

Análisis del riesgo por procesos de remoción en masa en el Pico del Tancítaro y sus zonas de influencia

Landslide risk analysis of the Tancítaro Peak and its zones of influence

Gemma Gómez Castillo,* José de Jesús Alfonso Fuentes Junco** y José Antonio Navarrete Pacheco***

Recibido: 10/07/2023. Aceptado: 15/08/2023. Publicado: 17/10/2023.

Resumen. Los procesos de remoción en masa (PRM) surgen de la inestabilidad y cambios en las características de la superficie de la Tierra. La posibilidad de ocurrencia de estos fenómenos se acentúa en ambientes volcánicos debido a sus características morfológicas, litológicas y tectónicas.

Al suroeste del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato se localiza el Pico del Tancítaro, el cual es un estratovolcán que comenzó su actividad a finales del Pleistoceno inferior y se considera extinto. Este volcán sufrió dos grandes avalanchas de escombros hace más de 200 000 años, disparadas por actividad tectónica y magmática. En la actualidad continúa presentando pequeños deslizamientos y flujos de lodo, generalmente desencadenados por lluvias intensas en las áreas de altas pendientes. Considerando lo anterior, se ha planteado como objetivo de esta investigación identificar y cuantificar el riesgo por PRM en los alrededores del Pico del Tancítaro mediante la determinación de zonas de peligro y el análisis de la vulnerabilidad. Adicionalmente, se analiza la exposición a inundaciones por cercanía a los cauces de ríos, ante los desbordamientos que han ocurrido en tiempos recientes, los cuales han generado desastres en las localidades cercanas.

El análisis integral del riesgo por PRM fue llevado a cabo en tres fases. La primera parte involucró una evaluación de peligros: a) se reconocieron e inventariaron los PRM ocurridos recientemente (1995-2021); b) se identificaron

zonas propensas a sufrir colapsos, mediante inspección e interpretación visual, basado en las altas pendientes y cercanía a barrancas de ríos y vertientes inclinadas, usando como guía de avance una cuadrícula de 1 km x 1 km, lo que se traduce en 469 celdas y un total de 411.22 km² analizados; c) se elaboraron 11 simulaciones de probables avalanchas de escombros con el software Titan2D, donde los puntos de partida de las simulaciones se eligieron tomando en cuenta los factores de alta pendiente, disponibilidad de material, cercanía a localidades y, principalmente, presencia previa de PRM en las áreas contiguas; d) se consideraron las cercanías a los cauces de ríos como zonas expuestas a inundación, para esto se generaron las microcuencas y la red hídrica, y esta última fue jerarquizada por orden de corrientes de Strahler y se les asignaron buffers de exposición de acuerdo con el orden del cauce (orden 1 = 5 metros de distancia, 2 = 10 metros, 3 = 20 metros, 4 = 30 metros y 5 = 50 metros hacia cada lado del cauce). Para inundaciones no se hizo análisis de peligro, únicamente de la exposición.

La segunda parte constituyó el análisis de la vulnerabilidad por exposición, sensibilidad y resiliencia de las personas, la infraestructura y los recursos naturales y agrícolas, lo cual fue llevado a cabo mediante el procesamiento de distintas bases de datos, principalmente el Censo Nacional de Población y Vivienda 2020. Además, se diseñó una encuesta para identificar el nivel de percepción del riesgo, que fue llevada a

* Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701. Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3316-8171>. Email: gemma_gomezcastillo@yahoo.com.

** Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701. Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7056-3755>. Email: jfuentes@enesmorelia.unam.mx. Autor de correspondencia.

*** Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701. Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7506-5544>. Email: janp@ciga.unam.mx

cabos mediante la aplicación de un cuestionario entre los pobladores, específicamente, los asentados en zonas de peligro.

En la tercera parte se realizó el cruce de las capas anteriormente mencionadas, obteniéndose cinco niveles de riesgo, desde muy bajo a muy alto. El riesgo por procesos de remoción en masa es considerable en el sureste de la zona de estudio (localidades del municipio de Nuevo Parangaricutiro). Las localidades de mayor exposición a inundación son Peribán, Zirimondiro, Santa Ana Zirosto, Araparicuario y Choritiro.

Para la zona de estudio se identificaron altos niveles de ocurrencia de PRM y una alta y creciente susceptibilidad a inundaciones, por lo cual el Pico de Tancitaro se debe considerar una zona de peligro por fenómenos hidrogeomorfológicos. Adicionalmente, en este trabajo se consideran las altas pendientes, la geología, el cambio de uso de suelo y las fuertes precipitaciones de la zona como determinantes para su alta peligrosidad. Aunado a lo anterior, tenemos altos grados de vulnerabilidad en algunas localidades y manzanas, lo que contribuye a que los niveles de riesgo se incrementen; más aún, se ha logrado identificar que existe población que no percibe el riesgo, a pesar de haber vivido un desastre recientemente o de habitar una zona de muy alto peligro (plenamente reconocido por otros pobladores y las autoridades).

Finalmente, se recomienda evitar el cambio de uso de suelo, sobre todo en las áreas en las que se han presentado PRM en años recientes (parte sureste de la zona de estudio), ya que esto puede contribuir a la ocurrencia o aceleración de estos fenómenos y las repercusiones económicas y de infraestructura pueden ser cada vez mayores. La información, preparación y capacitación es fundamental en esta zona para disminuir la vulnerabilidad y con ello, el riesgo de desastres.

Palabras clave: Peribán, deslizamientos, inundaciones, desastre, percepción del riesgo.

Abstract. Mass removal processes (MRP) arise from instability and changes in the characteristics of the Earth's surface. The possibility of occurrence of these phenomena is accentuated in volcanic environments due to their morphological, lithological and tectonic characteristics.

To the southwest of the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field is located Pico del Tancitaro, which is a stratovolcano that began its activity at the end of the Lower Pleistocene and is considered extinct. This volcano suffered two large debris avalanches more than 200,000 years ago, triggered by tectonic and magmatic activity. At present it continues to present small landslides and mudflows, generally triggered by heavy rains in areas of high slopes. Considering the above, the objective of this research is to identify and quantify the DRP risk in the surroundings of Pico del Tancitaro by determining hazard zones and analyzing vulnerability. In addition, the exposure to floods due to the proximity to riverbeds is analyzed, given the overflows that have occurred in recent times, which have generated disasters in nearby localities.

The integral analysis of the risk due to PRM was carried out in three phases. The first part involved a hazard

assessment: a) recently occurred MICs (1995-2021) were recognized and inventoried; b) areas prone to collapse were identified through visual inspection and interpretation, based on high slopes and proximity to river gullies and steep slopes, using a 1 km x 1 km grid as a guide for progress, which translates into 469 cells and a total of 411.22 km² analyzed; c) 11 simulations of probable debris avalanches were elaborated with the Titan2D software, where the starting points of the simulations were chosen taking into account the factors of high slope, availability of material, proximity to localities and, mainly, previous presence of PRM in the contiguous areas; d) the proximity to riverbeds was considered as areas exposed to flooding, for this purpose the micro-basins and the water network were generated, and the latter was hierarchized by Strahler stream order and exposure buffers were assigned according to the order of the riverbed (order 1 = 5 meters distance, 2 = 10 meters, 3 = 20 meters, 4 = 30 meters and 5 = 50 meters to each side of the riverbed). For floods, no hazard analysis was performed, only exposure analysis.

The second part was the analysis of vulnerability by exposure, sensitivity and resilience of people, infrastructure and natural and agricultural resources, which was carried out by processing different databases, mainly the National Population and Housing Census 2020. In addition, a survey was designed to identify the level of risk perception, which was carried out through the application of a questionnaire among the inhabitants, specifically those settled in hazard zones.

In the third part, the previously mentioned layers were crossed, obtaining five levels of risk, from very low to very high. The risk of landslides is considerable in the southeast of the study area (towns in the municipality of Nuevo Parangaricutiro). The localities with the highest exposure to flooding are Peribán, Zirimondiro, Santa Ana Zirosto, Araparicuario and Choritiro.

For the study area, high levels of PRM occurrence and a high and increasing susceptibility to flooding were identified; therefore, the Tancitaro Peak should be considered a danger zone for hydrogeomorphological phenomena. In addition, this work considers the high slopes, geology, land use change and heavy rainfall in the area as determinants for its high hazard. In addition to the above, we have high levels of vulnerability in some localities and blocks, which contributes to increased risk levels; moreover, it has been identified that there is a population that does not perceive the risk, despite having recently experienced a disaster or living in a very high hazard area (fully recognized by other residents and the authorities).

Finally, it is recommended that changes in land use be avoided, especially in areas where MICs have occurred in recent years (southeastern part of the study area), since this may contribute to the occurrence or acceleration of these phenomena and the economic and infrastructure repercussions may be increasingly greater. Information, preparedness and training are essential in this area to reduce vulnerability and thus disaster risk.

Keywords: Peribán, landslides, floods, disaster, risk perception.

INTRODUCCIÓN

Los peligros geomorfológicos son el conjunto de fenómenos adversos o amenazas a los recursos y vidas humanas, que surgen de la inestabilidad y cambios en las características de la superficie de la Tierra (Gares *et al.*, 1994). En este sentido, la posibilidad de ocurrencia de estos fenómenos se acentúa en terrenos volcánicos, los cuales, su morfología y características litológicas los convierten en el ambiente ideal para una alta manifestación de procesos de remoción en masa (PRM) (McGuire, 1996; Capra y Macías, 2000; Capra *et al.*, 2002; Villeneuve y Heap, 2021). Los movimientos del terreno en ambientes volcánicos están condicionados por la naturaleza de la roca volcánica, que suele estar muy fracturada, en forma granular, rica en arcilla y saturada de agua, debido a que los volcanes tienen sistemas hidrotermales y magmáticos propios, los cuales tienen un fuerte control sobre los movimientos del terreno y las avalanchas de escombros volcánicas (Ui, 1983; Siebert, 1984, 1996; Pola *et al.*, 2012). En consecuencia, los movimientos del terreno en ambientes volcánicos tienden a transformarse en grandes flujos de detritos, con lo cual aumenta la complejidad y afectaciones de estos fenómenos, a diferencia de lo que sucedería en otros ambientes (van Wyk de Vries y Delcamp, 2015). En este tenor, el Pico del Tancítaro (PT) representa un claro ejemplo de la ocurrencia de estos fenómenos, pues sufrió dos grandes avalanchas de escombros, la primera hace 694 a 571 mil años antes del presente (AP) y la segunda hace 261 a 238 mil años AP (Ownby *et al.*, 2007), las cuales determinaron su geomorfología y depósitos circundantes actuales. En tiempos recientes se han presentado pequeños deslizamientos, principalmente en las carreteras (Magaña-González, 2015; Redacción-ME, 2021), y aunque a la fecha no han dejado víctimas fatales, se debe prevenir y gestionar el riesgo en estas zonas. Debido a lo anterior, el objetivo de esta investigación es identificar y cuantificar el riesgo por PRM en los alrededores del Área Natural Protegida del Pico del Tancítaro mediante la determinación de zonas de peligro y el análisis de la vulnerabilidad con ayuda del modelo SAVE (Morales-Manilla, 2010).

Adicionalmente, en este trabajo se analiza la exposición por cercanía a los cauces de ríos, ante las afectaciones por inundaciones que han sufrido los pobladores de la región en tiempos recientes, el caso emblemático es el ocurrido el 23 de septiembre de 2018 en la localidad de Peribán de Ramos, donde perdieron la vida ocho personas y una centena resultaron afectadas (Martínez-Elorriaga, 2018; Secretaría de Gobernación, 2018; Vázquez *et al.*, 2023).

Área de estudio

El PT (Figura 1) es el punto más alto del estado de Michoacán, con 3860 msnm y se ubica al oeste de esta entidad. Cuenta con un área natural protegida (ANP) de categoría federal, con carácter de área de protección de flora y fauna. Dicha ANP fue recategorizada como tal en 2009 (anteriormente Parque Nacional, decretado por Lázaro Cárdenas en 1939) y tiene una superficie de 237 km², que cubre parte de los municipios de Tancítaro, Nuevo Parangaricutiro, Peribán y Uruapan (SEMARNAT-CONANP, 2017).

