

PELÍGRO VOLCÁNICO Y POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA EN EL MUNICIPIO DE CACAHOATÁN, CHIAPAS, MÉXICO

Sebastián Bue García¹ y Juan Carlos Mora Chaparro^{1*}

RESUMEN

El Complejo Volcánico Tacaná se localiza en el estado de Chiapas, al sur de México, en la frontera con Guatemala. Es un volcán activo que durante su historia ha presentado diferentes tipos de erupciones volcánicas, tanto explosivas como efusivas. Los depósitos en las laderas del volcán son predominantemente de flujos piroclásticos; sobre los que se han establecido 106 localidades, y 50 112 habitantes, en el municipio de Cacaohatán. Se presenta un mapa de peligros volcánicos, generado con la recopilación de las investigaciones y estudios de los autores y otras fuentes. Se consideran la infraestructura, viviendas, vías de comunicación y población expuesta, a cada uno de estos peligros, en caso de reactivarse este complejo. También se presenta el mapa de peligros por fenómenos de remoción en masa en las vías de comunicación; las cuales son consideradas como rutas de evacuación, y que, en una reactivación de este complejo volcánico, con el incremento de la sismicidad, se van a disparar los fenómenos de remoción en masa, que van a impedir la evacuación de la población. Se considera que los pobladores tendrán una mayor exposición a estos fenómenos durante la evacuación, ya que los taludes de las rutas de evacuación son muy inestables.

PALABRAS CLAVES

Rutas de evacuación; Peligro Volcánico; Peligro por Fenómenos de Remoción en masa; Reactivación volcánica; Incremento actividad sísmica; México

VOLCANIC AND MASS WASTING HAZARDS IN THE MUNICIPALITY OF CACAHOATAN, CHIAPAS, MEXICO

ABSTRACT

The Tacaná Volcanic Complex is in the state of Chiapas, in southern Mexico, on the border with Guatemala. It is an active volcano that, during its evolutionary history, has presented different types of volcanic eruptions, both explosive and effusive. Deposits on the slopes of the volcano are predominantly pyroclastic flows; on which 106 localities have been established, counting 50,112 inhabitants in the municipality of Cacaohatán. This study introduces a map of volcanic threats generated with the compilation of investigations and studies from the authors and other sources. It considers the infrastructure, housing, communication routes and exposed population to each one of these dangers, in case this complex is reactivated. A map of threats due to mass removal phenomena in communication routes is also presented, which are considered as evacuation routes in case of a reactivation of this volcanic complex and the increase in seismicity. This considers the phenomena of mass removal triggered by seismicity, which will affect the evacuation of the population. The study finds that the inhabitants have a greater exposure to these phenomena during the evacuation since the slopes of the evacuation routes are very unstable.

KEYWORDS

Evacuation routes; Volcanic hazard; Mass movement hazard; Volcanic reactivation; Increase in seismic activity, Mexico

1. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica UNAM, Unidad Morelia, Morelia, México.

*Autor de correspondencia: jcmora@igeofisica.unam.mx

DOI:

<https://doi.org/10.55467/reder.v7i2.131>

RECIBIDO

2 de noviembre de 2022

ACEPTADO

7 de febrero de 2023

PUBLICADO

1 de julio de 2023

Formato cita

Recomendada (APA):

Bue García, S. & Mora Chaparro, J.C. (2023). Peligro volcánico y por fenómenos de remoción en masa en el municipio de Cacaohatán, Chiapas, México. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 7(2), 168-186. <https://doi.org/10.55467/reder.v7i2.131>



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)

Diseño: Lupe Bezzina

INTRODUCCIÓN

El municipio de Cacaohotán se encuentra localizado en el sureste del estado de Chiapas, en la frontera entre Guatemala y México. Tiene un área de 174 803 km². El territorio del municipio va desde una altitud de 300 msnm, hasta 4 000 msnm en la cima del Volcán Tacaná. El municipio tiene una población de 50 112 habitantes (INEGI, 2020), distribuida en 106 comunidades. El municipio limita con los municipios de Tapachula al oeste, Tuxtla Chico al sur y Unión Juárez al este (Figura 1).



Figura 1. Localización del municipio de Cacaohotán respecto al estado de Chiapas y la República Mexicana
Fuente: Autores, 2023.

El Complejo Volcánico Tacaná ha sido extensamente estudiado en su historia, y en la cartografía de los productos volcánicos asociados a cada uno de los diferentes eventos eruptivos que ha presentado, Macías et al. (2000 y 2005); García-Palomo et al. (2006) y Vázquez et al. (2017, 2019a, 1029b y 2021). Los resultados de esas investigaciones han culminado en el mapa geológico de los productos volcánicos asociados a cada una de sus estructuras, además se han realizado modelaciones de flujos piroclásticos, lahares, flujos de lava y caída de cenizas. Estos resultados han sido utilizados por las autoridades de protección civil del estado de Chiapas, México, para elaborar su plan operativo el sistema Estatal de Protección Civil del Estado de Chiapas (SEPCCH), en caso de una reactivación volcánica, como una medida preventiva (SEPCCh, 2007). En este plan operativo las vías de comunicación; las únicas que existen para conectar a los diferentes poblados de los alrededores del edificio volcánico; han sido identificadas como las rutas de evacuación. Desafortunadamente en una emergencia, estas vías de comunicación no van a cumplir su función; tienen topes, hay tramos de un solo carril, atraviesan poblados y cauces de arroyos, tienen muchas curvas, y en su mayoría tienen taludes de más de 70° de pendiente, y las paredes están compuestas de materiales con un bajo grado de compactación; los cuales en la época de lluvias presentan caídos, rodados, deslizamientos y derrumbes que boquean los caminos y dejan incomunicados los poblados.

En este trabajo, para evaluar el peligro volcánico, se elaboró un mapa con la información cartográfica recopilada de los trabajos de Mercado y Rose (1992), CENAPRED (2001, 2006 y 2018), Macías et al. (2000 y 2005), García-Palomo et al. (2006) y Vázquez et al. (2017, 2019a, 2029b y 2021). El mapa de peligros por fenómenos de remoción en masa se elaboró, en primer lugar, con el mapa de susceptibilidad a la inestabilidad de laderas (muy alta, alta, media, baja y muy baja), después sobre éste se sobrepuso la capa de vías de comunicación; para identificar aquellas que se construyeron en los diferentes tipos de susceptibilidad y finalmente, mediante recorridos de campo se verificaron los taludes dejados por la construcción de las carreteras en las zonas con susceptibilidad media, alta y muy alta; con el objetivo de registrar las manifestaciones de los diferentes fenómenos de remoción en masa que se presentan y cambiar el nivel de susceptibilidad por peligro al identificar los tramos que ya son un peligro.

Para el registro de la vulnerabilidad de la población expuesta, ante los diferentes peligros volcánicos y fenómenos de remoción en masa, al utilizar los caminos como rutas de evacuación, se utilizó la información de la población y de la infraestructura reportada en el último censo de INEGI (2020). Esta información se sobrepuso al mapa de peligro volcánico, principalmente en las áreas de flujos piroclásticos, lahares, caída de cenizas y flujos de lava, para obtener los mapas de peligros volcánicos.

Las poblaciones del municipio se encuentran en las laderas de este complejo y en los valles cercanos a los arroyos y ríos principales, la comunicación entre ellas y la cabecera municipal es a través de carreteras pavimentadas, terracerías y brechas (Figura 2). La construcción de estas vías ha dejado taludes verticales en los depósitos volcánicos de flujos piroclásticos y lahares, principalmente, los cuales en época de lluvias presentan diferentes procesos de remoción en masa que bloquean las mismas, y dejan incomunicados a sus habitantes. También estas vías atraviesan los cauces de los arroyos y de los ríos principales, por lo que en época de lluvias son intransitables por las fuertes corrientes que arrastran materiales, y los depositan en las zonas planas. Ante una reactivación del complejo volcánico, estas carreteras y terracerías, serán las rutas de evacuación.



Figura 2. Fotografías que ilustran el taponamiento de los caminos

Fuente: Autores, 2022.

Nota: Foto de la izquierda son depósitos de derrumbes después de fuertes lluvias (Propiedad de Protección Civil de Cacaohatán) y la foto de la derecha muestra el tamaño de los bloques que caen en el camino.

Antecedentes

La región en la que se encuentra ubicado el Volcán Tacaná ha sido objeto de estudio de diversas disciplinas, desde la descripción de la flora y fauna que se encuentra en el lugar, hasta estudios económico – sociales, los cuales cobran mayor relevancia debido a la posición geográfica en la que se ubica el Complejo Volcánico Tacaná (SEMARNAT, 2013).

Debido a la importancia de la biodiversidad que se encuentra albergada en la región del Volcán Tacaná, desde el año 2000 fue declarado Zona Sujeta a Conservación de manera estatal, y más adelante, el 28 de enero del 2003, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas la declaró Reserva de la Biosfera por parte de la federación (SEMARNAT, 2013).

Los suelos fértiles asociados al clima y a los depósitos volcánicos alrededor del complejo volcánico, además de la flora y la fauna, han propiciado también el desarrollo urbano que, al ser un volcán activo, son vulnerables a los peligros volcánicos ante una reactivación volcánica.

