovolcán Pico de Tancitaro durante el año 2015. Esta figura fue realizada usando los datos de The Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations-CHIRPS (Funk et al., 2014)

El análisis de la estructura del paisaje mostró que, ante un evento de remoción en masa súbito, se lleva a cabo la pérdida y la modificación de las capas superficiales (suelo y vegetación) del paisaje, dejando suelos decapitados y removiendo grandes superficies vegetativas, las cuales siguen un proceso de recuperación posterior al evento. Esto coincide con lo encontrado en otras investigaciones donde se ha reportado la modificación de los suelos y la revegetación natural gradual de las zonas que presentaron procesos de remoción en masa (Arunachalam et al., 2000; Stoffel & Bollschweiler, 2008; Nakileza & Tushabe, 2018; Walker & Shiels, 2013).

Los resultados encontrados con respecto a las rocas y las estructuras geológicas en la zona de estudio indican que las zonas compuestas por rocas derivadas de derrames lávicos (andesíticos) y de materiales piroclásticos (cenizas volcánicas) con presencia de fracturas, son altamente susceptibles a presentar procesos de remoción en masa súbitos, esto coincide con lo encontrado en otras zonas volcánicas como en la región de islas volcánicas de Azores (Gomes et al., 2005), en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (Alcántara-Ayala et al., 2012, De la Peña, G.K.A. (2023), y en el estratovolcán Pico de Orizaba (Legorreta et al., 2015).

En cuanto al comportamiento descrito por los Andosoles y otros suelos presentes en la zona de estudio (Leptosol, Cambisol, Regosol) con características ándicas, se observó que por su textura tienden a mantener la humedad una vez que son hidratados lo cual genera que sean suelos con alto potencial para el desarrollo de procesos de remoción súbitos. Estos resultados son similares a los encontrados por Terribile et al. (2007) en la región volcánica

de Italia, en la región montañosa de Kenia (Ngecu & Ichang'i, 1999) y en el Sistema Volcánico Transversal de México (Flores & Alcántara-Ayala, 2012).

Cabe resaltar, que un hallazgo importante de este trabajo, que no se ha reportado en alguna investigación, versa sobre la dinámica de los PRMC en zonas volcánicas. Éste consistió en entender el efecto del desarrollo de un PRMC sobre andosoles ócricos (jóvenes y enterrados), el cual por su velocidad y magnitud genera la remoción del suelo superficial, de su material parental y de los horizontes superficiales del suelo enterrado. Esta dinámica puede generar condiciones adversas para la formación de suelo y por lo tanto para el establecimiento de la vegetación, generando superficies que duren más tiempo desprovistas de vegetación, aumentando así su susceptibilidad a ser removidas nuevamente.

El comportamiento similar de la cronología de referencia y la de árboles impactados se debe a que durante un largo periodo de tiempo (1966 al 1996) los árboles utilizados para generar las cronologías (referencia y de árboles impactados) estuvieron expuestos a las mismas condiciones climáticas, estas condiciones fueron en un inicio más húmedas, teniendo un descenso hacia el año 1997, esto coincide con lo expuesto por Carlón-Allende et al. (2021) en la cronología de *Pinus hartwegii* realizada para el estratovolcán Pico de Tancítaro. También, hay coincidencia con lo encontrado en otras zonas montañosas donde los años por arriba de la media (valor 1) se asocian a periodos de mayor humedad, permitiendo que los árboles se encuentren en mejores condiciones para crecer y desarrollar un anillo más ancho, mientras que aquellos que están por debajo de la media, puedan representar temporadas de sequía (Carlón-Allende et al. 2021; Vázquez & Franco, 2022).

Sin embargo, el comportamiento diferente encontrado del año 1997 al 2009 sugiere que los árboles de la cronología de referencia estuvieron sometidos a condiciones más extremas durante este periodo, mientras que los árboles que se encontraban en los alrededores del ahora PRMC “La Culebra”, estuvieron expuestos a mejores condiciones ambientales (mayor precipitación y temperaturas templadas), provocando un mayor crecimiento de sus anillos, este comportamiento climático se explica y confirma con lo expuesto por Carlón-Allende et al. (2021) en el estudio dendroclimático realizado en el estratovolcán Pico de Tancítaro. Posteriormente, del 2010 al 2015 las cronologías tuvieron un comportamiento similar indicando un aumento en el ancho de anillo, lo cual sugiere condiciones más húmedas, asociadas a precipitaciones de invierno y primavera (Carlón-Allende et al., 2021), resalta que en el año 2015 el ancho de anillo presentó valores altos debido a los efectos del huracán Patricia.