El PT es un estratovolcán extinto que se localiza dentro del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985), el cual a su vez forma parte de la zona central de la Faja Volcánica Trans-Mexicana, que es un arco volcánico continental que se extiende por más de 1000 km desde el estado de Nayarit hasta Veracruz (Demant, 1979). Este arco volcánico es generado por la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa Norteamericana (Garduño-Monroy *et al.*, 1999; Ferrari *et al.*, 2000). El volcán Tancítaro es el más grande, complejo y antiguo estratovolcán de la zona, cuya estructura volcánica data del Cuaternario (Morelli *et al.*, 2010). Su composición es andesítica a dacítica (Demant, 1981) y se le han realizado numerosas dataciones radiométricas, las cuales sugieren que la actividad volcánica comenzó hace unos 793±22 miles de años AP y su última erupción fue hace 237±34 miles de años AP (Ownby *et al.*, 2007). Se han identificado dos avalanchas de escombros de grandes dimensiones (Ownby *et al.*, 2007), de las cuales la mayor está asociada al colapso de la parte este del antiguo edificio volcánico (Garduño-Monroy *et al.*, 1999; Capra *et al.*, 2002)

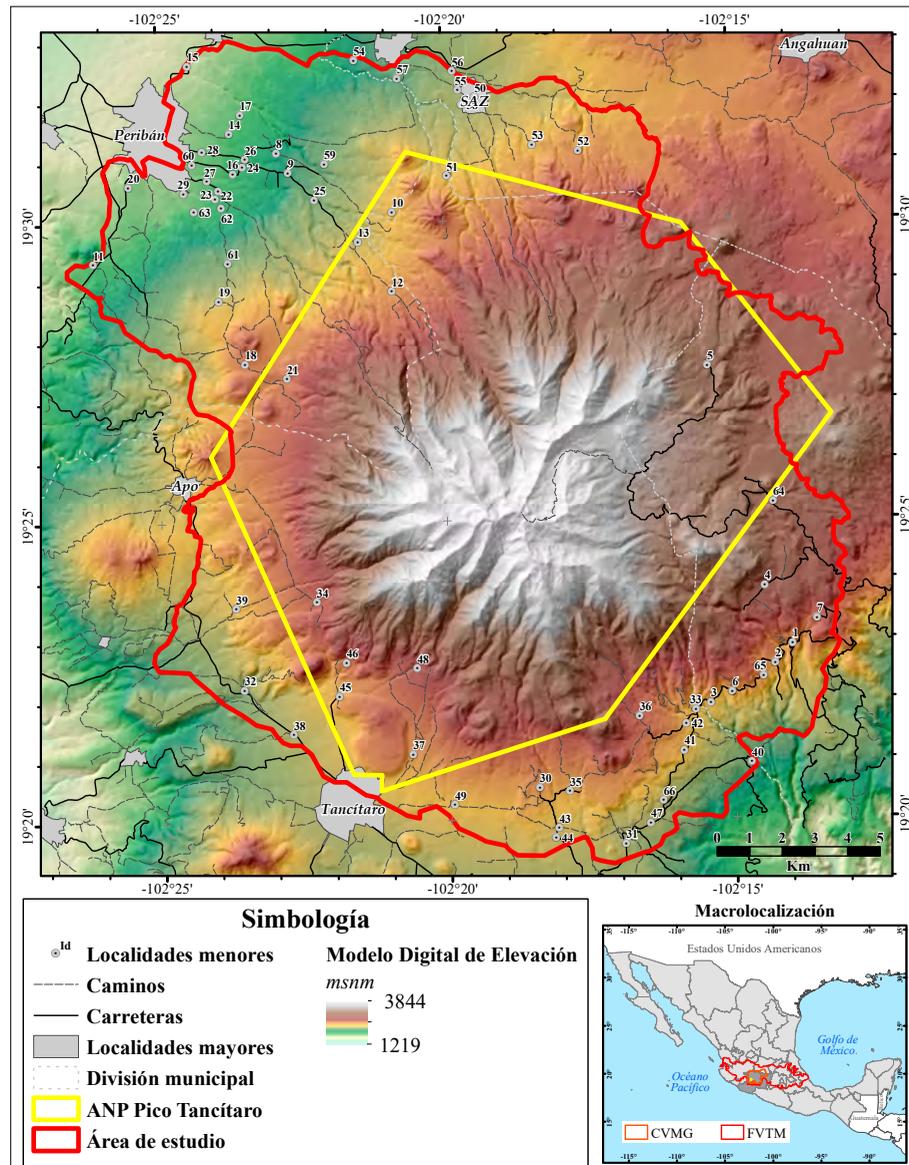


Figura 1: Ubicación del área de estudio dentro del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) (límites tomados de Mazzarini et al., 2010) y este a su vez dentro de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) (cuyos límites fueron tomados de Ferrari et al., 2012). Los números junto a los puntos de las localidades son los identificadores que corresponden a la Tabla 1. Fuente: elaboración propia con insumos de INEGI (2013; 2018a; 2018b) y de SEMARNAT-CONANP (2017).

y abarca un área aproximada de 1155 km² con un volumen calculado de 18 km³ (Morelli et al., 2010); se estima que esta avalancha ocurrió entre los 261 y 238 mil años AP (Ownby et al., 2007).

Estructural y tectónicamente, el PT se ubica en la intersección del Corredor Tarasco (con

dirección NE-SO) y la zona de fallas Chapala-Oaxaca (con dirección NO-SE), en el límite entre los bloques Michoacán y Guerrero (Ownby et al., 2007; Morelli et al., 2010). Al noreste del volcán se localiza una gran falla activa denominada San Juanico-Buenavista, la cual se considera causante

de la actividad sísmica reciente del área (Legrand *et al.*, 2023; Pacheco *et al.*, 1999).

En lo que corresponde a la geomorfología, y debido a su variabilidad altitudinal (que sobrepasa los 2000 msnm desde la base a los 3860 msnm en la cima del volcán), esta zona se clasifica dentro del Ambiente Morfogenético denominado Sistema Volcánico Transversal y los paisajes geomorfológicos característicos son las Sierras y los Piedemontes (Bocco *et al.*, 1999). Posteriormente, Fuentes-Junco (2000) realizó una clasificación a mayor detalle (escala 1:50 000 y 1:25 000), con lo cual obtuvo un total de cinco unidades geomórficas principales subdivididas en 13 subunidades secundarias, 20 unidades de tercer orden y 24 de cuarto orden; se mencionan a continuación las de primer y segundo orden: 1) Sistema Tancítaro, conformado por cimas, laderas y valles; 2) Estructuras volcánicas monogenéticas, conformada por conos volcánicos y domos volcánicos; 3) Derrames lávicos, conformados por mesas de coladas de lava y derrames lávicos; 4) Piedemonte, conformado por laderas, y 5) Planicies, conformado por planicies acumulativas.

La edafología de la zona está caracterizada por una gran variabilidad de tipos y unidades de suelo (50 asociaciones de suelos), pero la predominancia de los suelos está dada por aquellos que provienen de sustratos volcánicos, por lo que los andosoles son los más abundantes, seguido de los regosoles, luvisoles, leptosoles y cambisoles (Fuentes Junco y Alvarado-Ramos, 2006). La vegetación predominante en el PT es el bosque mixto (pino-encino-pino) con un área de 20 910 ha, seguido del bosque de abeto con 5640 ha y, en tercer sitio se encuentra el *Pinus hartweggi* con 2430 ha (Fuentes Junco, 2000). Las especies arbóreas más importantes que se han registrado en esta vegetación natural son: *Pinus michoacana*, *P. montezumae*, *P. douglassiana*, *P. leiophylla* y *P. pseudostrobus*, *Quercus laurina*, *Q. rugosa*, *Abies religiosa* y *Alnus jorullensis* (Fuentes Junco y Alvarado-Ramos, 2006). Sin embargo, existen grandes áreas de vegetación que han sido transformadas para el cultivo de aguacate (23 700 ha), cultivos anuales (4200 ha) y pastizales (380 ha).

Con respecto al clima, es importante mencionar que no existen estaciones meteorológicas en la

zona del PT, y las más cercanas son las de Peribán de Ramos, Uruapan y Jicalán. Por lo anterior, se revisaron los datos de la carta de climas elaborada para CONABIO por García (2001) y a partir de ello, se estima que los cuatro climas en la zona de estudio siguen un patrón altitudinal influenciados en su humedad por la Depresión del Balsas hacia las laderas este, suroeste y sur del PT y por el fenómeno de continentalidad en la ladera norte. El clima con mayor cobertura es el templado, húmedo, temperatura media anual entre 12 y 18 °C; en segundo lugar, se encuentra el semifrío, húmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 y 12 °C; el tercer clima es el templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12 y 18 °C, y el cuarto es el semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18 °C.

En lo concerniente a la población, en el área de estudio se contabilizan 66 localidades con un total de 8316 personas (Tabla 1) de acuerdo con el Censo 2020 de INEGI (2021a; 2021b).

El análisis del riesgo: conceptos relevantes

En este apartado se describen algunos de los conceptos medulares empleados en este trabajo de investigación y su enfoque desde una perspectiva geográfica, orientada a la gestión del riesgo de desastre.

Comenzaremos analizando el concepto de riesgo, el cual se define como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento adverso y sus consecuencias negativas (UNISDR, 2009), donde la probabilidad de que se produzca un evento adverso está representada por el “peligro” y sus consecuencias negativas son la “vulnerabilidad”. En este contexto, el peligro es un fenómeno o situación que produce un nivel de amenaza a un sistema o parte de este. Se caracteriza por la viabilidad de ocurrencia de un incidente potencialmente dañino y las consecuencias que este puede producir para un periodo específico y una zona determinada (IPCC, 2001; Turner *et al.*, 2003; UNISDR, 2009). Por otro lado, la vulnerabilidad la definimos como la probabilidad de que un sistema, o cualquiera de sus componentes, sufra un daño derivado de la exposición y sensibilidad a un peligro, y la capacidad de recuperación y adaptación una vez que el peligro

Tabla 1. Características de la población de las localidades ubicadas en el área de estudio.

| Id | Municipio | Localidad | Habitantes | | | | | | | | | | | |
|----|-----------|-------------------------------|------------|----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|----|----|----|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | Nuevo P. | Canoa Alta | 22 | 4 | 5 | 1 | 1 | 21 | 21 | 0 | 6 | 3 | 0 | 0 |
| 2 | Nuevo P. | El Durazno | 36 | 3 | 10 | 0 | 0 | 15 | 18 | 0 | 8 | 3 | 0 | 0 |
| 3 | Nuevo P. | La Pacata | 57 | 6 | 20 | 1 | 2 | 36 | 28 | 0 | 13 | 4 | 0 | 0 |
| 4 | Nuevo P. | El Tejamanil | 91 | 6 | 22 | 3 | 3 | 62 | 47 | 6 | 22 | 9 | 1 | 1 |
| 5 | Nuevo P. | La Escondida | 83 | 4 | 32 | 0 | 12 | 29 | 44 | 12 | 21 | 5 | 0 | 0 |
| 6 | Nuevo P. | Rancho Nuevo | 30 | 3 | 10 | 0 | 0 | 12 | 7 | 0 | 7 | 2 | 0 | 0 |
| 7 | Nuevo P. | El Corcuvi | 13 | 2 | 4 | 1 | 0 | 8 | 12 | 0 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| 8 | Peribán | Chuanito | 141 | 4 | 50 | 3 | 0 | 58 | 63 | 14 | 34 | 1 | 0 | 0 |
| 9 | Peribán | La Fábrica | 225 | 11 | 80 | 8 | 17 | 87 | 104 | 14 | 52 | 12 | 0 | 0 |
| 10 | Peribán | El Granado | 11 | 1 | 1 | 2 | 1 | 9 | 9 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | Peribán | Parambén | 196 | 15 | 67 | 16 | 12 | 86 | 88 | 23 | 48 | 13 | 0 | 4 |
| 12 | Peribán | Paso de la Nieve | 98 | 4 | 37 | 0 | 6 | 32 | 53 | 11 | 24 | 5 | 0 | 0 |
| 13 | Peribán | Tangancicato | 40 | 0 | 13 | 1 | 3 | 15 | 34 | 0 | 9 | 1 | 0 | 0 |
| 14 | Peribán | Las Trojas | 20 | 5 | 7 | 5 | 4 | 11 | 16 | 5 | 5 | 3 | 0 | 0 |
| 15 | Peribán | Agua Fría | 93 | 10 | 31 | 4 | 7 | 38 | 64 | 31 | 23 | 5 | 0 | 0 |
| 16 | Peribán | San José la Coyotera | 205 | 4 | 83 | 5 | 20 | 77 | 152 | 18 | 49 | 14 | 0 | 0 |
| 17 | Peribán | El Llorón | 14 | 0 | 4 | 0 | 0 | 10 | 8 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| 18 | Peribán | Parastaco | 70 | 4 | 24 | 0 | 4 | 26 | 66 | 5 | 17 | 4 | 0 | 0 |
| 19 | Peribán | El Unguín | 12 | 0 | 6 | 0 | 0 | 6 | 11 | 0 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| 20 | Peribán | La Loma | 23 | 1 | 10 | 1 | 0 | 8 | 7 | 5 | 5 | 2 | 0 | 0 |
| 21 | Peribán | El Ojo de Agua de Parastaco | 22 | 1 | 10 | 0 | 6 | 6 | 22 | 0 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| 22 | Peribán | El Pozo del Zopilote | 27 | 2 | 8 | 1 | 5 | 9 | 24 | 0 | 6 | 1 | 0 | 0 |
| 23 | Peribán | La Toma | 29 | 4 | 10 | 2 | 3 | 12 | 29 | 2 | 11 | 6 | 3 | 3 |
| 24 | Peribán | El Atrancón | 108 | 4 | 42 | 1 | 11 | 38 | 77 | 8 | 27 | 7 | 1 | 2 |
| 25 | Peribán | Uña de Gato | 50 | 2 | 16 | 0 | 3 | 18 | 26 | 34 | 14 | 3 | 1 | 2 |
| 26 | Peribán | Río Chondo | 37 | 2 | 13 | 1 | 0 | 21 | 20 | 3 | 9 | 1 | 0 | 0 |
| 27 | Peribán | El Capillo | 24 | 1 | 11 | 1 | 1 | 7 | 5 | 4 | 7 | 4 | 0 | 0 |
| 28 | Peribán | El Pedregal (El Pino Redondo) | 301 | 18 | 111 | 18 | 15 | 145 | 215 | 51 | 72 | 21 | 1 | 2 |
| 29 | Peribán | El Pino 2 | 15 | 3 | 4 | 1 | 2 | 6 | 1 | 0 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 30 | Tancítaro | Agua Nueva | 264 | 16 | 98 | 9 | 33 | 106 | 115 | 51 | 58 | 27 | 0 | 4 |
| 31 | Tancítaro | Araparícuaro (Aparícuaro) | 885 | 58 | 308 | 41 | 30 | 374 | 201 | 82 | 213 | 56 | 2 | 5 |