Mercado y Rose (1992) elaboraron un mapa de peligros volcánicos, con técnicas de percepción remota y trabajo de campo. Macías et al. (2000) presenta los resultados de la erupción ocurrida hace 2000 años en el volcán Tacaná, con la cartografía de los flujos piroclásticos y lahares,

asociado a los depósitos Mixcun. En los trabajos de Macías et al. (2005) y García Palomo et al. (2006), se describe la secuencia volcánica y el mapa geológico, en donde definen, que el volcán es un Complejo Volcánico, compuesto de cuatro estructuras alineadas en dirección NE-SW: Chichuj (Talquian), Tacaná, Domo las Ardillas y San Antonio (El Águila).

Macías et al. (2015) presentan un resumen de la historia eruptiva del Complejo Volcánico Tacaná, con los depósitos de flujos de bloques y cenizas asociados a erupciones de hace 42 000, 40 000, 38 000, 32 000, 30 000, 28 000, 26 000, 16 000, 7 500, 6 500 y 2000 años, reportados por diversos autores (Espindola, 1989; Macías et al., 2000; Mora et al., 2004; García-Palomo et al., 2006).

Macías et al. (2015), mencionan que todas estas erupciones depositaron sus materiales en los cauces de los tributarios y de los ríos principales que descienden del volcán, como son el Coatán, Cahoacán y Mixcun, los cuales en época de lluvias produjeron diferentes lahares. Un ejemplo de los depósitos de un lahar, se observó en el área prehispánica de Izapa, la cual fue abandonada aproximadamente en el siglo primero D.C., asociado a la erupción peleana (1 950 años) (Macías et al., 2000).

Respecto a los peligros por fenómenos de remoción en masa e inestabilidad de laderas:

Macías et al. (2000), presentan deslizamientos y flujos de escombros en la parte noroeste del Tacaná, y mencionan que la inestabilidad de laderas en esta zona es porque presentan paredes verticales y alteración hidrotermal. El Atlas de Riesgos de Cacaohotán (2011), presenta mapas de susceptibilidad, y los consideran como mapas de riesgo por deslizamientos.

El Plan Operativo del Volcán Tacaná, realizado por el Sistema Estatal de Protección Civil de Chiapas (SEPCCh, 2007), no toma en cuenta los peligros por fenómenos de remoción en masa.

Geología local

García-Palomo et al. (2006), describen que el Complejo Volcánico Tacaná, dividido en 6 unidades estratigráficas reconocibles. La más antigua la conforma el basamento (esquistos y gneises), de rocas metamórficas del mesozoico, las cuales fueron afectadas por dos intrusiones magmáticas en el cenozoico. Estas intrusiones ígneas forman parte del Batolito Chiapaneco; que es el basamento regional y está constituido por granitos y granodioritas; las cuales han sido expuestas a metamorfismo dinámico a lo largo de grandes fallas tectónicas (Múgica, 1987). El primer pulso magmático que formó granitos y dioritas, ocurrió durante el eoceno tardío al oligoceno temprano, mientras que el segundo pulso magmático dio origen a rocas de composición tonalítica y granodiorítica, del mioceno temprano, al mioceno medio (Mujica, 1987).

Sobre las unidades más antiguas se encuentra la secuencia San Rafael – Chanjalé, la cual está constituida por 3 calderas (Sibinal, Chanjalé y San Rafael), que tuvieron origen por un evento magmático del plioceno al pleistoceno (García-Palomo et al., 2006). La caldera San Rafael está formada principalmente por depósitos ignimbríticos y flujos de lava, la caldera Chanjalé en cambio, se compone de unidades de lava y flujos piroclásticos, así como flujos de detritos, mientras que la caldera Sibinal se forma principalmente por flujos de lava andesítica (García-Palomo et al., 2006) (Figura 3).

Sobre yace a estas calderas el Complejo Volcánico Tacaná, el cual se divide en 4 secuencias, desde el pleistoceno a la actualidad (Chichuj, Tacaná, Las Ardillas y San Antonio) (Macías et al., 2005; García-Palomo et al., 2006). El volcán Chichuj posee una estructura de colapso en su flanco oeste obstruida por el Tacaná, y está conformado principalmente por secuencias de flujos de lava, depósitos de flujos de bloques y cenizas, depósitos de avalanchas, y brechas volcánicas. Por su parte, el volcán Tacaná está compuesto por unidades de flujos de lava, depósitos de avalancha, flujos de bloques y cenizas, depósitos de caída y depósitos de lahar. El domo Las Ardillas está constituido por lavas andesíticas, mientras que el volcán San Antonio está formado por un domo de lavas andesíticas y depósitos de flujos de bloques y cenizas, así como depósitos de avalancha (Macías et al., 2015).

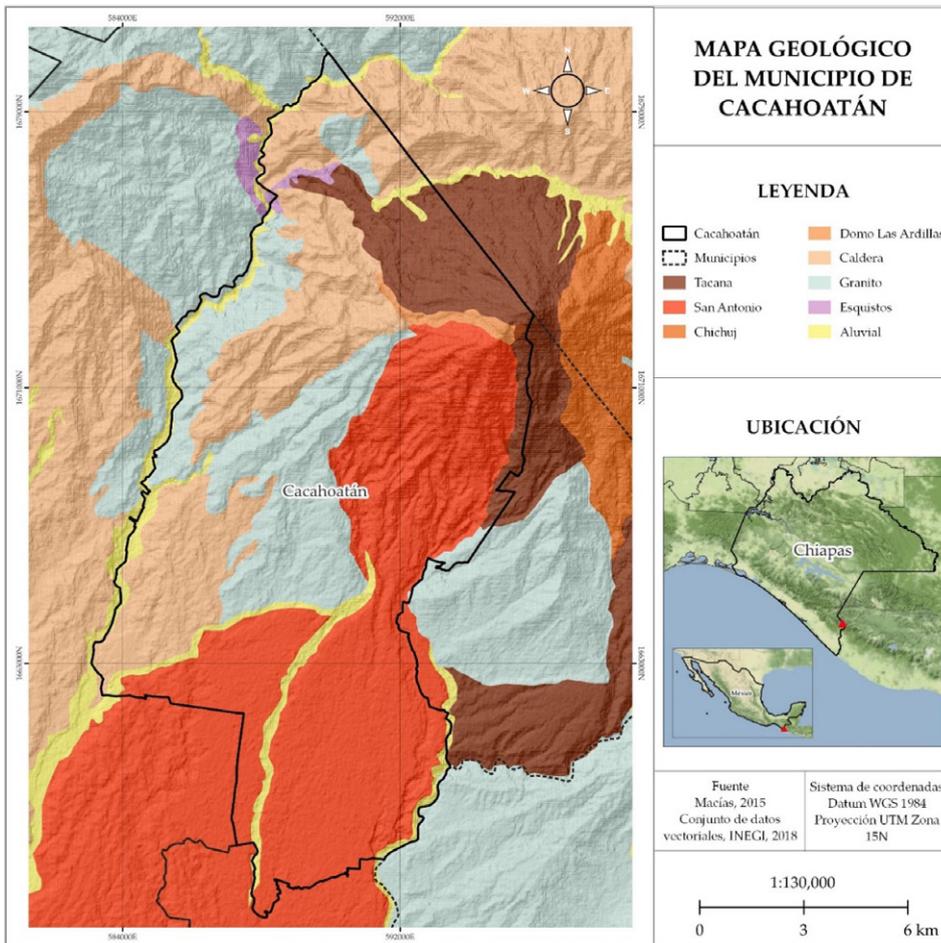


Figura 3. Mapa geológico del municipio de Cacaohotán, Chiapas
Fuente: Autores, 2023, basado en Macías et al. (2015).

METODOLOGÍA

Mapa de peligro volcánico

El mapa de peligros se elaboró mediante la recopilación de la cartografía existente en bibliografía, con lo que se procedió a realizar un nuevo mapa con la sobreponiendo la cartografía de mapas anteriores.

Mapa de susceptibilidad a inestabilidad de laderas

Para realizar el mapa de susceptibilidad a inestabilidad de laderas, se utilizó la plataforma del programa QGIS 3.22.11. Para éste, fue indispensable obtener el inventario de los fenómenos de remoción en masa, los mapas temáticos, los mapas geomorfométricos y el análisis de frecuencias. Posteriormente se procedió a transformar la información vectorial, (mapas de geología, geomorfología, uso de suelo y vegetación y edafología) a formato ráster, con la misma resolución espacial del modelo digital de elevación, con el que se generaron los mapas geomorfométricos (12.5 metros).

Mapa de peligros por Fenómenos de Remoción en Masa (FRM)

Para conocer los principales factores que detonan los fenómenos de remoción en masa en las vías de comunicación de la región del Complejo Volcánico Tacaná, se realizó un extenso trabajo en campo para conocer las características de los taludes en los caminos que conectan los poblados de la región. El trabajo de campo verifica qué tanto se han alterado las condiciones naturales del terreno, de modo que, las zonas identificadas con diferente nivel de susceptibilidad, al ser analizadas en campo y registrar si sus condiciones naturales fueron alteradas con la construcción de la vía de comunicación, pueden pasar de susceptibles a zonas de peligro. Esto último, por la existencia de fenómenos de remoción en masa que afectan a la población.