El año 2016 fue un año muy cálido y seco; para la zona de estudio sólo se reporta una precipitación anual de entre 600 y 800 mm (SMN, 2016; Carlón-Allende et al., 2021), debido a esto se mostró una disminución del ancho de anillo en la cronología de referencia y en la cronología de árboles impactados. Sin embargo, la cronología de árboles impactados mostró una mayor supresión en el ancho de anillo, lo cual se debe al efecto del proceso de remoción en masa complejo “La Culebra”. Cabe señalar que el incremento del ancho de anillo en los árboles en 2017 es una respuesta esperable ante la ausencia de competencia por la muerte de árboles por el evento de 2016 (Stoffel et al., 2010; Stoffel & Bollschweiler, 2008). Este

comportamiento indica que los árboles muestreados tuvieron una respuesta evidente disminuyendo su tamaño y en los años posteriores al evento (2017-2018) un gran crecimiento, lo que puede deberse a la compensación del árbol para sanar el impacto o a la disminución en la competencia con otros individuos arbóreos que fueron removidos por el evento; lo anterior coincide con el comportamiento de otras cronologías de eventos de remoción en masa detonados por huracanes en zonas montañosas de México como en la Malinche (Franco et al., 2019), en la Sierra Norte de Puebla (Pablo et al., 2020), y en la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca (De la Peña et al., 2023).

Cabe resaltar que el menor valor reportado en la cronología de árboles impactados (aún menor que el del 2015), refiere al año 1994, lo cual sugiere que en el sitio pudo ocurrir un evento de remoción en masa, que pudo ser detonado por la depresión tropical Cinco ocurrida del 29 al 31 de agosto, registrando de 60 a 125 mm de lluvia acumulada (SMN, 2024) en el estratovolcán Pico de Tancítaro, no obstante, en el inventario de procesos de remoción en masa del volcán Pico de Tancítaro de Valdés et al. (2022) no se reporta alguna cicatriz anterior a 1995 en la zona.

Los valores de intercorrelación para las cronologías desarrolladas (referencia y de árboles impactados) fueron cercanos a 0.5, clasificándolas como altas según Franco et al. (2018) en su estudio para las zonas montañosas del centro de México; lo cual indica que las cronología de referencia construida con *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* (0.48), y la cronología de eventos construida con *Abies religiosa* (0.52), tienen gran confiabilidad para el desarrollo de estudios dendrogeomorfológicos, esto coincide con lo encontrado por Vázquez & Franco (2022), en su trabajo en el estratovolcán Pico de Orizaba (*Pinus hartwegii* (0.5) y *Abies religiosa* (0.62)); y con lo encontrado por De la Peña (2023) en la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca (*Abies religiosa* (0.42)).

El análisis de las reacciones de los árboles muestreados mediante FHAES indica que el único año de registro del evento fue el 2016, estando presente en más del 90 % de las series dendrocronológicas, este comportamiento fue verificado a través del índice de Shroder, el cual fue muy alto (96 %). Estos resultados sugieren que los árboles muestreados presentan una señal clara del evento desencadenado por el huracán Patricia en la madera temprana del año 2016. La aplicación del índice de Shroder permitió constatar con certeza que los ductos de resina traumáticos identificados en las muestras fueron provocados por el proceso de remoción en masa del 2015 y descartar los eventos que fueron registrados por árboles que no cumplieron con el umbral de certidumbre, por lo que al sólo ser válido el registro del 2016 no fue posible realizar el análisis de frecuencia, pero si constatar el potencial de *Abies religiosa* para el desarrollo de análisis dendrogeomorfológicos. Esta evidencia es respaldada también por el inventario de procesos de remoción en masa en el estratovolcán Pico de Tancítaro de Valdés et al. (2022), el cual muestra que en la zona de estudio no existen cicatrices generadas por procesos de remoción en masa anteriores al evento del 2015.