Tabla 1. Continuación.

| Id | Municipio | Localidad | Habitantes | | | | | | | | | | | |
|----|-----------|---|------------|-----|-----|----|-----|-----|------|-----|-----|-----|----|----|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 32 | Tancítaro | Choritiro | 817 | 61 | 266 | 38 | 33 | 395 | 130 | 376 | 195 | 44 | 0 | 3 |
| 33 | Tancítaro | El Fresnito (Las Brujas) | 37 | 8 | 9 | 1 | 5 | 20 | 20 | 7 | 13 | 8 | 0 | 1 |
| 34 | Tancítaro | El Jazmín | 31 | 4 | 12 | 1 | 4 | 15 | 8 | 0 | 8 | 4 | 0 | 0 |
| 35 | Tancítaro | La Peñita Norte | 274 | 32 | 89 | 19 | 36 | 98 | 149 | 78 | 68 | 19 | 3 | 3 |
| 36 | Tancítaro | La Soledad | 226 | 15 | 77 | 13 | 15 | 99 | 126 | 10 | 60 | 23 | 1 | 2 |
| 37 | Tancítaro | Zirimondiro | 1186 | 80 | 438 | 61 | 98 | 528 | 589 | 343 | 261 | 80 | 4 | 7 |
| 38 | Tancítaro | Cuinio | 16 | 2 | 5 | 2 | 3 | 10 | 5 | 4 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| 39 | Tancítaro | La Tapiada | 40 | 5 | 11 | 4 | 3 | 16 | 31 | 0 | 11 | 4 | 2 | 2 |
| 40 | Tancítaro | San José de las Peñas (La Barranca) | 69 | 3 | 27 | 1 | 8 | 26 | 45 | 7 | 16 | 7 | 0 | 0 |
| 41 | Tancítaro | El Tepamo | 70 | 2 | 23 | 0 | 6 | 36 | 44 | 2 | 19 | 7 | 0 | 0 |
| 42 | Tancítaro | La Puente Quemada | 28 | 2 | 9 | 0 | 1 | 14 | 20 | 4 | 6 | 2 | 1 | 1 |
| 43 | Tancítaro | La Peñita S | 55 | 6 | 23 | 3 | 10 | 27 | 34 | 0 | 13 | 7 | 0 | 0 |
| 44 | Tancítaro | La Tinaja (La Tijera) | 14 | 0 | 5 | 0 | 0 | 7 | 11 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 45 | Tancítaro | Charapóndiro | 35 | 1 | 13 | 0 | 3 | 18 | 22 | 2 | 9 | 3 | 0 | 0 |
| 46 | Tancítaro | La Chivera | 13 | 0 | 4 | 0 | 1 | 6 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| 47 | Tancítaro | Encino Blanco | 18 | 0 | 3 | 0 | 2 | 8 | 2 | 11 | 6 | 0 | 0 | 1 |
| 48 | Tancítaro | La Joya (El Banquito) | 24 | 0 | 10 | 1 | 4 | 8 | 12 | 0 | 6 | 3 | 1 | 2 |
| 49 | Tancítaro | El Capulín | 26 | 0 | 7 | 0 | 3 | 11 | 9 | 0 | 7 | 2 | 0 | 0 |
| 50 | Uruapan | Santa Ana Zirosto | 2022 | 160 | 597 | 48 | 133 | 830 | 1082 | 290 | 443 | 132 | 1 | 6 |
| 51 | Tancítaro | Huaríndaro | 9 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 52 | Uruapan | Tzintzicátaro (El Arenal) | 9 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 53 | Uruapan | El Arenal | 9 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 54 | Uruapan | Las Cruces | 1 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 55 | Uruapan | El Fresnito | 4 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 56 | Uruapan | El Patio | 5 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 57 | Uruapan | Zipicha | 1 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 58 | Uruapan | El Calvario | 4 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 59 | Peribán | Las Cruces | 3 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| 60 | Peribán | El Calvario (El Palito Verde) | 5 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |

Tabla 1. Continuación.

| Id | Municipio | Localidad | Habitantes | | | | | | | | | | | |
|----|-----------|------------------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 61 | Peribán | La Pedregosa | 1 | ND |
| 62 | Peribán | El Copal | 6 | ND |
| 63 | Peribán | Cuzata (El Ucaz) | 5 | ND |
| 64 | Nuevo P. | San Nicolás | 4 | ND |
| 65 | Nuevo P. | Chapiles | 3 | ND |
| 66 | Tancítaro | El Fresnito | 4 | ND |

Nota: el Id se corresponde con los números identificadores de localidades de la Figura 1. Nuevo P.: Nuevo Parangaricutiro. Las columnas son: 1) personas de 60 años y más; 2) personas menores de 15 años; 3) personas con discapacidad; 4) personas de 15 años y más analfabetas; 5) personas ocupadas; 6) personas con derechohabencia a servicios de salud, 7) personas en hogar con jefatura femenina; 8) total de hogares; 9) viviendas particulares habitadas que no disponen de automóvil, camioneta o motocicleta; 10) viviendas que no disponen de ningún bien; 11) viviendas sin tecnologías de la información y la comunicación; ND) no disponible, por el tamaño de la localidad no se dan a conocer estos datos para resguardar la identidad de las personas.

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2021a; 2021b).

ha causado un impacto (IPCC, 2001; Turner *et al.*, 2003; Morales-Manilla, 2010).

Como podemos apreciar, el análisis de la vulnerabilidad consta de varios componentes, los cuales son: 1) exposición: que definimos como la presencia o cercanía de los distintos elementos del sistema, en zonas donde existen peligros y, por tanto, pueden experimentar pérdidas potenciales (Turner II *et al.*, 2003; UNISDR, 2009). 2) Sensibilidad: el grado en que un sistema o parte de este puede ser afectado. Depende de la interacción entre las condiciones intrínsecas del sistema y su exposición a un evento adverso (IPCC, 2001; Turner II *et al.*, 2003). 3) Resiliencia: es la capacidad que tiene un sistema, o parte de este, para afrontar, adaptarse y recuperar el estado previo de referencia después de haber sufrido una perturbación (Turner II *et al.*, 2003).

En este trabajo abordamos el análisis de la sensibilidad desde varios aspectos, uno de los cuales es el análisis de la percepción del riesgo de los pobladores asentados en zonas de peligro; el concepto de percepción del riesgo lo podemos definir como las evaluaciones y juicios subjetivos que las personas hacen acerca de la peligrosidad de un fenómeno y

de si se es vulnerable a él, estos juicios dependen de las características individuales como edad, género o nivel educativo, pero también se forman colectivamente y se basan en información proveniente del medio y de las experiencias que se han tenido en alguna situación de riesgo (Landeros-Mugica y Urbina-Soria, 2021). Adicionalmente, Lechowska (2018) señala que los factores cognitivos, conductuales, socio-económicos, demográficos, geográficos, informativos y contextuales (asociados a lo cultural, social, religioso y político) del individuo, determinan su percepción del riesgo ante un fenómeno en específico. Para llevar a cabo esta evaluación de la percepción del riesgo, utilizamos como herramienta la encuesta, que es un procedimiento mediante el cual se diseña un cuestionario, se administra y permite recabar datos. El cuestionario es el instrumento que se utiliza para obtenerlos y es una herramienta que permite conseguir información de forma más estructurada y de un mayor número de personas en menor tiempo (Landeros-Mugica y Urbina-Soria, 2021).

Finalmente, es importante mencionar que para la selección, análisis e integración de las variables e información, hemos empleado la metodología

del Modelo SAVE, elaborado por Morales-Manilla (2010). SAVE (Spatial Analysis of the Vulnerability Environment) es un modelo geográfico para la evaluación de la vulnerabilidad, basado en los conceptos de lugar, las relaciones espaciales y los patrones. Fue desarrollado con base en el modelo conceptual de Turner II *et al.* (2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis de peligros

Para el desarrollo de la presente investigación, la información cartográfica se trabajó en el software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2009), donde primero se procedió a delimitar el área de estudio, considerando no solo el ANPPT sino el piedemonte y las áreas de influencia morfológica del volcán, en el cual se asentaban las localidades de interés (Figura 2).

Para el peligro por PRM, se usó la base de datos realizada y proporcionada por Valdés Carrera *et al.* (2022), a la cual se le sumaron algunos procesos identificados en la presente investigación; con esto se determinó la exposición y áreas más afectadas por flujos y deslizamientos (Figura 2). Para establecer las localidades con cercanía a estos fenómenos se recurrió al uso de la cuadrícula de 1 km, mediante la cual se observaba si había coincidencia dentro de un mismo cuadro o en las vecindades.

Posteriormente, se realizó una identificación detallada de zonas propensas a sufrir colapsos mediante inspección e interpretación visual, basado en las altas pendientes y cercanía a barrancas de ríos y vertientes inclinadas, usando como guía de avance una cuadrícula de 1 km x 1 km, lo que se traduce en 469 celdas y un total de 411.22 km² analizados (Figura 3). Se debe considerar que la zona norte tiene mayor detalle de análisis porque el Modelo Digital de Elevación (MDE) es un LiDAR de cinco metros de resolución, producido por INEGI (2018c) y el resto del área fue analizado con un MDE de 15 metros del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), producido por INEGI (2013), esta diferencia de resolución es apreciable en la Figura 3; la interpretación se llevó a cabo teniendo como insumos un modelo de pendientes, un sombreado, la red hídrica, los PRM y una imagen

satelital de Google Earth (2021), finalmente se realizaron un total de 1535 trazos, con una longitud total de 1088 km. Para identificar las zonas de mayor peligro se realizó un sumatoria de las longitudes que había por cada km² y se agruparon en cinco categorías.

A continuación, se llevaron a cabo 11 simulaciones de avalanchas de escombros en el programa Titan2D (GMFG, 2007), un software informático desarrollado con el propósito de simular flujos de masas geológicas tales como avalanchas granulares secas, avalanchas de escombros y deslizamientos de tierra sobre modelos de elevación digital del terreno natural. Este código combina simulaciones numéricas de un flujo sobre datos de elevación digital del terreno soportados en un sistema operativo de Linux (Canonical-Ltd., 2012). Los insumos para las simulaciones fueron el MDE con tamaño de pixel de 15 metros (INEGI, 2013) y los parámetros utilizados en la modelación son las coordenadas del punto de partida, altura máxima inicial del material a colapsar, ángulo de fricción interna, ángulo de fricción basal, tamaño y orientación de la pila (pila se refiere el material o promontorio a ser movilizado), velocidad y dirección del movimiento (Figura 4). Para este caso, se usó un ángulo de fricción interna de 50° para todas las simulaciones, debido a que la litología del lugar corresponde a andesitas, que en la bibliografía se reportan con un máximo de 55° y un mínimo de 50° (Danciu *et al.*, 2021; Villeneuve y Heap, 2021); para el ángulo de fricción basal se usó un valor general de 20°, considerándolo como un escenario catastrófico donde la movilidad de una avalancha pudiera ser alta. Los puntos de partida de las simulaciones se eligieron considerando los factores de alta pendiente, disponibilidad de material, cercanía a localidades y, principalmente, presencia previa de PRM en las áreas contiguas.