Se realizaron recorridos por los diferentes caminos y veredas que conectan a los poblados, donde se hicieron observaciones y se tomaron evidencias fotográficas georreferenciadas de las rutas y los FRM observados. El objetivo de este recorrido fue conocer los caminos que comunican a las distintas localidades, identificar las principales causas que aceleran los movimientos en masa, y evaluar la factibilidad de que los caminos actuales puedan ser utilizados como rutas de evacuación, en un escenario de reactivación volcánica.

Enseguida se generaron los mapas de precipitación máxima mensual, y la distancia a vialidades, se les asignó un peso por clase y por mapa, y se combinaron, generando así el mapa de factores detonantes. Este mapa se cruzó con el mapa de susceptibilidad para crear el mapa de peligros por fenómenos de remoción en masa. Y se hizo una validación del modelo de peligro con los movimientos en masa levantados en campo, obteniendo el área bajo la curva.

Posteriormente se realizó una intersección del mapa de peligros con la capa de vialidades, para generar el mapa de peligro por movimientos en masa por vialidades, analizando los kilómetros y tipos de vialidades para cada grado de peligro.

Para elaborar el mapa de peligro por fenómenos de remoción en masa se utilizaron el mapa de susceptibilidad, los mapas de los factores detonantes y un extenso trabajo.

El mapa de susceptibilidad se obtuvo con el método de análisis multicriterio, el cual consiste en la sobreposición de mapas, para la identificación de áreas con condiciones específicas (López - Blanco, 2005). El mapa de susceptibilidad se elaboró utilizando como factores la geología, edafología, geomorfología, uso de suelo, pendiente, orientación, curvatura e hipsometría. Mediante el proceso de jerarquía analítica (AHP, por sus siglas en inglés), desarrollado por Saaty (1980), se determinaron los pesos a partir de un inventario de movimientos en masa, en donde se calculó la densidad de eventos presentada para cada mapa, y posteriormente se determinó el peso de las variables al realizar una combinación por pares entre cada factor, generando un ratio de consistencia, para verificar que los valores fueran congruentes (Palacios, 2019).

Con base en el mapa de susceptibilidad se realizaron recorridos de campo para verificar las condiciones de las vías de comunicación y la inestabilidad de los taludes. Basándonos en los registros de campo y los reportes de fenómenos de remoción identificados por la protección civil de Cacahoatán se obtuvo el mapa de Peligros por Fenómenos de Remoción en Masa con niveles de peligro alto, medio y bajo, en las vías que comunican a los poblados de la región y que están identificadas como las rutas de evacuación, ante una reactivación de la actividad volcánica en el Complejo Volcánico Tacaná.

RESULTADOS

Mapa de peligro volcánico

El mapa de peligros se elaboró mediante la recopilación de la cartografía existente de Mercado y Rose (1992), las simulaciones numéricas generadas por CENAPRED (2001, 2006 y 2018), el mapa de flujos piroclásticos de Macías et al. (2000) y las simulaciones de caída y flujos de bloques y cenizas de Vázquez et al. (2019 y 2021). Este mapa se hizo así, con el objetivo de tener la mejor representación espacial de las zonas en donde es más probable que se generen los nuevos depósitos volcánicos, debido a los registros históricos, y a la migración de la actividad volcánica hacia el suroeste (Macías et al., 2005) (Figura 4).

Vulnerabilidad

En esta investigación tomamos la definición de vulnerabilidad, como la propensión de los sistemas expuestos (asentamientos humanos, infraestructura), a ser dañados por el efecto de un fenómeno perturbador. Los fenómenos perturbadores son el volcánico y los fenómenos de remoción en masa, por lo que se tomaron los datos de población, viviendas, vialidades e infraestructura, como los sistemas vulnerables expuestos a esos peligros de acuerdo con el censo de INEGI (2020).

El municipio de Cacahoatán cuenta con un total de 12 144 viviendas distribuidas en 106 comunidades, la población total es de 50,112 habitantes (48.7% hombres y 51.3% mujeres) (Figura 5). En el municipio hay 16 centros de asistencia médica, 92 escuelas, 14 instalaciones deportivas o recreativas, 40 instalaciones gubernamentales y 150 templos (Figura 5).

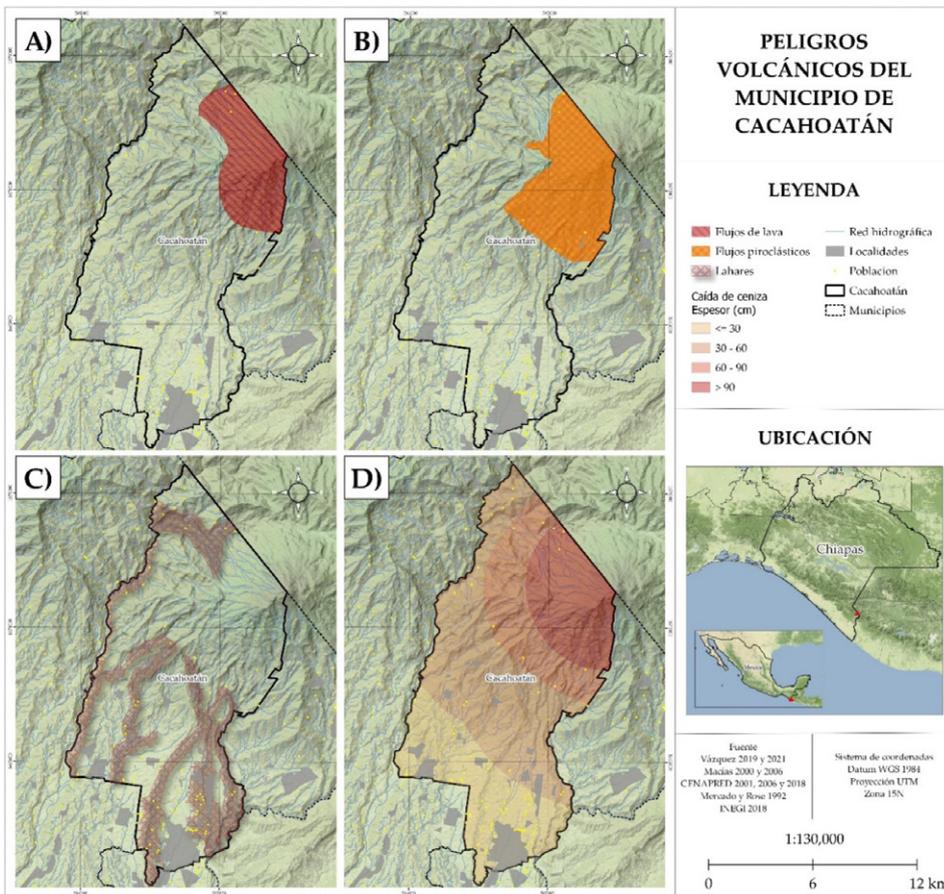


Figura 4. Mapa de peligro volcánico

Fuente: Autores, 2023, basado en Mercado y Rose, 1992; Macías (2000, 2005 y 2006), CENAPRED (2001, 2006 y 2018) y Vázquez (2019 y 2021).

Nota: Peligro por flujos de lava (A), flujos piroclásticos (B), lahares (C) y caída de cenizas (D).

Las vialidades se obtuvieron de la Red Nacional de Caminos (2021), así como de información recolectada en campo con ayuda de GPS. Las vías de comunicación se clasificaron en avenidas, calles, caminos y carreteras, con una longitud total de 144.3 km, donde las carreteras y caminos tienen la mayor longitud total con 64.4 km y 62.7 km respectivamente. Las calles cuentan con una longitud total de 9.7 km, mientras que las avenidas tienen 7.5 km y por último las veredas cuentan con 6.9 km mapeados, sin embargo, en las zonas más accidentadas del volcán existen más veredas (Figura 5).

Mapa de peligros por flujos piroclásticos y lahares.

Los mapas de peligros por flujos piroclásticos y lahares se obtuvieron sobreponiendo las localidades con información de habitantes y viviendas, la infraestructura y las vialidades en cada una de las áreas de peligro (Figura 6). Lo anterior se realizó debido a que si se presenta una nueva actividad volcánica, los flujos piroclásticos y lahares van a dirigirse en la misma dirección que muestran las simulaciones numéricas generadas o de acuerdo a los depósitos cartografiados en erupciones anteriores, como se muestra en el mapa de peligros (Mercado y Rose, 1992; Macías (2000, 2005 y 2006), CENAPRED (2001, 2006 y 2018) y Vázquez (2019 y 2021). Por lo tanto, las viviendas, los habitantes, las vialidades y la infraestructura localizadas en esas áreas son vulnerables al estar expuestas ante estos fenómenos volcánicos. De esta forma se tiene el peligro y la vulnerabilidad expuesta ante cada uno de estos eventos.

En el municipio de Cacaohotán existen un total de 15 017 viviendas en 106 localidades, de las cuales, 353 viviendas de 8 localidades, están expuestas a flujos piroclásticos y 1 897 viviendas de 31 localidades, están expuestas a lahares (Figura 6 y 7).

La vulnerabilidad social expuesta (población expuesta) a flujos piroclásticos es de 1 530 pobladores distribuidos en 8 localidades, y 6 373 en 31 localidades, están expuestos a lahares (Figura 5 y 6).