Lo anterior comprueba el planteamiento de que los ductos de resina traumáticos son las respuestas más comunes encontradas en *Abies religiosa* (Bollschweiler et al., 2007; Vázquez & Franco, 2022; De la Peña, 2023). Además de constatar su validez al ubicarse

entre los rangos de certidumbre del índice de Shroder (10 % al 40 %) para evaluar procesos de remoción en masa (Butler & Stoffel, 2013), los datos encontrados coinciden con lo hallado en otras investigaciones realizadas en zonas montañosas donde se consideró un rango de certidumbre del 30% (Corominas & Moya, 1999; Stefanini, 2004).

Los árboles más longevos se ubicaron en la parte alta y media del proceso de remoción en masa complejo, y los árboles más jóvenes en la parte baja, esto se debe a que en el área donde ocurrió el evento se lleva a cabo manejo forestal sustentable y la zona baja o de acumulación al ser más accesible representa un área con mayor potencial para ser aprovechada. Este comportamiento también puede deberse a que la zona de estudio forma parte del Área Natural Protegida “Área de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancítaro” que está regulada por su plan de manejo; el plan permite que la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro realice manejo forestal sustentable (CONANP, 2014; Velázquez et al., 2003). Es decir, se posibilita la extracción de árboles con potencial maderable en zonas accesibles, lo cual genera que los árboles con potencial forestal puedan ser aprovechados dando como resultado que sólo algunos árboles longevos sobrevivan en zonas de mayor accesibilidad.

El análisis de magnitud mostró que el mayor número de impactos se presentó en la parte media y baja del PRMC, y que el menor número se concentra en la parte alta. El alto y ancho de las cicatrices muestra un comportamiento similar registrando los valores más altos en la parte media y baja del PRMC, y los bajos en la parte alta. El patrón descrito corresponde con el comportamiento natural de los procesos de remoción en masa complejos que se constituyen de deslizamientos y flujos (Cruden & Varnes, 1996; Highland & Brobrowsky (2008), en los cuales los escombros resultantes de la zona de desprendimiento toman velocidad avanzando y acumulándose en las zonas medias y bajas, generando mayor daño a la vegetación aledaña que el causado en la zona de desprendimiento. Este comportamiento coincide con lo encontrado en el estudio de lahares en el estratovolcán de Colima (Franco et al., 2018), con el estudio de flujos de escombros en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (De la Peña et al., 2023); y difiere de los resultados encontrados en el estudio de caída de rocas en el estratovolcán Cofre de Perote (Franco et al., 2017) y en la Sierra Norte de Puebla (Pablo et al., 2020), donde los árboles con menos impactos se ubican en la zona más alejada al escarpe, esto puede ser debido a que se trataba de otro tipo el evento geomorfológico (Cofre de Perote) o no fue tan intenso (Sierra Norte de Puebla).

El volumen calculado para el PRMC “La Culebra” y su velocidad de ocurrencia considerada como extremadamente rápida a rápida (Valdés et al., 2022), indican que este proceso es un evento que puede considerarse de alta peligrosidad, ya que modificó la morfología del relieve (laderas y valles), la cobertura natural (bosque mixto y de oyamel), y afectó la vida silvestre que en ella vivía, coincidiendo con los efectos ambientales señalados por Highland y Bobrowsky (2008). Además, considerando su velocidad de ocurrencia puede ser considerado como de alto riesgo, ya que la capacidad de respuesta de la población ante este evento sería nula, evitando su manejo (Hungry et al., 2014), causando afectaciones severas a la infraestructura o asentamientos humanos ubicados en las superficies expuestas a su paso.

El comportamiento anterior coincide con lo encontrado en otras investigaciones que midieron el volumen de flujos de detritos en la Sierra de Angangueo (vol. 697,346 m³) (Alcántara-Ayala *et al.*, 2012), y de deslizamientos en la Sierra de Guerrero (vol. 125,000 m³) (Alcántara-Ayala *et al.*, 2017).