Finalmente, se realizó un análisis del nivel exposición por cercanía de las localidades con respecto a los cauces de los ríos. Para esto se generaron las microcuencas y la red hídrica a partir de los MDE LiDAR (para la parte norte) y el de 15 metros (resto del área). Adicionalmente, se contó con la red hídrica elaborada por Fuentes Junco (2002). Se compararon estas tres redes hídricas y se trabajó

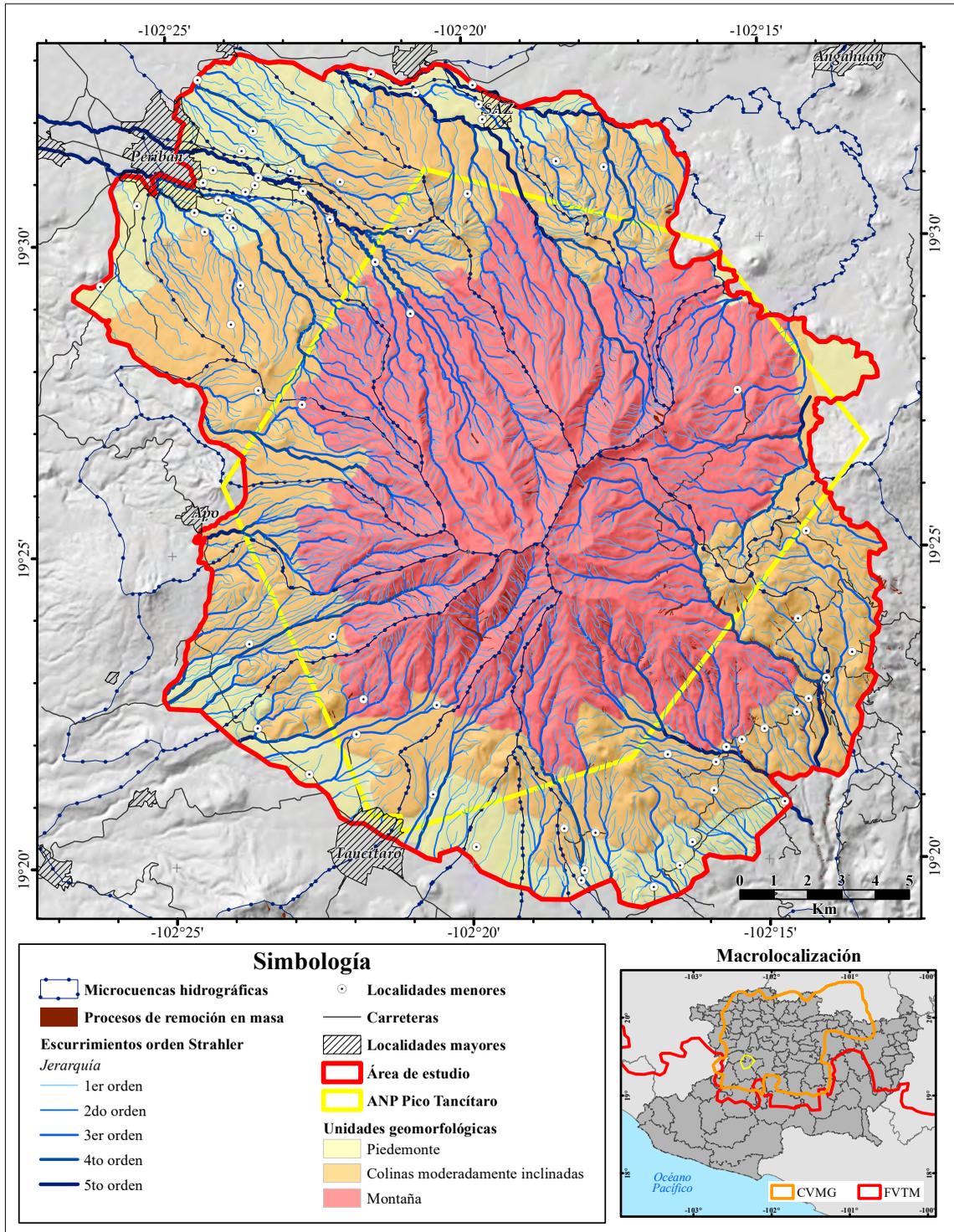


Figura 2. Mapa de las principales unidades geomorfológicas del área de estudio, microcuencas, escurrimientos jerarquizados por orden de Strahler y procesos de remoción en masa. Fuente: elaboración propia con base en Fuentes Junco (2002), INEGI (2013; 2018a) y Valdés Carrera et al. (2022).

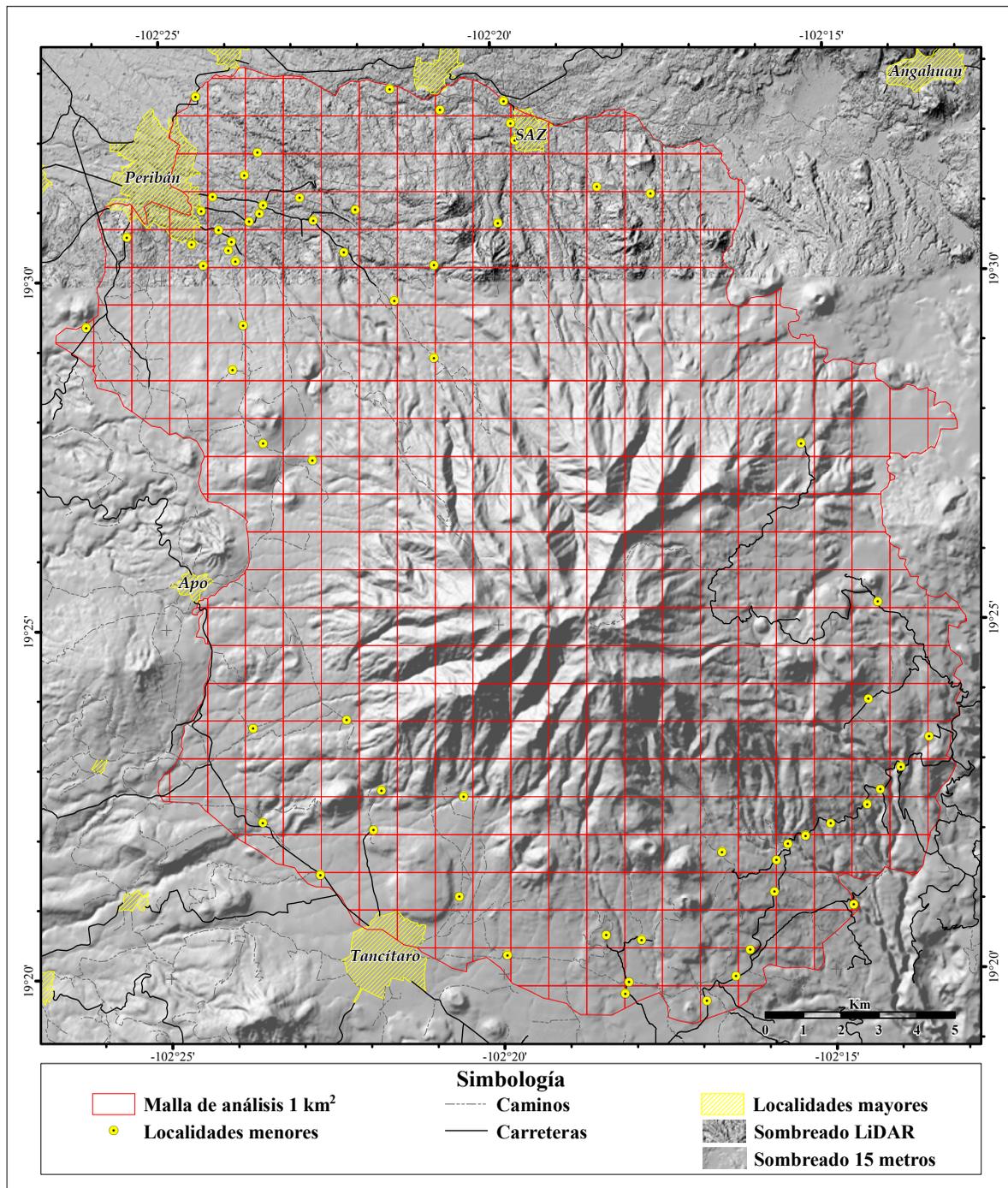


Figura 3. Malla de análisis para llevar a cabo la identificación de zonas de potenciales colapsos y cercanía a procesos de remoción en masa. Fuente: elaboración propia con insumos de INEGI (2013; 2018a; 2018c).

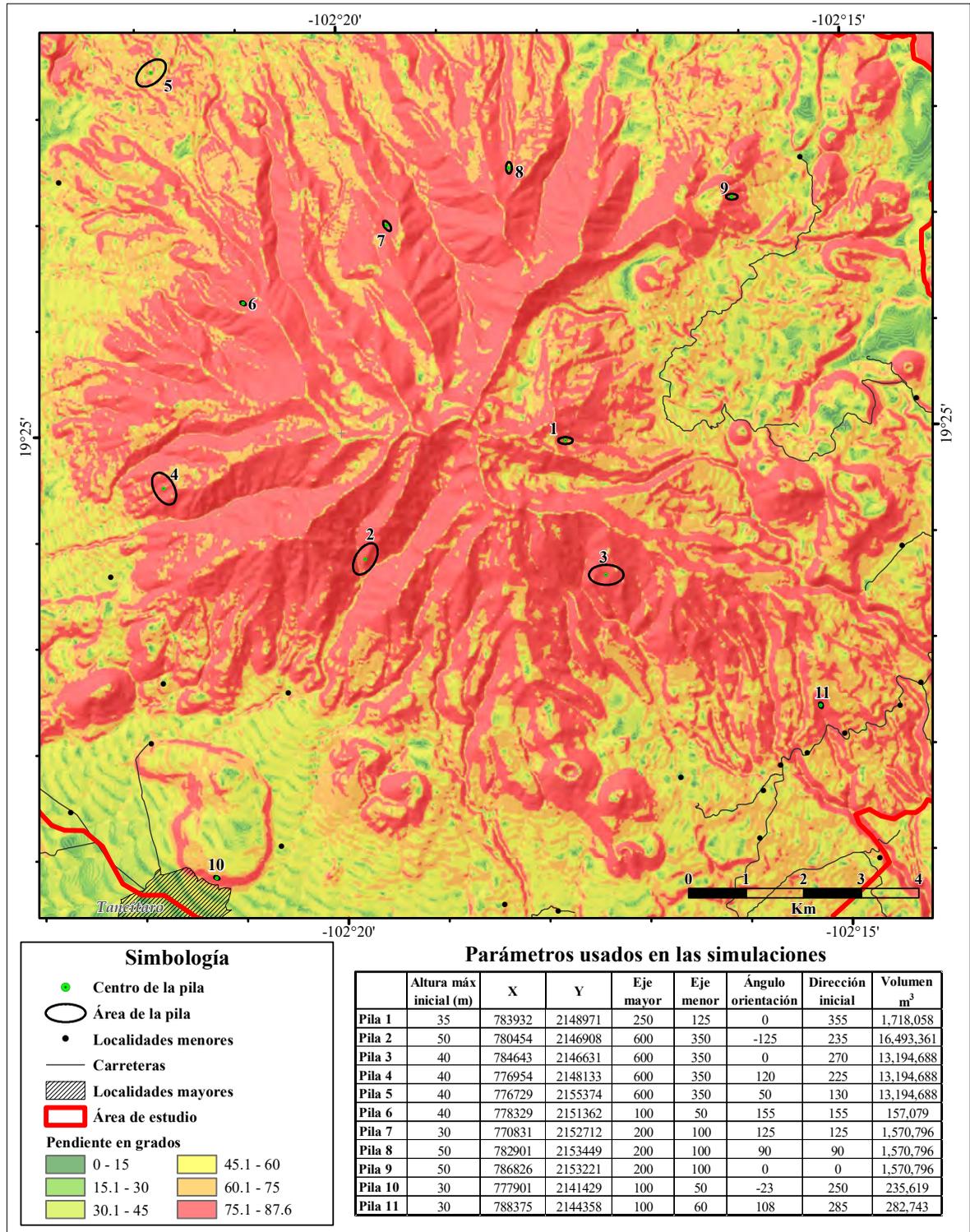


Figura 4. Mapa de localización de las pilas, sus áreas, así como la descripción de los parámetros de simulación. Fuente: elaboración propia con insumos de INEGI (2013; 2018a).

con la proporcionada por Fuentes Junco, aunque se le realizaron correcciones y adecuaciones de acuerdo con la red hidrográfica realizada con el MDE LiDAR. A partir de esa red hídrica se determinaron las jerarquías de los cauces con el método de Strahler (1957) (Figura 2) y se les asignaron buffers de exposición de acuerdo con la jerarquía u orden del cauce (orden 1 = 5 metros de distancia, 2 = 10 metros, 3 = 20 metros, 4 = 30 metros y 5 = 50 metros hacia cada lado del cauce). Para inundaciones no se hizo análisis de riesgo, únicamente de la vulnerabilidad.

Análisis de la vulnerabilidad

Este trabajo se enfocó en la vulnerabilidad por exposición, sensibilidad y resiliencia para los distintos elementos (la población, la infraestructura y los recursos económico-ambientales) mediante la implementación del modelo SAVE (Morales-Manilla y Prieto, 2010; Morales-Manilla, 2010). Las relaciones espaciales de la población fueron analizadas a partir de los datos del Censo 2020, los cuales están disponibles por manzana para localidades urbanas (INEGI, 2021b) y por localidad para áreas rurales (INEGI, 2021a). La información por manzanas en shapefile usada fue la del inventario nacional de viviendas 2020 (INEGI, 2020) (Figura 5).

Las variables que se consideraron para el análisis de sensibilidad de la población fueron (Tabla 1): a) población de 0 a 14 años; b) población de 60 años y más; c) población con discapacidad; d) población de 15 años y más analfabeta; e) población en hogares censales con persona de referencia mujer; f) viviendas particulares habitadas que no disponen de automóvil o camioneta, ni de motocicleta o motoneta; g) viviendas particulares habitadas sin ningún bien, y h) viviendas particulares habitadas sin tecnologías de la información y de la comunicación (TIC). Para el análisis de la resiliencia se contemplaron las variables de: a) población de 12 años y más ocupada y b) población afiliada a servicios de salud. Estas variables se estandarizaron con respecto al máximo porcentaje de cada una de ellas y luego se dividieron en cinco categorías de igual intervalo (los cuales, posteriormente, su usaron como niveles, de muy bajo a muy alto).