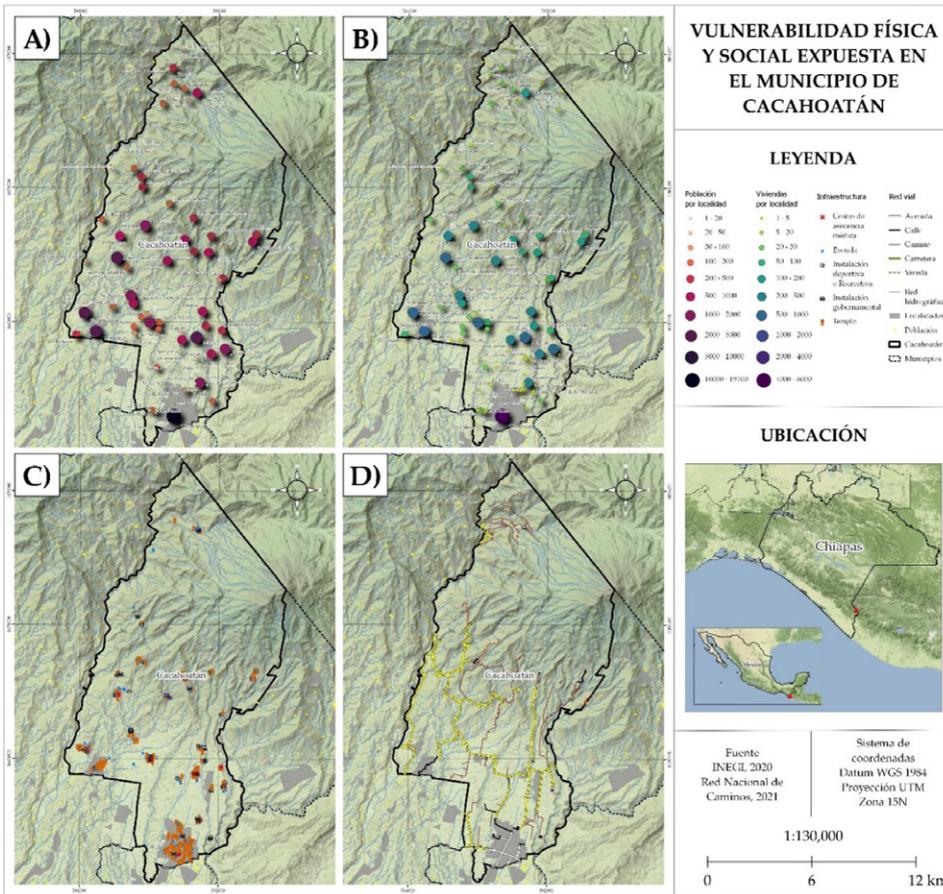


Figura 5. Mapa que muestra la vulnerabilidad social y física expuesta. Fuente: Autores, 2023, basado en datos del censo INEGI (2020) y Red Nacional de Caminos (2021). Nota: A) Población, B) Vivienda, C) Infraestructura, y D) Vías de comunicación.

La red vial del municipio de Cacahoatán expuesta a flujos piroclásticos es de calles 1.35 km y caminos 3.2 km. Mientras que ante los lahares están expuestas 0.4 km de avenidas, 1.63 km de calles, 7.6 km de caminos y 16.2 km de carreteras (Figura 6 y 7).

Respecto a la infraestructura expuesta a flujos piroclásticos, se encuentra 1 centro de asistencia médica, 7 escuelas, 3 instalaciones gubernamentales y 7 templos. En el caso de un lahar, están expuestos 11 centros de asistencia médica, 36 escuelas, 13 instalaciones deportivas, 19 instalaciones gubernamentales y 57 templos (Figura 6 y 7; Tabla 1).

Elemento vulnerable/peligros	Flujos piroclásticos	Lahares
Localidades	8	31
Viviendas	353	1897
Población	1530	6373
Vialidades		
Avenidas (km)	-	0.4
Calle (km)	1.35	1.63
Camino (km)	3.2	7.6
Carretera (km)	-	16.2
Infraestructura		
ros de asistencia medica	1	11
Escuelas	7	36
deportivas o recreativas	-	13
Instalaciones gubernamentales	3	19
Templos	7	57

Tabla 1. Localidades, viviendas, población, vialidades e infraestructura vulnerable al peligro volcánico. Fuente: Autores, 2023.

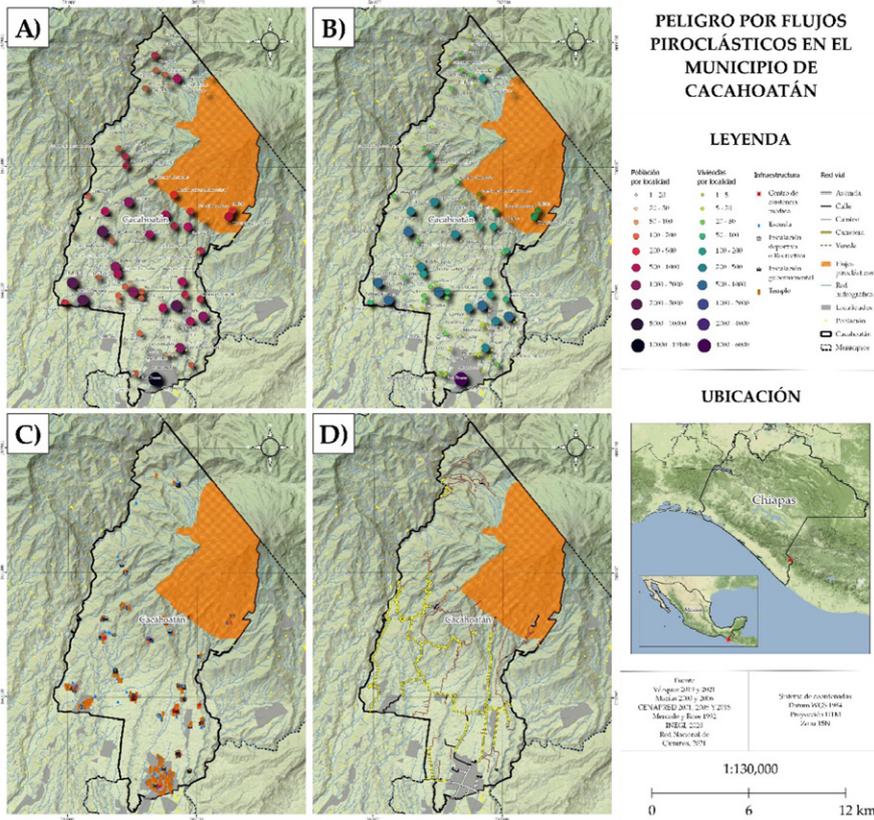


Figura 6. Mapas de peligros por flujos piroclásticos para el municipio de Cachaotán, Chiapas. Fuente: Autores, 2023. Nota: A) Población expuesta por localidad, B) Viviendas expuestas, C) Infraestructura expuesta, y D) Vialidades expuestas.

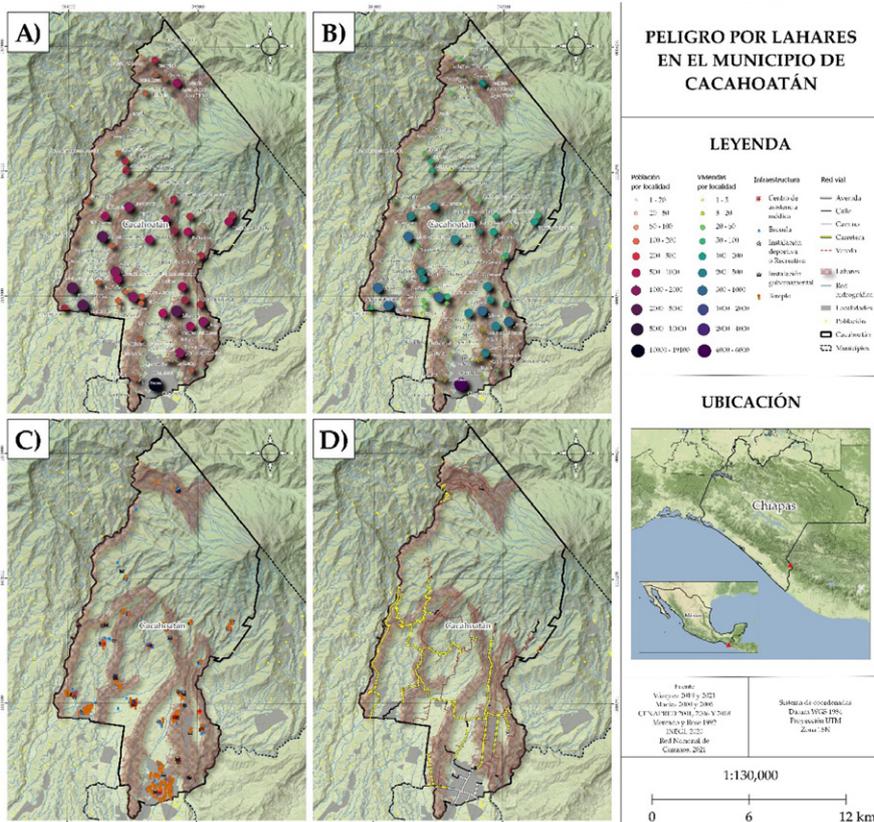


Figura 7. Mapas de peligros por lahares para el municipio de Cachaotán, Chiapas. Fuente: Autores, 2023. Nota: A) Población expuesta por localidad, B) Viviendas expuestas, C) Infraestructura expuesta, y D) Vialidades expuestas.