Los resultados encontrados a partir de la caracterización geomorfológica a detalle, la descripción de la estructura del paisaje, de las reacciones de los árboles y de la magnitud a partir del análisis dendrogeomorfológico pueden aportar a la evaluación del peligro por PRM, tal como se ha realizado en otras investigaciones de zonas montañosas tales como la Sierra Norte de Puebla (Pablo *et al.*, 2020), el estratovolcán Pico de Orizaba (Vázquez & Franco, 2022), y la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (De la Peña *et al.*, 2023).

Conclusiones

La descripción de la estructura del paisaje (rocas, suelos y vegetación) permitió caracterizar con detalle los condicionantes del PRMC y entender la dinámica anterior y posterior a la ocurrencia del evento, destacan los hallazgos encontrados en torno al comportamiento de suelos volcánicos enterrados que son afectados por PRM en montañas intertropicales.

El análisis dendrogeomorfológico realizado con *Abies religiosa* conforme al modelo “proceso, evento, respuesta”, permitió identificar que el PRMC, generó impactos en la base de los tallos de los árboles, cuya respuesta fueron los ductos de resina traumáticos, lo cual confirma el alto potencial de la especie para registrar diferentes tipos de eventos geomorfológicos (deslizamientos, flujos y procesos de remoción en masa complejos) y por lo tanto su potencial para el desarrollo de estudios dendrogeomorfológicos.

El año 2016 fue donde se identificaron más respuestas en el crecimiento de los anillos, esto fue comprobado con 96% en el índice de Shroder, siendo el único año por arriba del umbral (30%). El análisis de magnitud permitió interpretar que la zona de desprendimiento se generaron menos impactos en los árboles en comparación con la zona de acumulación, teniendo esta última mayor potencial para el muestreo dendrogeomorfológico, con lo que se interpreta que las zonas con más árboles impactados representan las áreas de mayor peligrosidad ante la ocurrencia de este tipo de PRM.

Finalmente, se resalta que esta investigación respondió satisfactoriamente al objetivo principal, que fue reconstruir espacio-temporalmente el PRMC “La Culebra”. Esto permitió generar datos espaciales y temporales del evento, además de señalar la gran utilidad y contribución de estos estudios para el entendimiento de la evolución y dinámica de los procesos de remoción en masa complejos. Esto constituye un aporte fundamental para el estudio del peligro por PRM principalmente donde existe escasez de registros, siendo la base para el desarrollo de estudios sobre exposición, vulnerabilidad y riesgo en el estratovolcán Pico de Tancítaro. Aportando un estudio robusto que apoye la gestión integral del riesgo de desastres ante procesos de remoción en masa en montañas intertropicales.

Referencias

- Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno?. Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*. 41:7-25. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018846112000000100002&lng=es
- Alcántara-Ayala, I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology*. 61(1-2):19-40. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.11.004>
- Alcántara-Ayala, I., López, G.J. & Garnica, R.J. (2012). On the landslide event in 2010 in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Angangueo, Michoacán, Mexico. *Landslides*. 9:263-273. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0291-7>
- Alcántara-Ayala, I., Garnica, P.R.J., Domínguez, M.L., González, H.A.E. & Calderón, V.A. (2017). The La Pintada landslide, Guerrero, Mexico: hints from the pre-classic to the disasters of modern times. *Landslides* 14:1195-1205. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0808-9>
- Altman, J., Dolezal, J. & Cizek, L. (2016). Age estimation of large trees, new method based on partial increment core tested on an example of veteran oaks. *Forest Ecology and Management*. 380:82-89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.033>
- Arunachalam, A., Arunachalam, K., Bhattacharjee, A. & Nag, A. (2000). Natural revegetation on landslides in humid tropical Arunachal Pradesh: community dynamics and soil properties. *Journal of Tropical Forest Science*. 12(4):682-696. <https://www.jstor.org/stable/43582402>
- Bollschweiler, M., Stoffel, M., Ehmis, M. & Monbaron, M. (2007). Reconstructing spatio-temporal patterns of debris-flow activity using dendrogeomorphological methods. *Geomorphology*. 87(4):337-351. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.002>
- Butler, D.R. & Stoffel, M. (2013). John F. Shroder, Jr.'s 1978 and 1980 papers on dendrogeomorphology. *Progress in Physical Geography*. 37(5):717-721. <https://doi.org/10.1177/0309133313501107>
- Carlón-Allende, T., Villanueva, D.J., Soto, C.G., Mendoza, M.E. & Macías, J.L. (2021). Tree rings as indicators of climatic variation in the Trans-Mexican Volcanic Belt, central Mexico. *Ecological Indicators*. 120 (106920). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106920>
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2014). Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancitaro. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=78®=6>
- Cook, E. R. & Holmes, R. H. (1986). Guide for computer program ARSTAN. Laboratory of Tree Ring Research. The University of Arizona. Tucson, AZ. <https://www.ltr.arizona.edu/~sheppard/DISC2019/arstan.txt>
- Corominas, J. & Moya, J. (1999). Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*. 30(1-2):79-93. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00046-X)
- Corominas, J. & Moya, J. (2010). Contribution of dendrocronology to the determination of magnitude-frequency relationships for landslides. *Geomorphology*. 124:137-149. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.001>
- Corona, C., Lopez, S.J. & Stoffel, M. (2014). Defining optimal sample size, sampling design and thresholds for dendrogeomorphic landslide reconstructions. *Quaternary Geochronology*. 22:72-84. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2014.02.006>