Otro insumo para el análisis de la vulnerabilidad fue una encuesta para identificar el nivel de percepción del riesgo, que fue llevada a cabo mediante la aplicación de un cuestionario entre los pobladores (Figura 6). El cuestionario se diseñó para ser aplicado exclusivamente a la población en zonas de peligro previamente identificado y consistió en leer a las personas una serie de preguntas cerradas y abiertas, las cuales iban siendo respondidas a mano por los encuestadores en un formato impreso (Anexo 1). La aplicación se realizó mediante visita aleatoria a las viviendas, con las restricciones de que los encuestados fueran mayores de edad y que ese fuera su lugar de residencia al momento de contestar. Los cuestionarios se aplicaron del 6 al 11 de noviembre de 2021 y el 30 de abril de 2022. El tamaño de la muestra se determinó con base a los 6083 habitantes mayores de edad asentados en zonas de peligro, con un nivel de confianza del 95% y un intervalo de confianza de 8.68. De acuerdo con lo anterior, el tamaño de muestra fue de 125 cuestionarios, aplicados por muestreo aleatorio simple (Tamayo y Tamayo, 2003; Onwuegbuzie y Collins, 2007) y tratando de no realizarlos tan cerca uno de otro.

La información requerida para la evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura (para este elemento solo se consideró la sensibilidad) fue obtenida de los datos vectoriales escala 1:50 000, claves de carta E13B28, E13B29, E13B38 y E13B39, producidos por INEGI (2018a) y los datos vectoriales de la Red Nacional de Caminos, producido por IMT-SCT-INEGI (2021). La evaluación de la vulnerabilidad (sensibilidad) de los recursos naturales (y actividades agrícolas) se basó en el mapa de uso de suelo presentado por Valdés-Carrera *et al.* (2022), el cual fue modificado y actualizado para este trabajo.

Análisis integrado del riesgo

Las capas generadas anteriormente, tanto de peligro como de vulnerabilidad, se normalizaron a cinco rangos para hacer los cruces de capas con valores similares. Sólo en el caso de percepción del riesgo se usaron tres valores, por el tipo de respuesta que nos dieron las personas encuestadas.

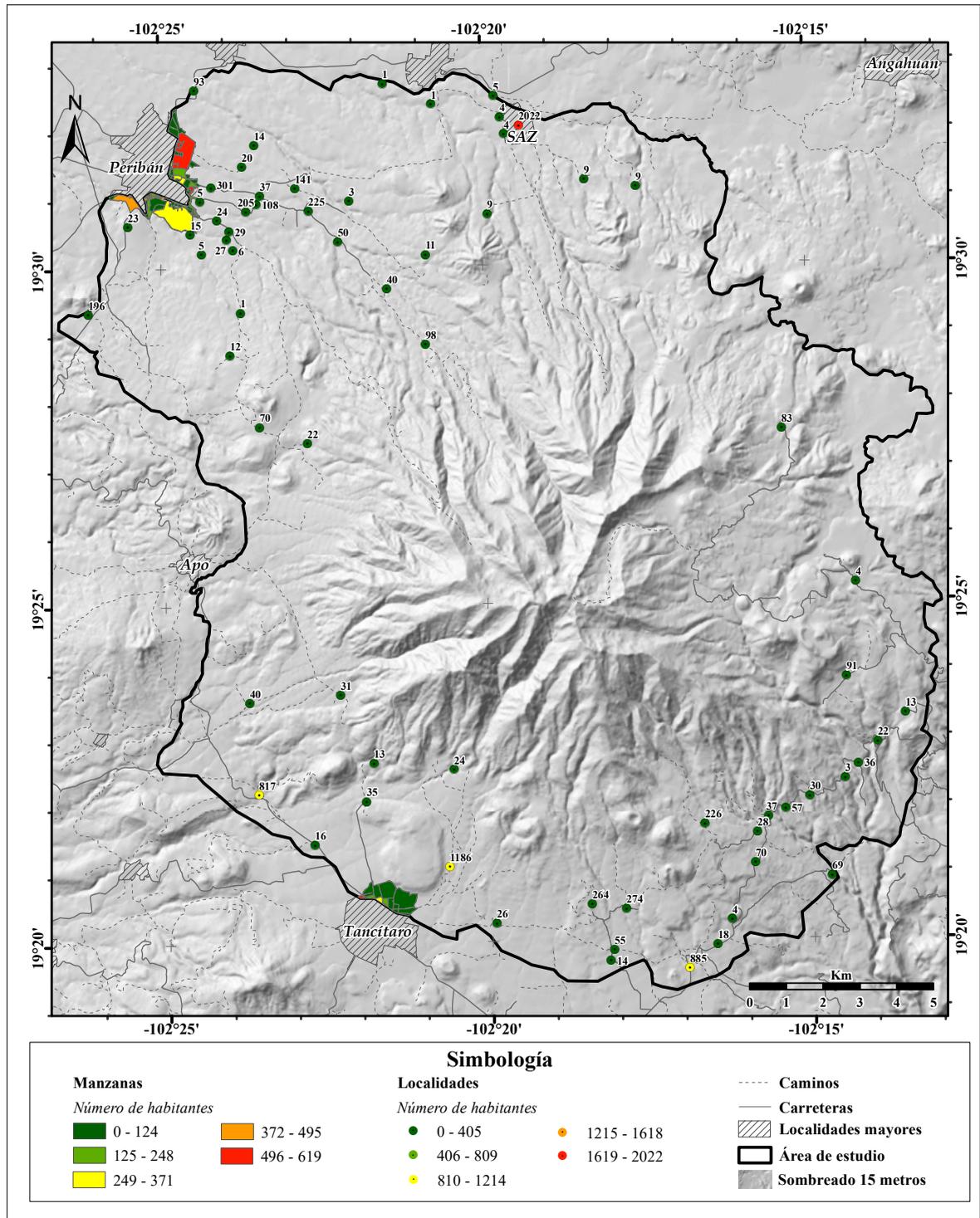


Figura 5. Ubicación de las localidades y su número de habitantes (numerales junto a los círculos). Para las manzanas de Peribán y Tancitaro se muestran los rangos correspondientes a la densidad de población. Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2013; 2018a; 2020; 2021a; 2021b).

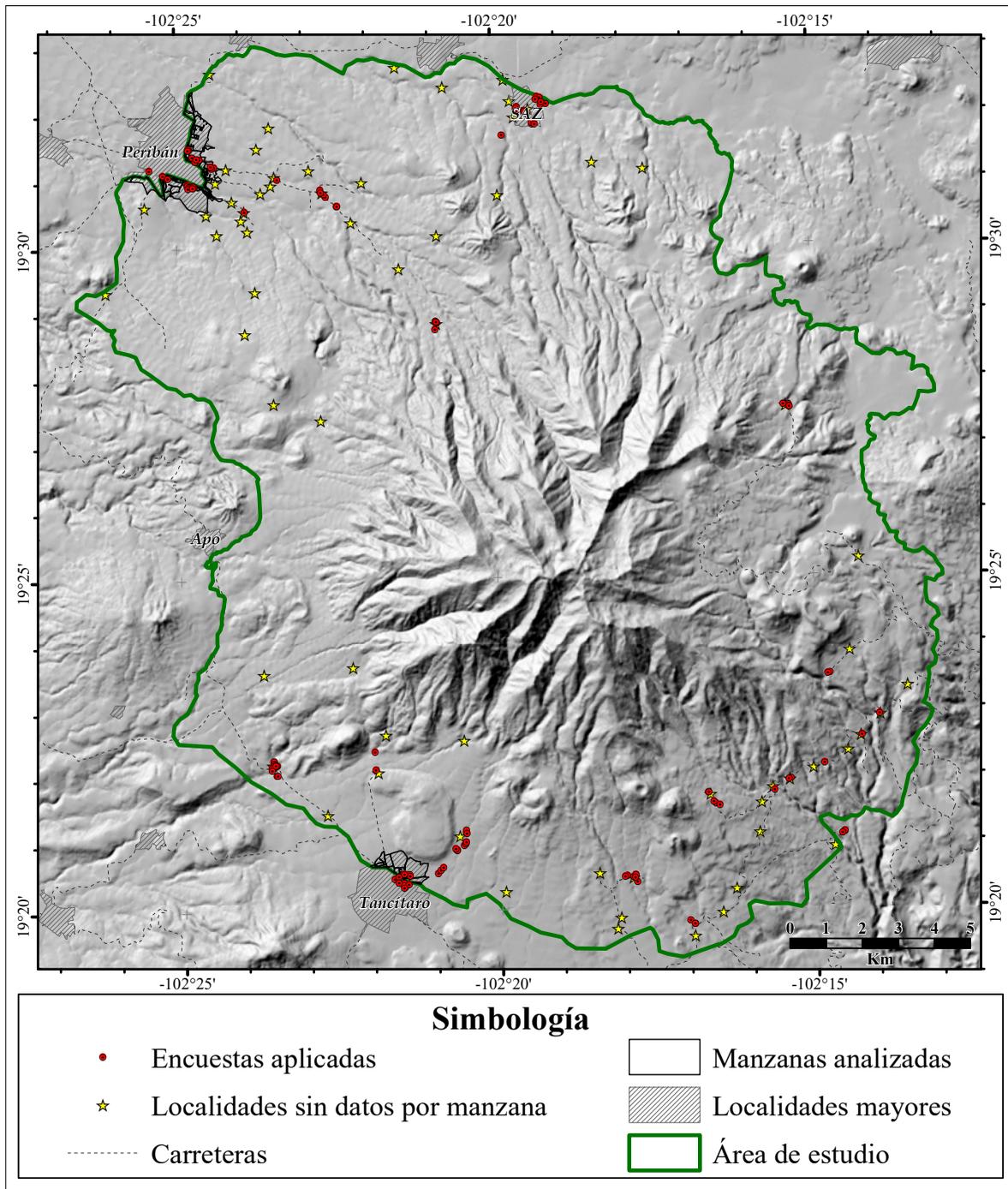


Figura 6. Mapa de ubicación de los cuestionarios aplicados, así como de las localidades y manzanas que fueron analizadas como parte de la vulnerabilidad. Fuente: elaboración propia con insumos de INEGI (2013; 2018a; 2020; 2021a; 2021b).

RESULTADOS

Peligros

PRM y posibles colapsos

En el mapa de la Figura 7 se pueden apreciar las localidades que presentan mayor cercanía a los PRM ocurridos, y por tanto se les asignaron valores altos de peligrosidad. Los cuadros en distintos colores nos indican el acumulado de zonas propensas a colapsos que fueron identificadas, cuyas zonas de mayor peligro se reconocen por el color rojo, mientras que las de menor peligro se identifican por el color verde.

Simulaciones de avalanchas de escombros

Las alturas de depósitos a partir de los cuales se determinó el nivel de peligro fueron los siguientes: 0.1 a 0.5 metros de altura = peligro muy bajo, 0.51 a 1 metros de altura = peligro bajo, 1.1 a 2 metros = peligro medio, 2.1 a 3 metros = peligro alto y +3 metros = peligro muy alto. Estos niveles se determinaron tomando en cuenta las posibles afectaciones y daños que pudieran sufrir las personas y sus bienes ante la ocurrencia de una avalancha de escombros. Como podemos observar en la figura 8, las localidades que podrían resultar afectadas serían El Leal (Peribán), El Jazmín, La Joya y la parte norte de la cabecera municipal (Tancítaro), Pácata y Rancho Nuevo (Nuevo Parangaricutiro) y algunos caminos de los tres municipios mencionados.

Inundaciones

Se identificaron varias localidades con altos niveles de exposición a inundaciones, basándonos en la cercanía a los distintos escurrimientos previamente jerarquizados por orden de Strahler, estas áreas pobladas se muestran en el mapa de la Figura 9. Al respecto se mencionan como localidades de especial atención Peribán, Zirimondiro, Santa Ana Zirotto, Araparícuaro y Choritiro (por ser las de mayor población).

Vulnerabilidad

En la Figura 10 se muestran los resultados relativos a la sensibilidad de los habitantes asentados en el área de estudio. Podemos identificar que las locali-

dades con más altos niveles de sensibilidad son La Toma y el Pino, del municipio de Peribán, al igual que una de las manzanas situadas al norte de esa cabecera municipal.

En el mapa de la Figura 11 se muestran las características de la población con respecto a la resiliencia, en este caso, mientras más alta es mejor, con lo cual tienen más posibilidades de recuperarse frente a un agente perturbador. Las localidades de principal atención, por tener bajos niveles de resiliencia, son La Loma, El Capillo y el Pino –del municipio de Peribán– y Choritiro, La Chivera y Encino Blanco (del municipio de Tancítaro); mientras que las manzanas con más bajos niveles de resiliencia se presentan al sur y este de la cabecera municipal de Peribán y en Tancítaro se localizan al este de la cabecera municipal.

Con respecto a la sensibilidad de la infraestructura, se presenta el mapa de la Figura 12, en la cual se muestran en tonos rojos las infraestructuras con mayor nivel de sensibilidad y en verde las de menor. Esta categorización se realizó teniendo en cuenta las deficiencias y complicaciones que se tendrían si este elemento se llega a dañar o perder durante la ocurrencia de un peligro.

En el mapa de la Figura 13 se muestran los distintos niveles de sensibilidad para los recursos naturales y actividades agrícolas de la zona de estudio. Además, en la Tabla 2 podemos apreciar las áreas y porcentajes ocupados por cada elemento. La categorización de la sensibilidad se realizó considerando las afectaciones, costos y tiempo de recuperación del elemento.

Los resultados de la evaluación de la percepción del riesgo de los pobladores se muestran en el mapa de la Figura 14, donde podemos apreciar la distribución espacial de las respuestas. En este caso, es de llamar la atención que existen personas en la zona del desastre de Peribán (de 2018) que no advierten el peligro; del mismo modo, en Zirimondiro existen personas asentadas en las barrancas de los ríos que no perciben peligros, siendo estas áreas las más propensas a la ocurrencia de un desastre.