Mapa de peligros por flujos de lava

En el Complejo Volcánico Tacaná se han identificado coladas de lava andesítica y dacítica provenientes tanto del flanco norte, como del sur. Las coladas tienen un espesor de 20 a 40 m y una extensión de 2,500 m en el flanco norte, y 4,000 m en el flanco sur, con anchura de 1,000 y 1,100 m respectivamente (Mercado y Rose, 1992).

Los flujos de lava en el municipio de Cacaohatán afloran principalmente en la zona norte del municipio, por lo que, de acuerdo con la cartografía de antiguos depósitos de lava observados por Mercado y Rose (1992), el comportamiento de futuras coladas, tenderá a ser de movimiento lento, caracterizadas por flujos de lava en bloques y considerable espesor, con barreras topográficas que protegen al Sibinal (Figura 8). Las viviendas expuestas al fenómeno de flujo de lava son 16 en 3 localidades. La población que vive en las localidades expuestas al flujo de lava son 82 personas (Figura 7). La red vial expuesta por flujos de lava es de 0.7 km de caminos y 0.2 km de veredas, mientras que para las avenidas, calles y carreteras no habría afectaciones (Figura 8; Tabla 2).

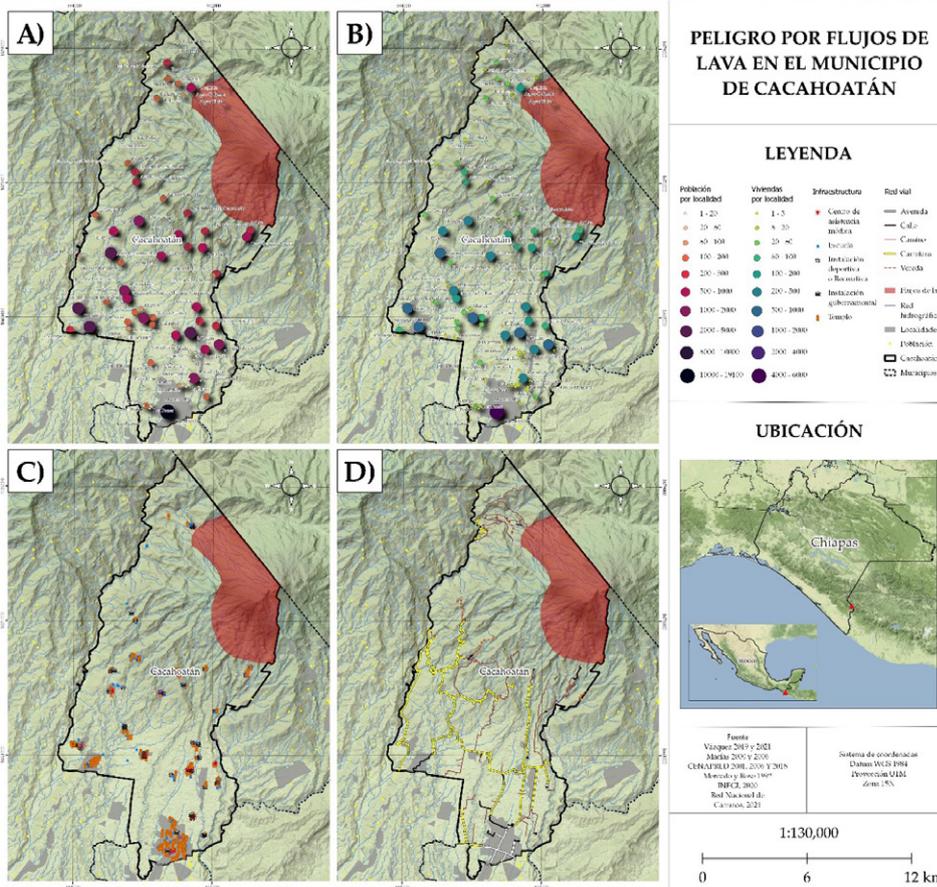


Figura 8. Mapas de peligros por flujo de lava en el municipio de Cacaohatán, Chiapas. Fuente: Autores, 2023. Nota: A) Población por localidad expuesta, B) Viviendas expuestas, C) Infraestructura expuesta, y D) Vialidades expuestas.

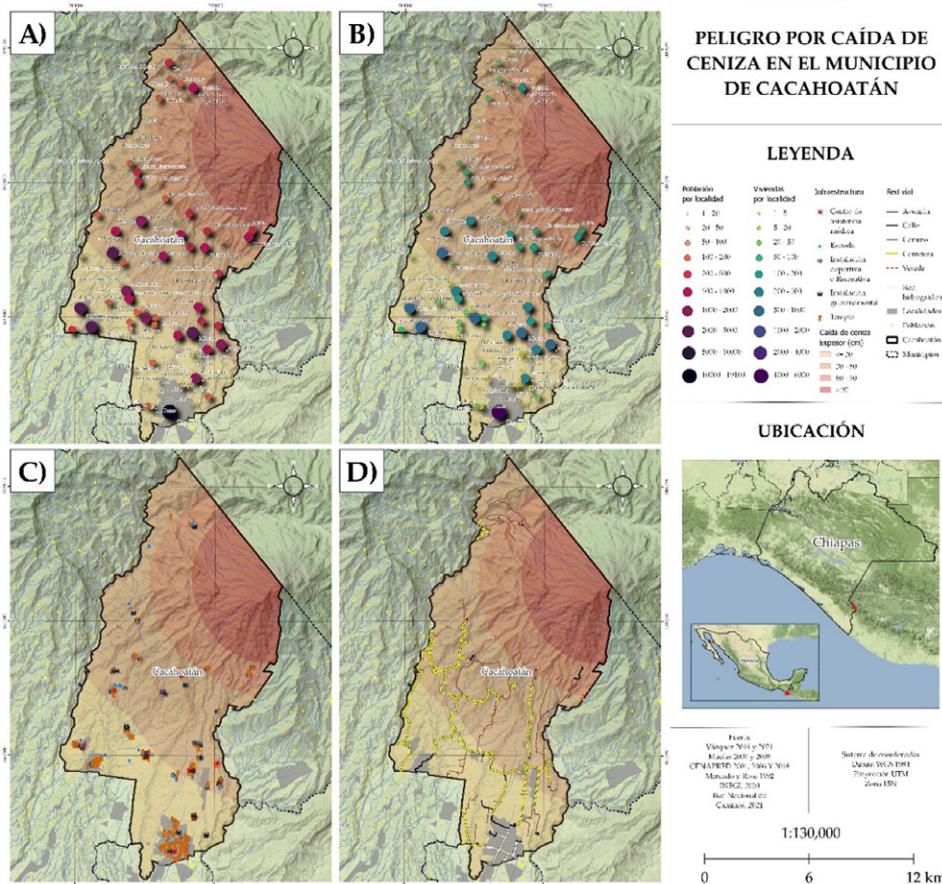
Localidades	3
Viviendas	16
Población	82
Vialidades	
Avenidas	-
Calle (km)	-
Camino	0.7
Carretera	0

Tabla 2. Localidades, viviendas, Población, y vialidades vulnerables. Fuente: Autores, 2023.

Mapa de peligros por caída de cenizas

El mapa de peligro por caída de ceniza para el municipio de Cacahoatán se generó a partir de simulaciones numéricas realizadas por CENAPRED (2001), donde se muestra la distribución de ceniza y los rangos de espesor de esta, de acuerdo con la cercanía al centro de emisión, en este caso la cima del volcán. En la zona noreste, donde se encuentra ubicado el volcán, se acumularía ceniza con espesores de 90 a 128 cm, después sigue el rango de 60 a 90 cm, y en la parte centro y noroeste se acumularían espesores de 30 a 60 cm de ceniza, mientras que en la zona sur se acumularían entre 2 a 30 cm (Figura 9).

Todo el municipio de Cacahoatán se encuentra en riesgo ante una caída de cenizas, ya que estas se dispersan por el aire, y su movimiento depende de la dirección en la que sople el viento. En las zonas más alejadas del volcán, se encuentran en riesgo 9985 viviendas, con espesores de acumulación de ceniza de 2 a 30 cm. Mientras que, para la zona más cercana a la cima, hay únicamente 16 viviendas expuestas, a una acumulación de ceniza de 90 a 128 cm.



entre 30 y 60 cm y 2 centros a espesores de 60 a 90 cm. Respecto a las escuelas hay 37 expuestas a acumulación de ceniza entre 2 a 30 cm, 45 escuelas a espesores de 30 a 60 cm y 10 a depósitos de cenizas de 60 a 90 cm. Hay 6 instalaciones deportivas expuestas a espesores de cenizas de 2 a 30 cm, 7 a espesores de 30 a 60 cm y solo 1 a depósitos de cenizas de 60 a 90 cm. En cuanto a las instalaciones de gobierno hay 15 expuestas de 2 a 30 cm de ceniza, 20 a depósitos de 30 a 60 cm, y 5 a 60 a 90 cm de espesor. Finalmente, para espesores de 2 a 30 cm hay 96 templos en riesgo, en espesores de 30 a 60 cm hay 45 templos, y para 60 a 90 cm se encuentran 9 templos expuestos (Figura 9; Tabla 3).