- CRED, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters & UNDRR, United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2020). Human cost of disasters. An overview of the last 20 years 2000–2019. United Nations. <https://www.emdat.be/publications>
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996). Landslides Types and Processes. Landslides Investigation and Mitigation. 36-75. Washington, DC. USA. Transportation Research Board. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>
- De la Peña, G.K.A. (2023). Evaluación de peligro por procesos de remoción en masa en laderas asociadas a ambientes montañosos intertropicales. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Enríquez, G.C., Oropeza, O.O. & Ortiz, P.M.A. (2010). Peligros geológico-geomorfológicos. Las cuencas hidrográficas de México. INECC. 38-44.
- Ferrari, L., Orozco, E.T., Manea, V. & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*. 522-523:122-149. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>
- Franco, R.O., Stoffel, M. & Ballesteros, C.J.A. (2019). Reconstruction of debris-flow activity in a temperate mountain forest catchment of central Mexico. *Journal of Mountain Science*. 16(9):2096-2109. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5496-6>
- Franco, R.O., Stoffel, M. & Vázquez, S.L. (2017). Tree-ring based reconstruction of rockfalls at Cofre de Perote volcano, Mexico. *Geomorphology*. 290:142-152. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.003>
- Franco, R.O., Vázquez, S.L., Stoffel, M. & Villanueva, D.J. (2018). Potencial dendrogeomorfológico de coníferas en volcanes del centro de México. *Bosque (Valdivia)*. 39(2):191-204. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002018000200191>
- Flores, P. & Alcántara-Ayala, I. (2012). Susceptibility to shallow landslides of soil in the municipality of Temoaya, Mexico: multicriteria analysis. *Investigaciones geográficas*. 77:31-47. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000100004&lng=es&tlng=en
- Funk, C. C., Peterson, P. J., Landsfeld, M. F., Pedreros, D. H., Verdin, J. P., Rowland, J. D., Romero, B. E., Husak, G. J., Michaelsen, J. C. & Verdin, A. P. (2014). A Quasi-Global Precipitation Time Series for Drought Monitoring. U.S. Geological Survey Data Series, 832, 4. <https://doi.org/10.3133/ds832>
- Gomes, A., Gaspar, J.L., Goulart, C. & Queiroz, G. (2005). Evaluation of landslide susceptibility of Sete Cidades Volcano (S. Miguel Island, Azores). *Natural Hazards Earth Systems Science*. 5:251–257. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-251-2005>
- Griffiths, J. & Whitworth, M. (2012). Engineering geomorphology of landslides. In J. Clague y D. Stead (Eds.), *Landslides: Types, Mechanisms and Modeling* (pp. 172-186). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511740367.016>
- Highland, L.M. & Bobrowsky, P. (2008). The landslide handbook. A guide to understanding landslides. Virginia. U.S. Geological Survey Circular 1325. <https://pubs.usgs.gov/circ/1325/>
- Hincapié, G.E. & Tobón, M.C. (2012). Dinámica del agua en andisoles bajo condiciones de ladera. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 65(2):6765-6777. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472012000200020&lng=en&tlng=es

- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*. 43: 69–78. https://www.ltrr.arizona.edu/~ellisqm/outgoing/dendroecology2014/readings/Holmes_1983.pdf
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*. 11(2):167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica E13B39-Uruapan. Serie III. Escala 1:50,000. México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825003008>
- IUSSWG (International Union of Soil Sciences Working Group). (2015). World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps – Update 2015. World Soil Resources Reports. 106. Italy. Rome. FAO.
- Iverson, R.M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*. 35(3):245-296. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>
- Legorreta, P.G., Bursik, M.I., Zamorano, O.J.J. & Figueroa, G.J.E. (2015). Landslide susceptibility of volcanic landforms in the Río El Estado watershed, Pico de Orizaba volcano, Mexico. *Natural Hazards*. 77:559–574. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1612-2>
- Macías, J.L. & Arce, J.L. (2019). Volcanic Activity in Mexico During the Holocene. In Torrescano-Valle N, Islebe GA and Roy PD (Eds.) *The Holocene and Anthropocene Environmental History of Mexico*. 129-170. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31719-5>
- Mergili, M., Marchant, S. C. I. & Moreiras, S. M. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. 24(2):113-131. <http://dx.doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50211>
- Nakileza, B.R. & Tushabe, H. (2018). Determinants of revegetation on landslide scars in an agro-based socio-ecological system in Bududa, Uganda. *International Journal of Biodiversity and Conservation*. 10(10):444-452. <https://doi.org/10.5897/ijbc2018.1220>
- Ngecu, W. & Ichang'i, D. (1999). The environmental impact of landslides on the population living on the eastern footslopes of the Aberdare ranges in Kenya: a case study of Maringa Village landslide. *Environmental Geology*. 38:259–264. <https://doi.org/10.1007/s002540050423>
- Pablo, P.M.A., Franco, R.F. & Alcántara-Ayala, I. (2020). Debris flows analysis base on dendrochronological approach at Ixcamaxtitlán, Sierra Norte de Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 37(2):109-120. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.2.1556>
- Picarelli, L., Leroueil, S., Olivares, L., Pagano, L., Tommasi, P. & Urciuoli, G. (2012). Groundwater in slopes. In J. Clague y D. Stead (Eds.), *Landslides: Types, Mechanisms and Modeling* (235-251). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511740367.021>
- Robinson, W.J. & Evans, R. (1980). A Microcomputer-Based Tree-Ring Measuring System. *Tree-Ring Bulletin*. 40:59–64. <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/260443/trb-40-059-064.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salinas, J.J.A., Velasco, T.F., Navarro, de L.I., Salinas, J.R.A. & Alva, N.E. (2020). Estimation of rainfall thresholds for shallow landslides in the Sierra Madre Oriental, northeastern Mexico. *Journal of Mountain Science*. 17(7):1565-1580. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6050-2>