Análisis del riesgo desglosado

En el mapa de la Figura 15 se muestran los distintos niveles de riesgo de la población por los PRM, obte-

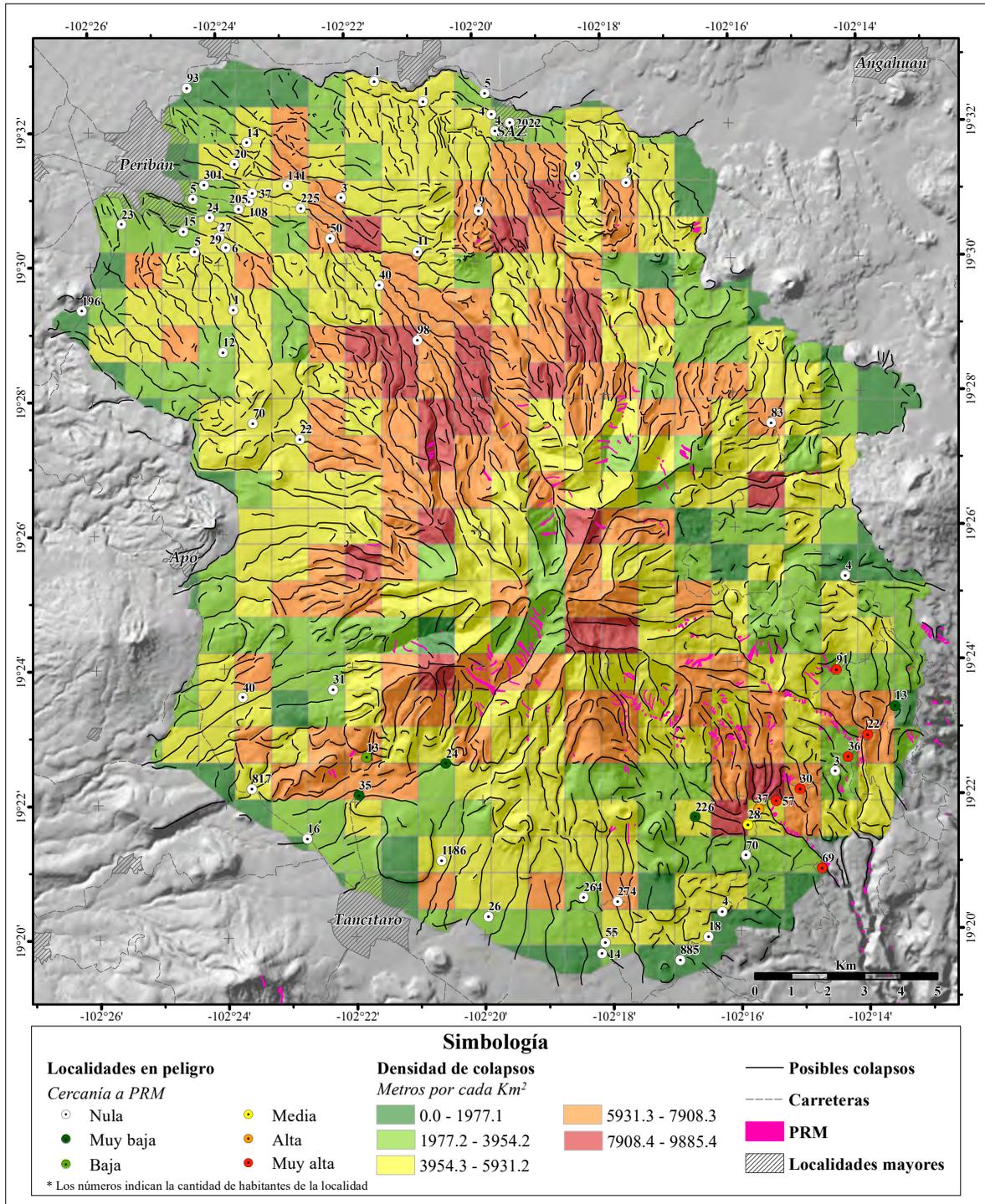


Figura 7. Niveles de peligro por cercanía a áreas con Procesos de Remoción en Masa (PRM) y densidad de posibles colapsos identificados para el área de estudio. Fuente: elaboración propia con insumos de INEGI (2013; 2018a) y Valdés-Carrera et al., (2022).

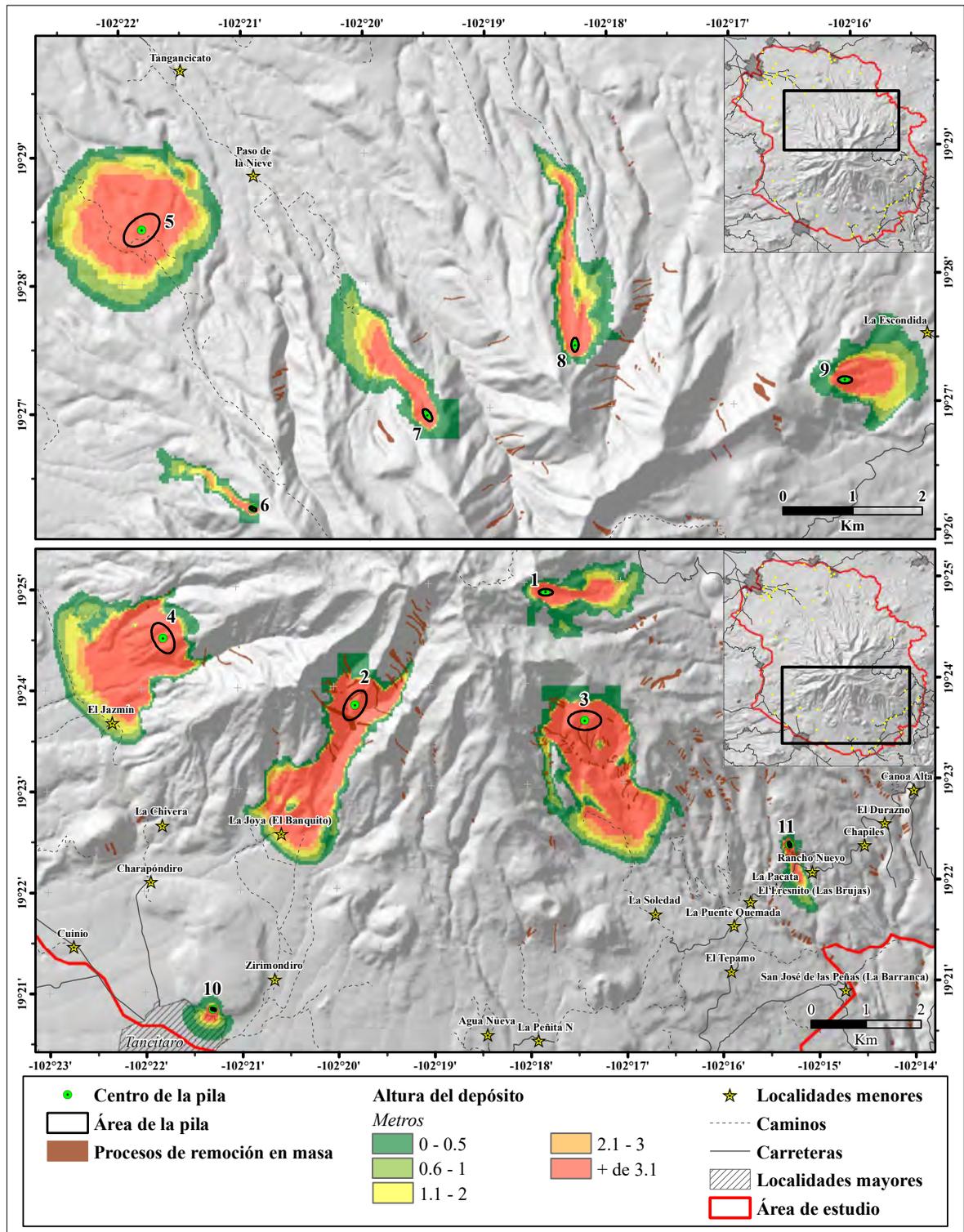


Figura 8. Resultados de las simulaciones de avalanchas y sus alturas de depósito. Los números junto a las avalanchas se corresponden con los de la tabla de la Figura 4. Fuente: elaboración propia con insumos de INEGI (2013; 2018a).

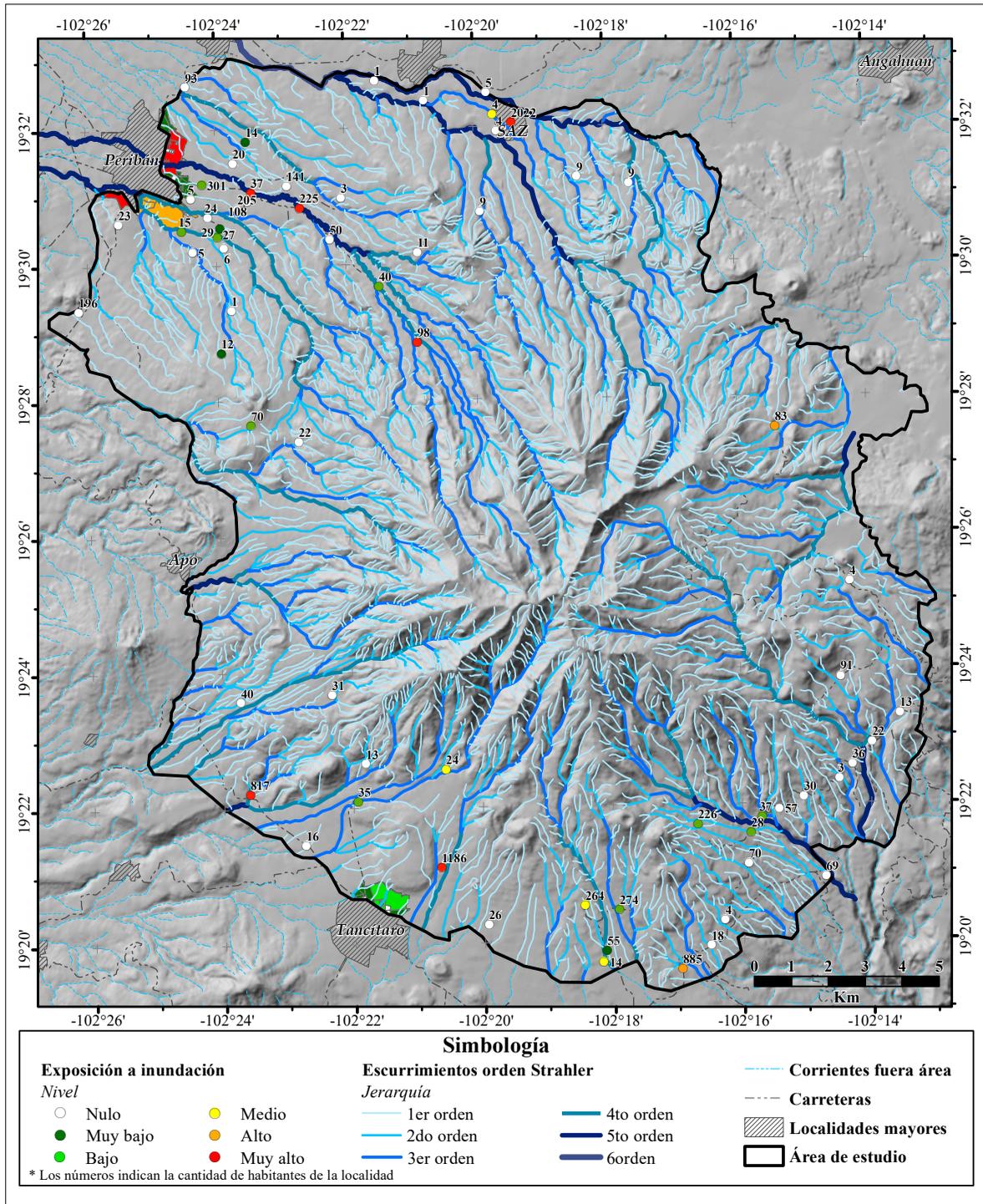


Figura 9. Nivel de exposición a inundaciones por cercanía para las localidades y manzanas de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con insumos de Fuentes Junco (2002) e INEGI (2013; 2018a; 2021a; 2021b).