Elementos vulnerables/peligro	Espesor de caída de cenizas.			
	2 a 30 cm	30 a 60 cm	60 a 90 cm	90 a 128 cm
Localidades	58	33	12	3
Viviendas	9985	4480	536	16
Población	32074	15623	2333	82
Vialidades				
Avenida (km)	7.14	0.4	-	-
Calle (km)	7.2	0.9	1.63	0
Camino (km)	14.8	37.4	10	0.13
Carretera (km)	24.6	39.3	-	-
Infraestructura				
Centro de asistencia médica	6	8	2	-
Escuela	37	45	10	-
Instalación deportiva y recreativa	6	7	1	-
Instalación gubernamental	15	20	5	-
Templo	96	45	9	-

Tabla 3. Localidades, viviendas, población, vialidades e infraestructuras expuestas
Fuente: Autores, 2023.

Mapa de peligros por fenómenos de remoción en masa.

Los procesos o fenómenos de remoción en masa (PRM) son definidos por Alcántara – Ayala (2000) como el movimiento del terreno ladera abajo, debido a la acción de la gravedad, generados tanto por factores condicionantes o inherentes al terreno, (pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, vegetación, etc.) como por factores desencadenantes o externos (precipitación, sismos, cortes de ladera, etc.).

El mapa de peligros por fenómenos de remoción en masa de Cacaohatán se generó primero con el mapa de susceptibilidad a la inestabilidad de laderas. De acuerdo a Suárez (1988), la susceptibilidad puede ser definida como la predisposición de ocurrencia de un evento en un sitio dado, tomando en cuenta las características que componen al terreno y no se muestra la magnitud ni la temporalidad del evento.

En este trabajo se realizó el mapa de susceptibilidad mediante el método de multicriterio, que es considerado semicuantitativo, y definido como un conjunto de técnicas orientadas a asistir los procesos de toma de decisiones. Este método consiste en el manejo y procesamiento de datos, que comprende desde la sobreposición simple de mapas temáticos para la identificación de áreas con condiciones específicas, hasta la utilización de operadores matemáticos o modelos numéricos integrados para la producción dinámica de los fenómenos naturales (López – Blanco, 2005). En la Figura 9 se muestra el mapa de susceptibilidad obtenido para el municipio de Cacaohatán con cinco clasificaciones: muy alta, alta, media, baja y muy baja. A este mapa se superpuso la red vial del municipio, con la finalidad de identificar los tramos que se construyeron en cada una de las diferentes clasificaciones, ya que su construcción altera las condiciones naturales de susceptibilidad (Figura 10).

Con base en el mapa de susceptibilidad con las vialidades, se realizó un extenso trabajo de campo para verificar los tramos carreteros identificados con susceptibilidad muy alta, alta y media; el objetivo fue identificar las condiciones en que fueron dejados los taludes después de su construcción, la inclinación de los taludes, los materiales que los componen, el grado de compactación de los mismos, las condiciones de las vías de comunicación y los fenómenos de remoción en masa que se presentan. Con base en los resultados del trabajo de campo, se mapearon las zonas de peligro por fenómenos de remoción en masa, los cuales se corroboraron con los reportes y dictámenes de protección civil del municipio (Reportes internos de protección

civil Cacaohotán). Con la información anterior se generó el mapa de peligros por fenómenos de remoción en masa en las vías de comunicación del municipio de Cacaohotán, Chiapas (Figura 11; Tabla 4).

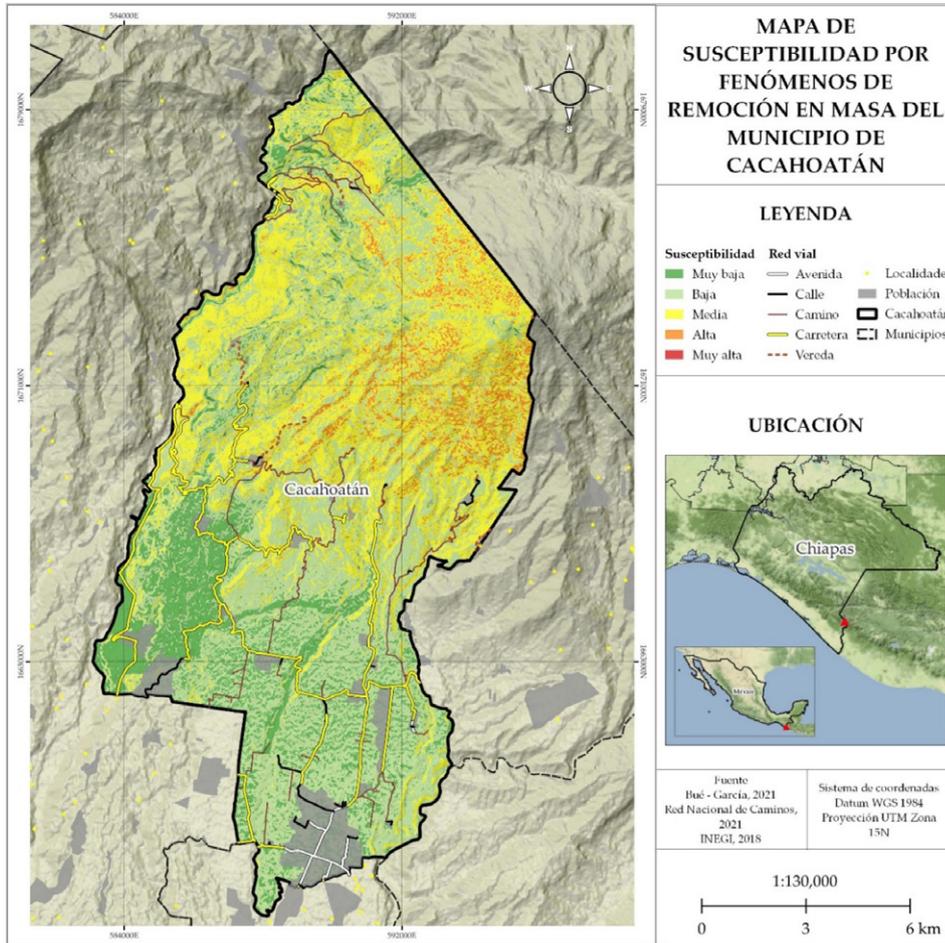


Figura 10. Mapa de susceptibilidad por inestabilidad de laderas con las principales vialidades
 Fuente: Autores, 2023.

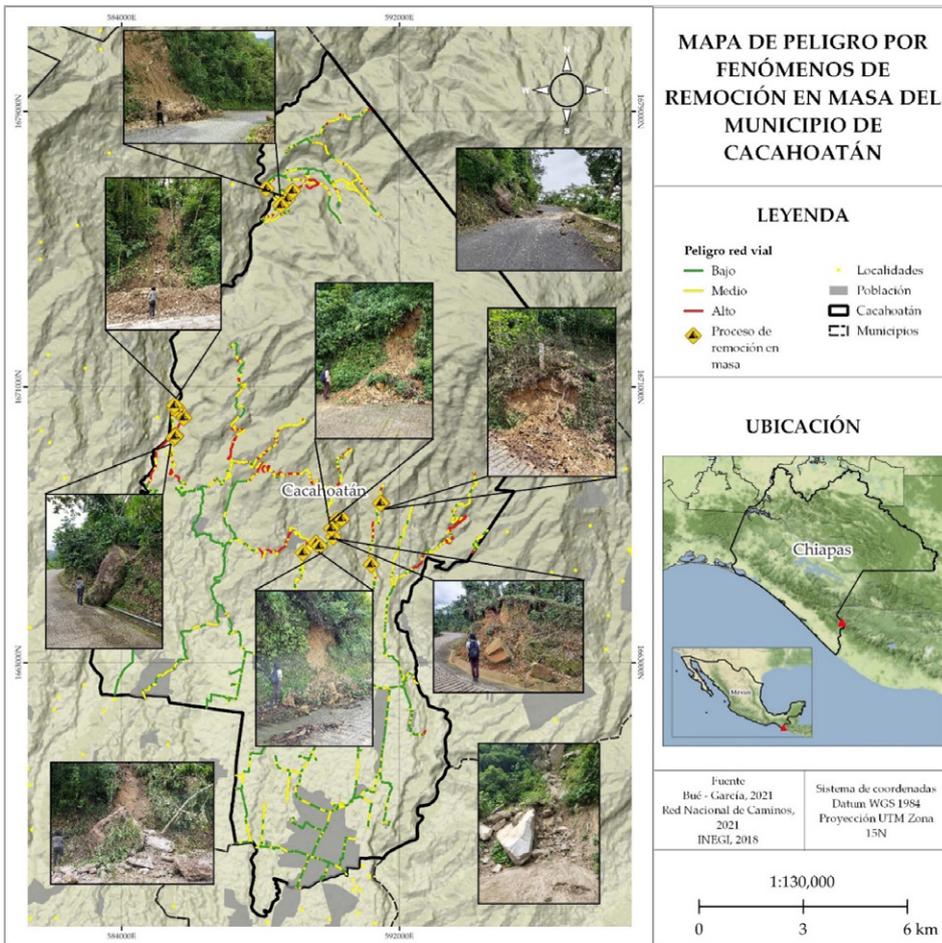


Figura II. Mapa de peligro alto, medio y bajo por fenómenos de remoción en masa
Fuente: Autores, 2023.