- Schraml, K., Oismüller, M., Stoffel, M., Hübl, J. & Kaitna, R. (2015). Debris-flow activity in five adjacent gullies in a limestone mountain range. *Geochronometria*. 42:60–66. <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0007>
- Shroder, J.F. (1980). Dendrogeomorphology: review and new techniques of tree-ring dating, *Progress Physical Geography*. 4(2): 161–188. <https://doi.org/10.1177/030913338000400202>
- Shroder, J.F. (1978). Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*. 9(2):168-185. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(78\)90065-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90065-0)
- Šilhán, S. & Stoffel, M. (2015). Impacts of age-dependent tree sensitivity and dating approaches on dendrogeomorphic time series of landslides. *Geomorphology*. 236:34-43. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.003>
- Šilhán, K., Pánek, T., Hradecký, J. & Stoffel, M. (2015). Tree-age control on reconstructed debris-flow frequencies: examples from a regional dendrogeomorphic reconstruction in the Crimean Mountains. *Earth Surface Processes and Landforms*. 40(2):243-251. <https://doi.org/10.1002/esp.3623>
- Silva, R.G. & Mendoza, R.C.C. (2016). Trabajo Geológico de Campo. <http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/292>
- Slymaker, O. (2010). Mountain hazard. *Geomorphological hazards and disaster prevention* (33–47). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807527>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2024). Lluvias asociadas a ciclones tropicales. Comisión Nacional del Agua. México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/lluvias-asociadas-a-ciclones-tropicales>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2016). Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2016. Comisión Nacional del Agua. México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/reportes-del-clima-en-mexico>
- Stefanini, M.C. (2004). Spatio-temporal analysis of a complex landslide in the Northern Apennines (Italy) by means of dendrochronology. *Geomorphology*. 63(3-4):191–202. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.04.003>
- Stoffel M. & Bollschweiler M. (2008). Tree-ring analysis in natural hazards research an overview. *Natural Hazards Earth Systems Science*. 8:187-202. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-187-2008>
- Stoffel, M., Bollschweiler, M. & Hassler, G.R. (2006). Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity a dendrogeomorphological approach. *Earth Surface Processes and Landforms*. 31:1424-1437. <https://doi.org/10.1002/esp.1363>
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D. R. & Luckman, B. H. (2010): Tree rings and natural hazards: A state-of-the-art. Springer, Heidelberg, Berlin, New York, 505.
- Stoffel, M, Bollschweiler, M., Vázquez, S.L., Franco, R.O. & Palacios, D. (2011). Dendrogeomorphic dating of rockfalls on low-latitude, high-elevation slopes: Rodadero Iztaccíhuatl volcano, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*. 36:1209-1217. <https://doi.org/10.1002/esp.2146>
- Stoffel, M. & Corona, C. (2014). Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Tree-Ring Research*. 70(1):3-20. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-70.1.3>
- Stoffel, M., Conus, D., Grichting, M., Lièvre, I. & Maître, G. (2008). Unraveling the patterns of late Holocene debris-flow activity on a cone in the Swiss Alps: chronology, environment and

- implications for the future. *Global and Planetary Change*. 60(3-4):222-234. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.001>
- Stoffel, M., Schneuwly, D., Bollschweiler, M., Lièvre, I., Delaloye, R., Myint, M. & Monbaron, M. (2005). Analyzing rockfall activity (1600-2002) in a protection forest-a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*. 68(3-4):224-241. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.017>
- Stokes, M.A. & Smiley, T.L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. The University of Chicago Press. 73.
- Terribile, F., Basile, A., De Mascellis, R., Iamarino, M., MAgliulo, P., Pepe, S. & Vingiani, S. (2007). Landslide processes and Andosols: the case study of the Campania region, Italy. In: Arnalds, Ó., Óskarsson, H., Bartoli, F., Buurman, P., Stoops, G., García-Rodeja, E. (eds) *Soils of Volcanic Regions in Europe*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-48711-1_38
- Valdés, C.A.C., Mendoza, M.E., Carlón-Allende, T. & Macías, J.L. (2023). A review of recent studies on landslide hazard in Latin America. *Physical Geography*. 44(3):243-286 <https://doi.org/10.1080/02723646.2021.1978372>
- Valdés, C.A.C., Mendoza, M.E., Carlón-Allende, T. & Macías, J.L. (2022). Multitemporal landslide inventory analysis in an intertropical mountain in central-western Mexico. Basis for hazard management. *Journal of Mountain Science*. 19:1650-1669. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7223-3>
- Vázquez, R., Carlón-Allende, T., García-Tenorio, F. & Mendiola, F. (2023). Numerical modelling of a flash-flood event at Peribán de Ramos, Michoacán (Mexico). *Physical Geography* 44(4):503-529, <https://doi.org/10.1080/02723646.2022.2163539>
- Vázquez, R.M. & Franco, R.O. (2022). Reconstrucción dendrogeomorfológica de procesos de remoción en masa y lahares en las Barrancas Seca y Ojo Salado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones geográficas*. 107:1-20. <https://dx.doi.org/10.14350/ig.60470>
- Velázquez, A., Torres, A. & Bocco, G. (2003). *Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales*. INE-SEMARNAT. México
- Walker, L. & Shiels, A. (2013). *Landslide ecology*. Cambridge University Press. United Kingdom.
- Wang, B., Li, Y., Liu, D. & Liu, J. (2018). Debris flow density determined by grain composition. *Landslides*. 15:1205-1213. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0912-x>

Conclusiones Generales

Esta investigación se desarrolló con un enfoque geográfico multiescalar, representando una contribución sustancial al estudio del peligro por PRM en las zonas intertropicales.