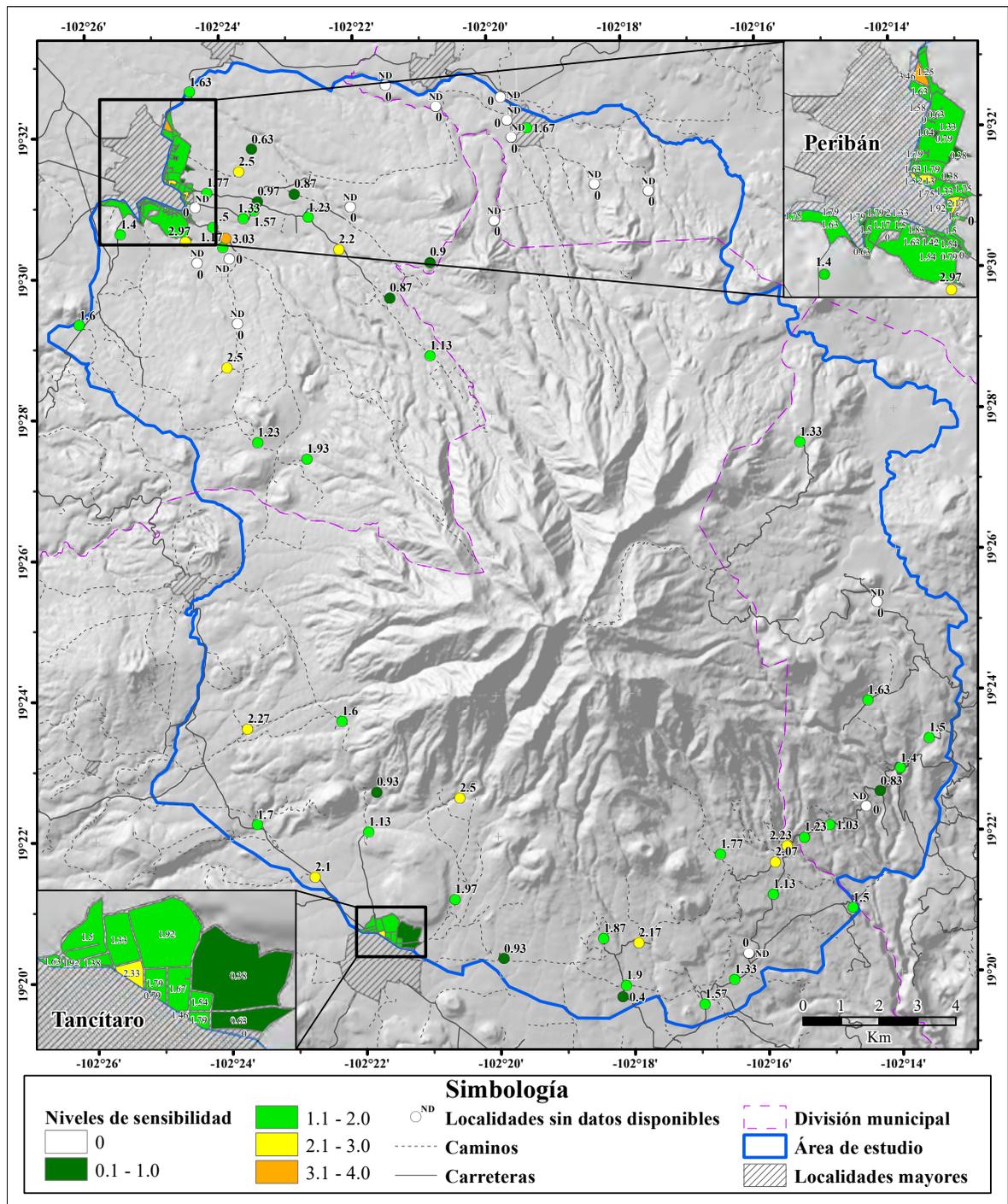


Figura 10. Mapa de sensibilidad para las localidades y manzanas del área de estudio. Fuente: elaboración propia con base en los datos de INEGI (2021a; 2021b). Nota: los números nos muestran el nivel de sensibilidad para cada elemento analizado. ND significa no disponible, debido a que INEGI no proporciona detalles de las características de la población cuando el número de habitantes en la localidad es muy bajo (menor a 10).

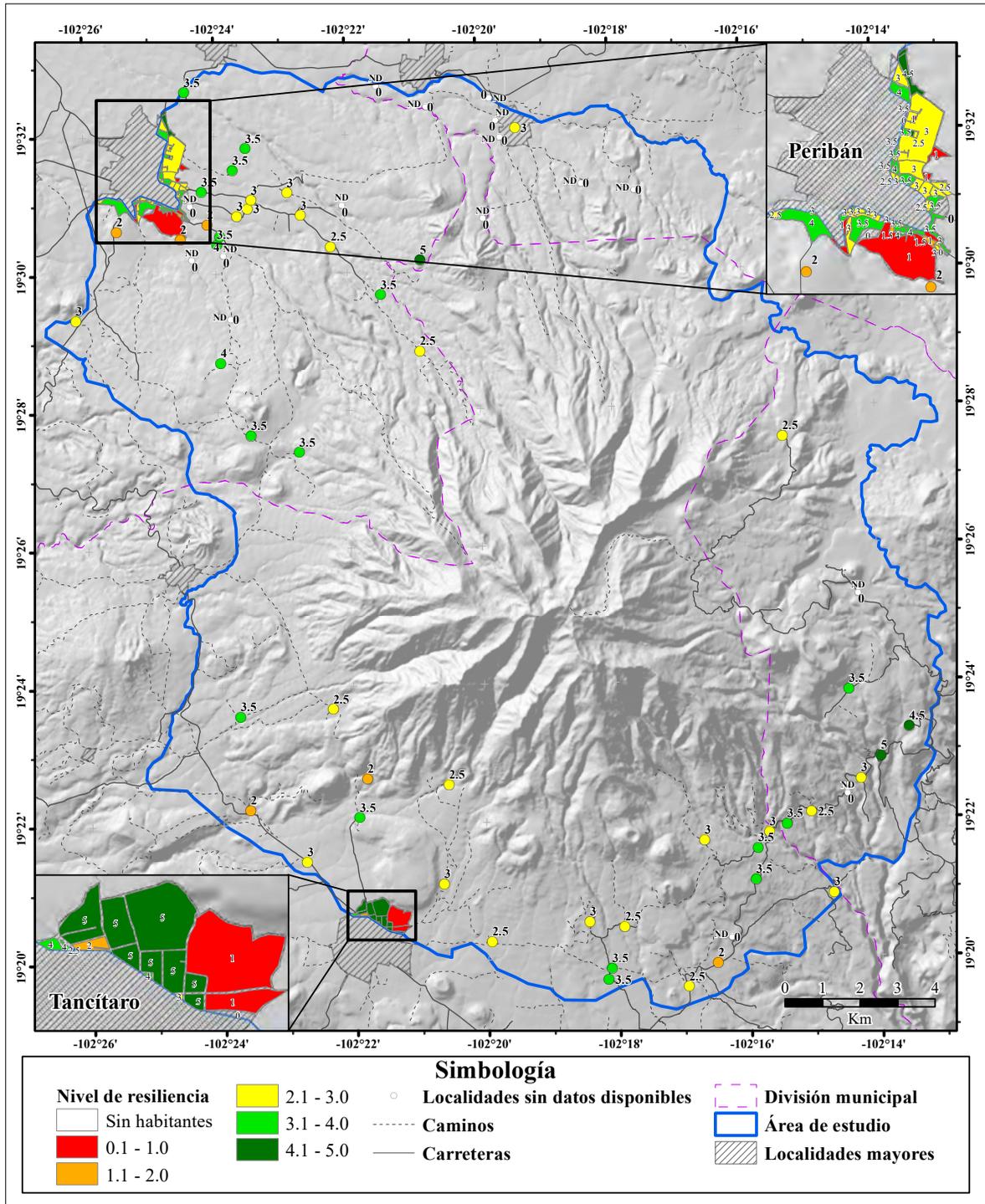


Figura 11. Mapa de resiliencia para las localidades y manzanas del área de estudio. Fuente: elaboración propia con base en los datos de INEGI (2021a; 2021b). Nota: los números nos muestran el nivel de sensibilidad para cada elemento analizado. ND significa no disponible, debido a que INEGI no proporciona detalles de las características de la población cuando el número de habitantes en la localidad es muy bajo (menor a 10).

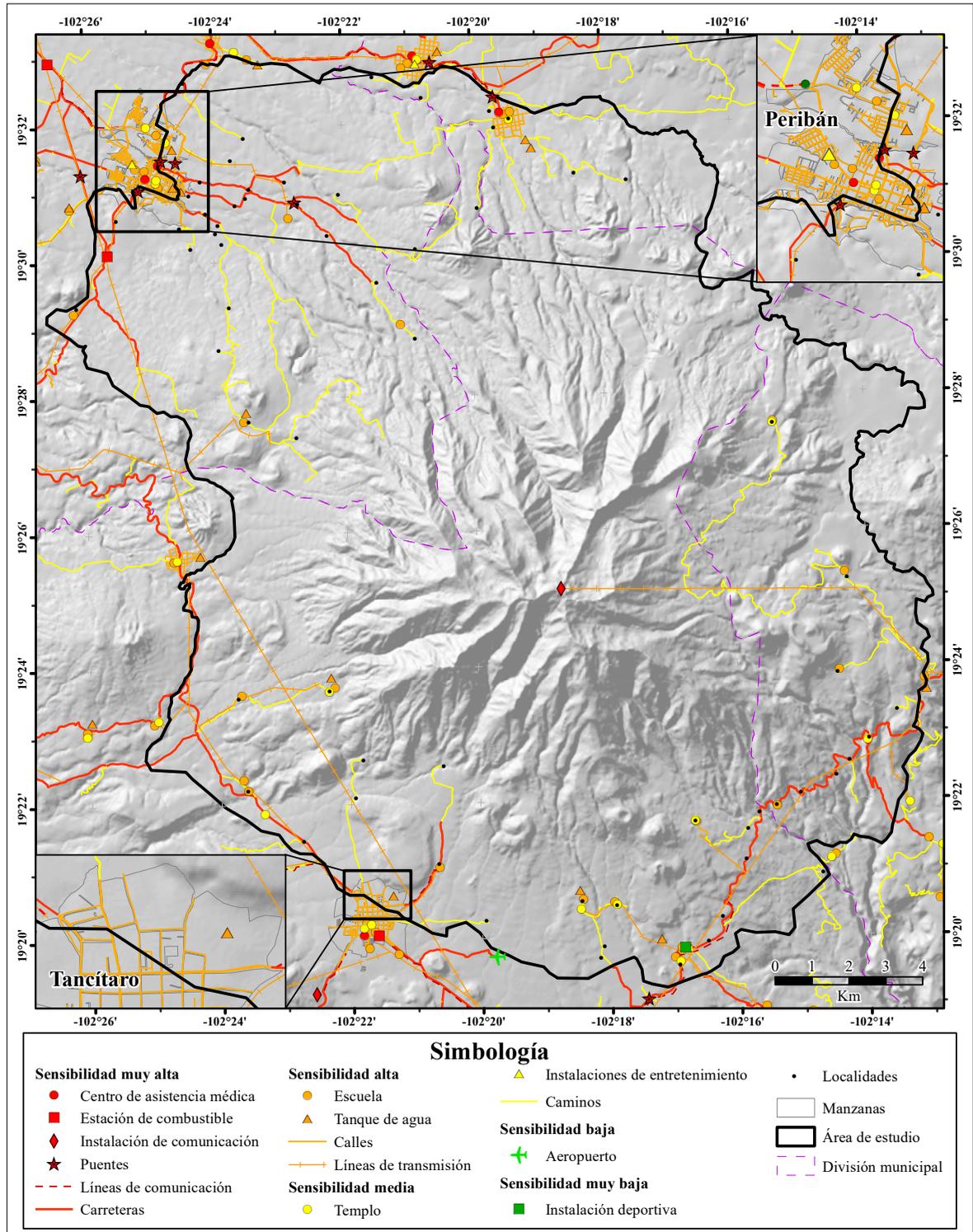


Figura 12. Mapa de sensibilidad de la infraestructura presente en el área de estudio. Fuente: elaboración propia teniendo como insumos los datos de IMT-SCT-INEGI (2021) e INEGI (2018a; 2021a; 2021b).

Tabla 2. Sensibilidad y cubrimiento de los recursos naturales y las actividades agrícolas del área de estudio.

| Tipo de vegetación-cubierta | Área en km ² | Porcentaje del total | Nivel de sensibilidad |
|--|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| Área sin vegetación aparente | 6.27 | 1.52 | 1 |
| Agricultura permanente - aguacate | 176.45 | 42.91 | 4 |
| Bosque mesófilo de montaña - aile, encino, pino, helechos, trepadoras, epífitas | 1.72 | 0.42 | 3 |
| Asentamiento humano | 5.37 | 1.31 | 5 |
| Agricultura de temporal - maíz, hortalizas | 12.11 | 2.94 | 3 |
| Bosque de oyamel | 45.44 | 11.05 | 3 |
| Pastizal - pastos inducidos | 6.57 | 1.60 | 2 |
| Bosque de pino - pino de altura, zacatonal | 27.62 | 6.72 | 3 |
| Bosque mixto - pino, encino, aile, cedro, enebro, madroño, tepozán, tejocote, tila, aceituno | 129.62 | 31.52 | 3 |
| Agricultura permanente - zarzamora, arándanos | 0.07 | 0.02 | 4 |
| Total | 411.22 | 100.00 | |

Fuente: elaboración propia con base en Valdés-Carrera *et al.* (2022).

nidos de la suma de la vulnerabilidad y el peligro, también se presenta la vulnerabilidad (exposición más sensibilidad, menos resiliencia) a inundación. Posteriormente, en el mapa de la Figura 16 podemos observar el riesgo para la infraestructura del área, estas variables fueron analizadas en formato ráster. Finalmente, en el mapa de la Figura 17 podemos apreciar los resultados del riesgo para los recursos naturales y las actividades agrícolas (que son de alta relevancia) para la zona de estudio. Para inundaciones, se muestra únicamente la vulnerabilidad.