Nota: Obtenido por la verificación en campo de los tramos carreteros con susceptibilidad muy alta, alta y media; los cuales se convirtieron en peligro debido a los taludes que dejaron después de la construcción de los caminos.

En la Tabla 4 se muestra el mapa con los tramos de las vialidades con diferente nivel de peligro, bajo 32.69 km, medio 64.79 km y alto 27.08 km.

Vialidad	Nombre vialidad	Administración	Peligro (km)		
			Bajo	Medio	Alto
Carretera	A Miramar	N/D	0.04	0.53	0.16
Vereda	A Santa Teresa	N/D	0.02	0.16	0
Avenida	Agustín Melgar	N/A	0.03	0.17	0
Carretera	Alpujarras - El Platanar	Estatad	0.23	2.37	1.96
Calle	Bravo	N/A	0	0.07	0
Camino	E.C. (Faja de Oro - Iturbide - El Águila) - El Progreso - Nuevo Chespal	Estatad	0	0.09	0.43
Carretera	E.C. (Faja de Oro - Iturbide - El Águila) - El Progreso - Nuevo Chespal	Estatad	0.83	2.07	1.88
Carretera	E.C. (Tapachula - Nueva Alemania) - Cruce el Coco - Salvador Urbina - Unión Roja - Benito Juárez	Estatad	1.65	1.08	0.07
Carretera	Faja de Oro - Benito Juárez - Agustín de Iturbide - El Águila	Estatad	7.14	6.73	0.57
Carretera	Faja de Oro - Guatimoc - Bellavista	Estatad	0.98	3.7	0.99

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación)

Vialidad	Nombre vialidad	Administración	Peligro (km)		
			Bajo	Medio	Alto
Avenida	Juárez	N/A	0.07	0.12	0
Camino	N/D	N/D	0.47	0.81	0.12
Vereda	N/D	N/A	0.64	3.26	1.77
Privada	N/D	N/A	0.08	0.08	0
Carretera	N/D	Municipal	0.79	2.33	1.88
Camino	N/D	Municipal	6	19.97	10.14
Camino	N/D	Particular	0.62	0.56	0
Calle	N/D	N/A	0.73	4.03	0.28
Camino	N/D	N/D	3.9	7.87	3.27
Carretera	N/D	N/D	4.23	3.57	3.17
Vereda	N/D	N/D	0	0.03	0.2
Carretera	Ramal a Dos de Mayo - Rosario Ixtal	Estatad	0.69	1.29	0
Carretera	Ramal a Mixcum	Estatad	0.56	0.64	0.01
Carretera	Ramal a Unión Juárez	Federal	1.42	2.52	0.15
Vereda	Santa Teresa - Sonora	N/D	0.06	0.68	0.02
Carretera	Unión Roja - La Boquilla - Nuevo Chespal	Estatad	1.61	0.06	0.01
Total de tramos de vías de comunicación en peligro.			32.79	64.79	27.08

Tabla 4. Tramos con vialidades en peligro por fenómenos de remoción en masa
Fuente: Autores, 2023.

DISCUSIÓN

El Complejo Volcánico Tacaná ha sido objeto de numerosos estudios, que han concluido con una cartografía a detalle de sus depósitos volcánicos y las estructuras a las que se asocian, así como también a modelados matemáticos de flujos piroclásticos y caída de cenizas (Mercado & Rose, 1992; Macías 2000; 2005; 2006; CENAPRED, 2001; 2006; 2018; Vázquez, 2019; 2021), es por ello que con base en los estudios anteriores, se decidió generar el mapa de peligros volcánicos. El mapa de depósitos volcánicos se convierte en un mapa de peligro, ya que registra los depósitos que se han generado en toda la historia eruptiva de este complejo, por lo que, una nueva actividad volcánica, dependiendo de su tipo e intensidad, podría generar nuevos fenómenos volcánicos del tipo de flujos de lava, flujos piroclásticos, caída de cenizas, lahares e incluso el colapso parcial de su estructura. La transformación del mapa de cartografía a peligro se realiza, cuando existen elementos afectables, es por ello que al mapa se sobrepuso la infraestructura, los caminos y la población, que se encuentran en cada uno de los diferentes depósitos volcánicos, ya que, de ocurrir una nueva erupción, es susceptible de presentarse en la zona suroeste de la estructura en San Antonio o en la cima de la estructura Tacaná (Macías et al., 2005). Contabilizar a la población, viviendas, localidades, carreteras e infraestructura, que se encuentra sobre cada uno de los depósitos es fundamental para que las autoridades puedan definir programas preventivos como albergues y rutas de evacuación.

Las rutas de evacuación son fundamentales en una emergencia, en este complejo las vías de comunicación son las que va a utilizar la población en caso de una emergencia, sin embargo, no existe un mapa de peligros por fenómenos de remoción en masa en los caminos. Los fenómenos de remoción en masa se presentan donde hay una inestabilidad de laderas, por ello se realizó el mapa de susceptibilidad, que nos indica, si el terreno es susceptible a presentar inestabilidad con las condiciones naturales del mismo, su geología, suelos, uso del suelo, pendiente, orientación de la pendiente, fenómenos de remoción en masa e hidrología. Estas condiciones naturales se alteraron con la construcción de las vías de comunicación, que dejaron taludes hasta de 90° de pendiente. Las carreteras se construyeron en depósitos rocas ígneas y depósitos volcánicos, dejando en los segundos, taludes en depósitos de flujos piroclásticos con poca o sin compactación, donde, en época de lluvias, se generan diferentes tipos de fenómenos de remoción en masa, que provocan el cierre de los caminos. El mapa de peligros por fenómenos de remoción en masa en las rutas de evacuación en este complejo es una herramienta fundamental que pueden utilizar las autoridades para mejorar su programa preventivo. El complejo Volcánico Tacaná cuenta con una red de tres estaciones para el monitoreo de su actividad sísmica, la cual se va a incrementar de forma continua y con mayor intensidad, al acercarse a una nueva manifestación volcánica, lo

que provocaría el disparo de los fenómenos de remoción en masa y la consecuente obstrucción de los caminos. Lo anterior debe ser considerado y tomado en cuenta por las autoridades, para mejorar su plan de acción, ya que muchos de los caminos atraviesan diferentes cauces de los ríos, actualmente presentan fenómenos de remoción en masa y al usarlos las personas ante una evacuación estarían incrementando su vulnerabilidad al estar expuestos a deslizamientos, derrumbes, caída de rocas y lahares.

Los mapas con los fenómenos volcánicos que se han presentado e identificado a través de sus depósitos, generados durante la historia eruptiva del Complejo Volcánico, se convierten en un peligro para la infraestructura, viviendas, población y vías de comunicación, que se han desarrollado sobre los mismos, por lo que están expuestos ante una nueva reactivación y generación de fenómenos similares.

CONCLUSIÓN

Con base en el mapa de peligros volcánicos y con los datos georreferenciados del censo de INEGI por localidad para el municipio de Cacaohatán, los lahares son el fenómeno que puede causar mayores afectaciones, ya que, de acuerdo con las zonas donde se pueden presentar hay 31 localidades expuestas, donde viven 6 373 personas en 1897 viviendas. La infraestructura vial construida sobre los depósitos de lahares es de 16.2 km de carreteras y 7.6 km de caminos, también se construyeron 11 centros de asistencia médica.

Los flujos piroclásticos afectarían a 8 localidades donde habitan 1 530 personas, 3.2 km de caminos, 1.35 km de calles, 1 centro médico y 7 escuelas, por encontrarse sobre los depósitos de eventos anteriores.

Los flujos de lava se han presentado principalmente en la zona norte del municipio, debido a las barreras topográficas existentes, por lo que de presentarse este fenómeno existen 3 localidades con 82 personas y 0.7 km de caminos expuestos.

En peligro de caída de cenizas se encuentran todas las localidades, las vías de comunicación y la infraestructura local. La dispersión de las cenizas estará condicionada por la dirección del viento, considerando lo anterior la zona con espesores de ceniza entre 90 a 128 cm afectará a 3 localidades y 0.13 km de camino, mientras que, en la zona donde los depósitos serán entre 2 y 30 cm hay 58 localidades y el 60% de la red vial están expuestas.

Los fenómenos de remoción en masa que han afectado a las vías de comunicación se han presentado, principalmente en época de lluvias, desde la zona media hasta la zona alta de este complejo volcánico, y, de acuerdo con el mapa de peligro, se observa que hasta 27 km de los caminos se encuentran en peligro alto.

El incremento de los temores volcánicos es uno de los principales fenómenos que se presentan en un volcán activo cuando se prepara para una actividad volcánica, las vibraciones que se generan pueden acelerar la inestabilidad de las laderas y de los taludes construidos en las vías de comunicación y zonas de viviendas. En el Complejo Volcánico Tacaná se verían afectadas las vías de comunicación, ante el incremento de las vibraciones del terreno, al ser obstruidas por los depósitos de estos fenómenos y no permitirían la evacuación de los pobladores, ya que, en la actualidad, estos caminos son considerados como rutas de evacuación.