El análisis realizado para la región de América Latina, permitió observar que durante las últimas décadas se tiene un creciente interés por el estudio de estos peligros naturales, siendo México, Brasil, Argentina, Colombia, Costa Rica y Chile los países que más han aportado a la investigación en este tema. Existe la necesidad de abordar temas como peligrosidad, inventarios, factores condicionantes y detonantes, incrementando los aportes de la caracterización, análisis y evaluación de peligros, que permitan abordar etapas más complejas como la vulnerabilidad y riesgo. En consecuencia, es clave incrementar el financiamiento, el soporte de las investigaciones a largo plazo y el fortalecimiento a los grupos de investigación, así como del desarrollo y adecuaciones metodológicas que permitan la generación y análisis de datos espacio-temporales indispensables para el monitoreo y la evaluación de los PRM y el estudio de su peligrosidad. La revisión realizada representa la primera base de datos sobre peligro por PRM para América Latina, la cual señala los avances recientes y las posibles áreas de interés a considerar para el desarrollo de futuros estudios en la zona.

El estudio de los PRM a escala semidetallada (1:50,000), en un ambiente de montaña intertropical, como el estratovolcán Pico de Tancítaro, permitió identificar que mediante la construcción de un inventario multitemporal de procesos de remoción en masa es posible comprender la distribución, la tipología, la velocidad, la composición, los factores condicionantes y los detonantes de este tipo de procesos. El análisis de los factores condicionantes permitió realizar una caracterización detallada e identificar a los conos volcánicos, a las laderas y a los valles de ríos, cubiertos por andosoles y leptosoles, con pendientes mayores a 30°, cubiertos por oyamel y bosque mixto, orientadas al sur, norte y este, como las categorías con mayor importancia relativa para el desarrollo de estudios futuros de susceptibilidad. Las lluvias torrenciales se constituyen como su principal factor detonante, lo cual es indispensable para el abordaje de la peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo de desastre en las montañas intertropicales del centro de México.

Al realizar el análisis del evento de remoción en masa más grande inventariado para el estratovolcán Pico de Tancítaro, a través de su descripción geomorfológica a escala de gran detalle (1:500), la descripción de su estructura paisajística, el análisis dendrogeomorfológico y el cálculo de su volumen, fue posible constatar que el proceso estudiado puede ser clasificado como complejo, ya que estuvo conformado por un deslizamiento traslacional que representa la zona de aporte, que evolucionó a un flujo de escombros que representa la zona de acumulación.

El análisis dendrocronológico permitió identificar que la principal alteración de crecimiento identificada fue ductos de resina traumáticos, los cuales permitieron analizar con detalle el evento del año 2016, lo que se comprobó con el índice de Shroder con un umbral de 30%, confirmando que estas respuestas fueron derivadas del evento de remoción en masa complejo. A partir del análisis de magnitud se identificó que la zona donde se concentra el mayor daño causado por el evento, expresado por el número, ancho y alto de las cicatrices, fue en la de acumulación.

Finalmente se concluye que se dio respuesta satisfactoria a la pregunta de investigación y al objetivo general, ya que a partir de la revisión bibliográfica y de la aplicación de las metodologías antes mencionadas, fue posible generar información base para el abordaje teórico del peligro por procesos de remoción en masa en las zonas intertropicales. Además de contribuir con métodos de

análisis espacio-temporales multiescalar que resaltaron las ventajas del uso de modelos y herramientas de análisis dendrogeomorfológico y cartográfico en la evaluación de peligros. Los modelos son útiles para el desarrollo de estudios de peligrosidad más robustos, abonando al mejor abordaje de otras etapas dentro de la gestión del riesgo de desastres, contribuyendo a la generación de conocimiento aplicado al estudio de los procesos geomorfológicos en zonas de montaña intertropical.