Es necesario que las autoridades consideren otras opciones como rutas de evacuación, ya que en una reactivación del volcánica las rutas de evacuación pueden ser bloqueadas por los depósitos de los fenómenos de remoción en masa y la población va a quedar mayormente expuesta a caída de bloques y cenizas, y a flujos piroclásticos, lahares y desbordamientos de ríos en los cruces de los caminos y veredas con los cauces de arroyos y ríos.

La población está expuesta a uno o más fenómenos volcánicos, como se muestra en la matriz que está en la Tabla 5.

Tabla 5. Matriz con las localidades en el municipio de Cacaohatán y los peligros a los que están expuestos.

Nombre localidad/peligro	Flujos		Lahares	Caida Cenizas	Nombre localidad/peligro	Flujos		Lahares	Caida Cenizas
	Lava	Piroclásticos				Lava	Piroclásticos		
1ra. Ampliación Manacal				x	La Rioja			x	x
24 de Junio (La Gallera)			x	x	La Soledad			x	x
Agua Caliente				x	La Vega del Caotán			x	x
Agua Tibia	x	x		x	La Ventana				x
Agustín de Iturbide				x	Las Nubes Guatimoc			x	x
Ahuacatlán				x	Las Nubes los Patios		x		x
Alianza				x	Las Palmas			x	x
Alpujarras				x	Las Pulgas				x
Azteca				x	Los Álamos			x	x
Bellavista				x	Los Panes			x	x
Benito Juárez				x	Los Robles			x	x
Benito Juárez el Plan		x		x	Lupita			x	x
Benito Juárez Montecristo		x		x	Milán		x		x
Bolívar				x	Miramar				x
Brasil				x	Mixcum				x
Buenos Aires				x	Monte Oreb			x	x
Cacaohatán				x	Montebello				x
Camambé				x	Morelos				x
Cantón Piedra Parada				x	Nueva Alianza				x
Dolores			x	x	Numancia				x
Dos de Mayo			x	x	Palmira			x	x
El Águila				x	Piedra Parada				x
El Carmen				x	Plata Uno				x
El Jardín				x	Platanillo				x
El Manguito				x	Puente Colorado				x
El Pastizal				x	Quinta Caspirol de la Montaña			x	x
El Platanar				x	Rancho Quemado				x
El Porvenir				x	Regalo de Dios			x	x
El Porvenir				x	Rosales				x
El Porvenir				x	Rosario Ixtal			x	x
El Progreso				x	Salvador Urbina				x
El Zapote				x	Salvador Urbina				x
Esquipulas			x	x	San Alberto				x
Faja de Oro			x	x	San Antonio Ixtal			x	x
Fracción Azteca		x		x	San Cristóbal				x
Fracción Bananera				x	San Fernando				x
Fracción las Quinas				x	San José Colón			x	x
Fraccionamiento San Antonio			x	x	San José las Flores			x	x
Guatimoc				x	San Miguel				x
Icú (Plan Chiapas)				x	San Pedro			x	x
Juan de León Santos				x	San Vicente				x
La Atlántida				x	San Vicente				x
La Boquilla				x	Santa Lucía			x	x
La Ceiba				x	Santa María la Vega				x
La Concepción			x	x	Santa Rita				x
La Gloria			x	x	Tecate			x	x
La Laguna	x	x		x	Tecoxtac				x
La Laguna Seca				x	Tochamán				x
La Libertad			x	x	Tojbach				x
La Paz				x	Toquián	x			x
La Plata Tres			x	x	Toquián las Nubes (Toquián Guarumo)			x	x
La Primavera				x	Toquián y las Nubes		x		x
La Primavera				x	Unión Roja				x

Tabla 5. Matriz con las localidades en el municipio de Cacaohatán y los peligros a los que están expuestos

Fuente: Autores, 2023.

Contar con un registro confiable, de la cantidad de comunidades, habitantes de estas, y las vías de comunicación que utilizarían en caso de emergencia, es fundamental para un eficiente programa preventivo que tome en cuenta la posibilidad de que algunas localidades no podrán evacuar y que deberán tener un refugio a donde dirigirse.

AGRADECIMIENTOS

Financiamiento. Este trabajo fue financiado por proyecto PAPIIT, IT100219.

REFERENCIAS

- Aceves, J.F., Hubp, J.L., Legorreta H.A. & Umaña J. (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. *Investigaciones Geográficas*, 91, 43-55.
- Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, 41, 7-25.
- Aleotti P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazards assessment: summary review and new perspective. *Bulletin of Engineering Geology of the Environment*, 58, 21-44.

- Atlas de Peligros y Riesgos de Cacaohatán. (2011). Secretaría de Desarrollo Territorial y Urbano. Reporte interno.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED. (2001). *Diagnóstico de Peligros e identificación de Riesgos de Desastres en México*. CENAPRED.
- CENAPRED. (2014). Volcanes. Peligro y riesgo volcánico en México. *Serie fascículos*. CENAPRED.
- CENAPRED. (2018). *Refugios temporales de Chiapas. Datos abiertos de México*. CENAPRED.
- De-la Cruz-Reyna, S., Armienta, M.A., Zamora, V. & Juárez, F. (1989). Chemical changes in spring waters at Tacaná Volcano, Chiapas, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 38, 345-353.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Mora, J.C., Hughes, S., Saucedo, R., Espíndola, J.M., Escobar, R. & Layer, P. (2006). Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala. *Geological Society of America*, 412, 39-57.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2021). *Red Nacional de Caminos 2021*. IMT. <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2020). *Censo población y vivienda 2020*. INEGI.
- López-Blanco, J. (2005). *Sistemas de Información Geográfica en estudios de Geomorfología ambiental y recursos naturales*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, Serie Seminarios.
- Macías, J.L., Espíndola, J.M., García-Palomo, A., Scott, K.M., Hughes, S. & Mora, J.C. (2000). Late Holocene Peléan-style eruption at Tacaná volcano, Mexico and Guatemala: Past, present, and future hazards. *GSA Bulletin*, 112(8), 1234-1249.
- Macías, J.L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 379-424.
- Macías, J.L., Arce, J.L., García-Palomo, A., Mora, J.C., Layer, P.W., Espíndola, J.M. (2010). Late-Pleistocene flank collapse triggered by dome growth at Tacaná volcano, México-Guatemala, and its relationship to the regional stress regime. *Bulletin of Volcanology*, 72(1), 33-53. <http://doi.org/10.1007/s00445-009-0303-9>
- Macías, J.L., Arce, J.L., Layer, P.W., Saucedo, R. & Mora, J.C. (2015). Eruptive History of the Tacaná Volcanic Complex. En Scolamacchia, T. & Macías, J. (Eds.), *Active Volcanoes of Chiapas (Mexico): El Chichón and Tacaná*. *Active Volcanoes of the World*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25890-9_6
- Mercado, R. & Rose, W. I. (1992). Reconocimiento geológico y evaluación preliminar de peligrosidad del volcán Tacaná, Guatemala/México. *Geofísica Internacional*, 31(3), 205-237.
- Mora, J.C. (2021). *Mapping the Risk of Flood, Mass Movement and Local Subsidence: A New Proposal for Major Cities*. SpringerBriefs in Earth Sciences. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22472-1>
- Mora, J.C., Macías, J.L., García-Palomo, A., Arce, J.L., Espíndola, J.M., Manetti, P., Vaselli, O., & Sánchez, M. (2004). Petrology and geochemistry of the Tacana Volcanic Complex, Mexico-Guatemala: Evidence for the last 40 000 years of activity. *Geofísica Internacional*, 43(3), 331-359.
- Múgica-Mondragón, R. (1987). *Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas en el Macizo de Chiapas*. Instituto Mexicano del Petróleo, Informe interno, C-2009.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf
- Palacios, V. (2019). Susceptibilidad de remociones en masa y evaluación de agentes desencadenantes en los alrededores de la quebrada Santos Ossa, región de Valparaíso (Tesis Doctoral). Universidad Andrés Bello, Chile.
- Paz Tenorio, J.A., González Herrera, R., Gómez Ramírez, M., & Velasco Herrera, J.A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones geográficas*, 92, 1-16. <https://doi.org/10.14350/rig.52822>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2013). *Programa de manejo Reserva de la Biósfera Volcán Tacaná*. SEMARNAT.
- Sistema Estatal de Protección Civil Chiapas SEPCCCh. (2007). *Plan Operativo del Volcán Tacaná, Chiapas. Reporte Interno*, 221p. SEPCCCh.

- Vázquez, R., Macías, V.J.L., Cisneros M.G., Arce, S.J.L., & Saucedo, G.R. (2017). Escenarios eruptivos para la simulación de flujos piroclásticos en el Complejo Volcánico Tacaná, Chiapas, México. Conference: *VII Simposio de Investigación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl* (1).
- Vázquez, R., Bonasia, R., Folch, A., Arce, J.L. & Macías, J.L. (2019a). Tephra fallout hazard assessment at Tacaná volcano (Mexico). *Journal of South American Earth Sciences*, 91, 253-259.
- Vázquez, R., Macías, J.L., Arce, J.L., Cisneros, G. & Saucedo, R. (2019b). Numerical simulation of block-and-ash flows for different eruptive scenarios of the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 373, 36-50.
- Vázquez, R., Macías, J.L. & Arce, J.L. (2021). Integrated hazards maps of the Tacaná Volcanic complex, Mexico-Guatemala: Ashfall, block-and-ash flows, and lahars. *Journal of South American Earth Sciences*, 107, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103146>