DISCUSIÓN

En trabajos recientes realizados en el área, se reconocen los altos niveles de ocurrencia de PRM (Valdés-Carrera *et al.*, 2022) y la alta y creciente susceptibilidad a inundaciones (Vázquez *et al.*, 2023), por lo cual el Pico de Tancitaro se debe considerar una zona de peligro por fenómenos hidrogeomorfológicos. Adicionalmente, en este trabajo se identifican las altas pendientes, la geología, el cambio de uso de suelo y las fuertes

precipitaciones de la zona como determinantes para su alta peligrosidad. Aunado a lo anterior, tenemos altos niveles de vulnerabilidad en algunas localidades y manzanas, lo que contribuye a que los niveles de riesgo se incrementen; más aún, se ha podido identificar que existe población que no percibe riesgo, a pesar de haber vivido un desastre recientemente o que viven en una zona de muy alto peligro (plenamente identificado por los demás pobladores y las autoridades) (Figura 18).

Los bajos niveles de percepción del riesgo se atribuyen a la corta memoria respecto a desastres, al efecto de que algo tan grave no volverá a ocurrir pronto, o al desconocimiento de las dinámicas y peligros de la zona (esto se presenta principalmente en personas que tienen muy poco tiempo viviendo en las áreas de peligro).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se recomienda evitar el cambio de uso de suelo, sobre todo en las áreas en las que se han presentado PRM en años recientes (parte sureste de la

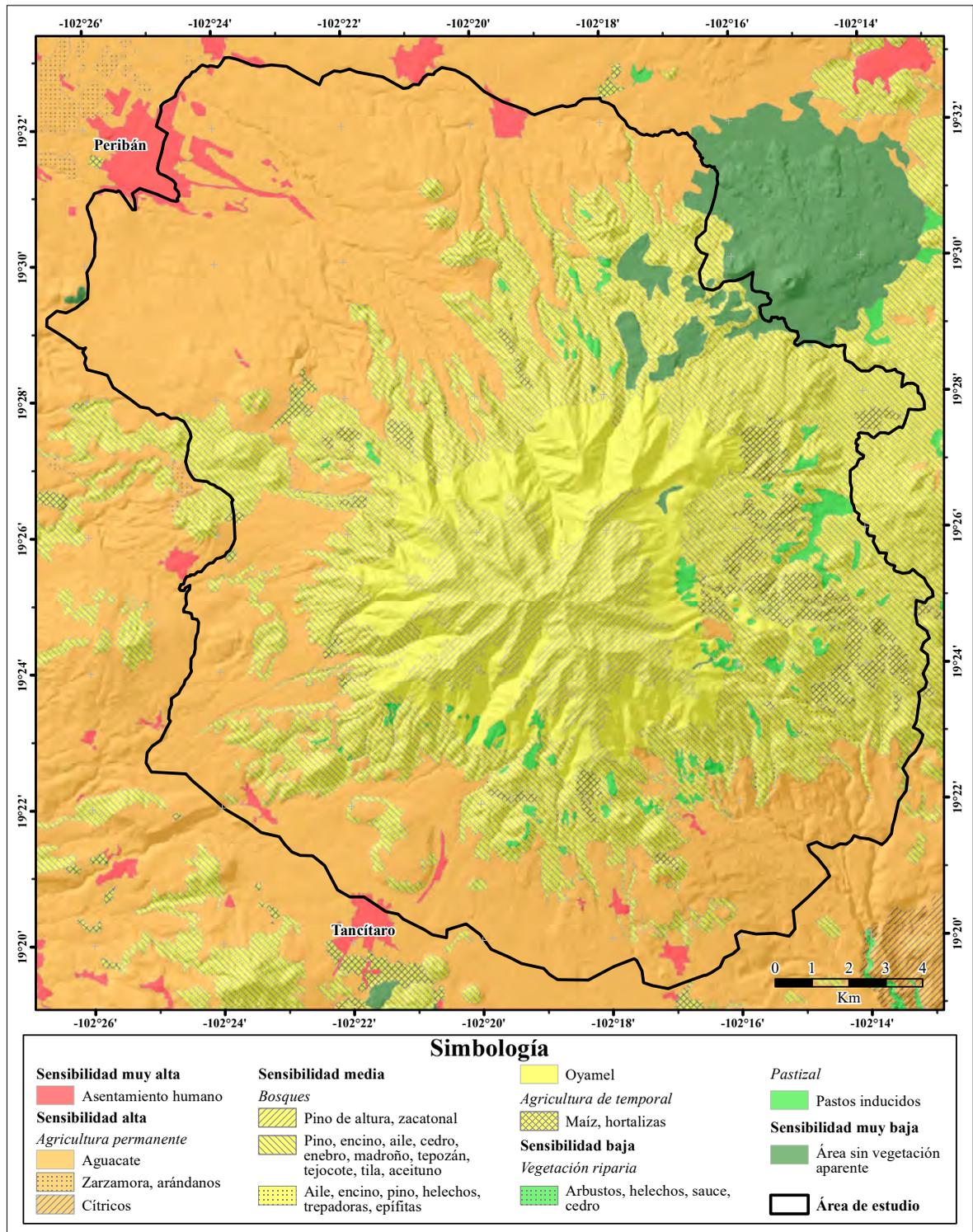


Figura 13. Mapa de sensibilidad de los recursos naturales y las actividades agrícolas del área de estudio. Fuente: elaboración propia con base y modificación de Valdés-Carrera et al. (2022).

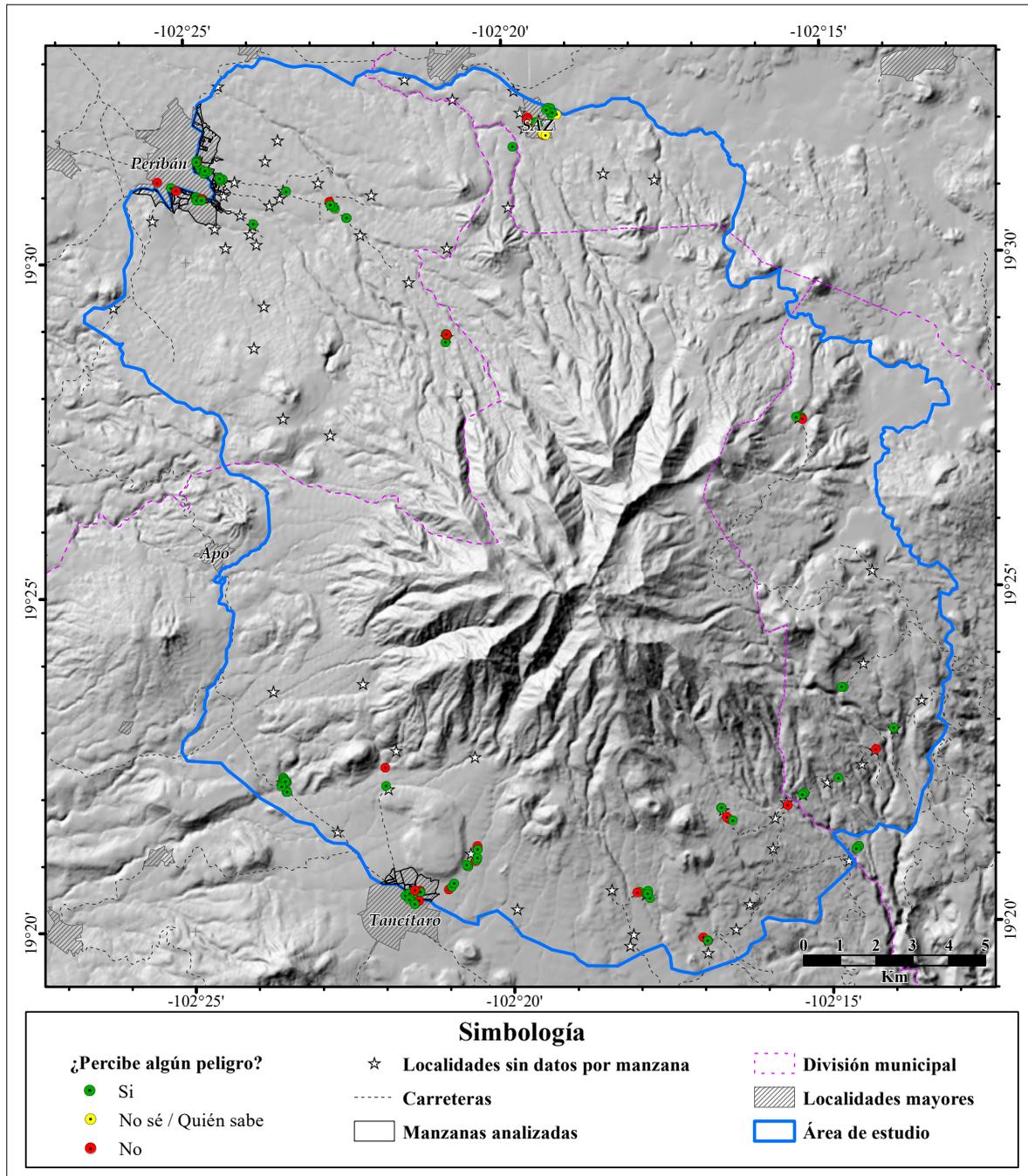


Figura 14. Mapa de percepción del riesgo según los encuestados de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con insumos de INEGI (2013; 2018a; 2018b; 2020).

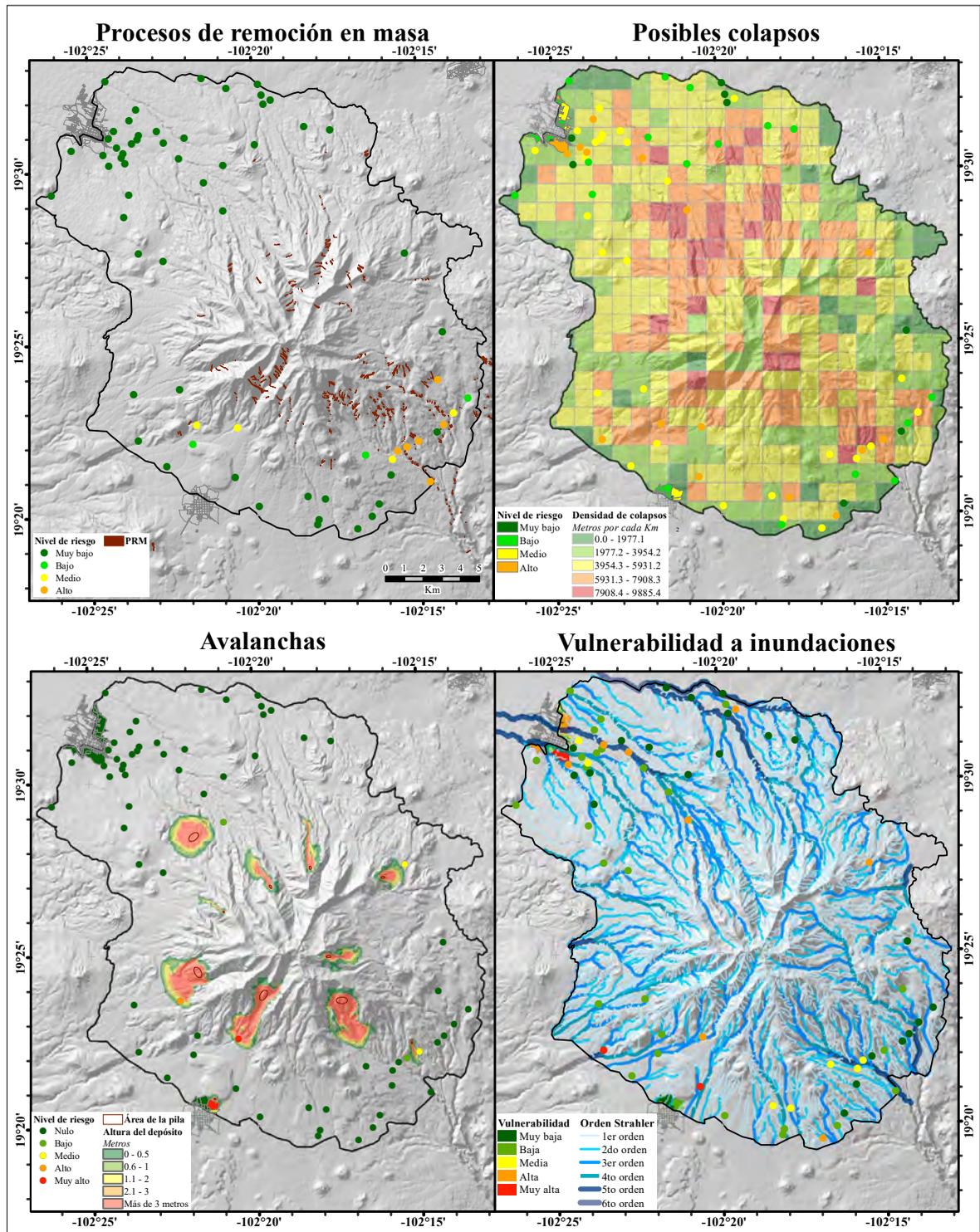


Figura 15. Mapa del riesgo según la población por PRM y vulnerabilidad a inundación. La línea negra indica el área de estudio y las líneas grises son las manzanas fuera del área de estudio. Fuente: elaboración propia con insumos de Fuentes Junco (2002), INEGI (2013; 2018a; 2021a; 2021b) y Valdés-Carrera et al. (2022).

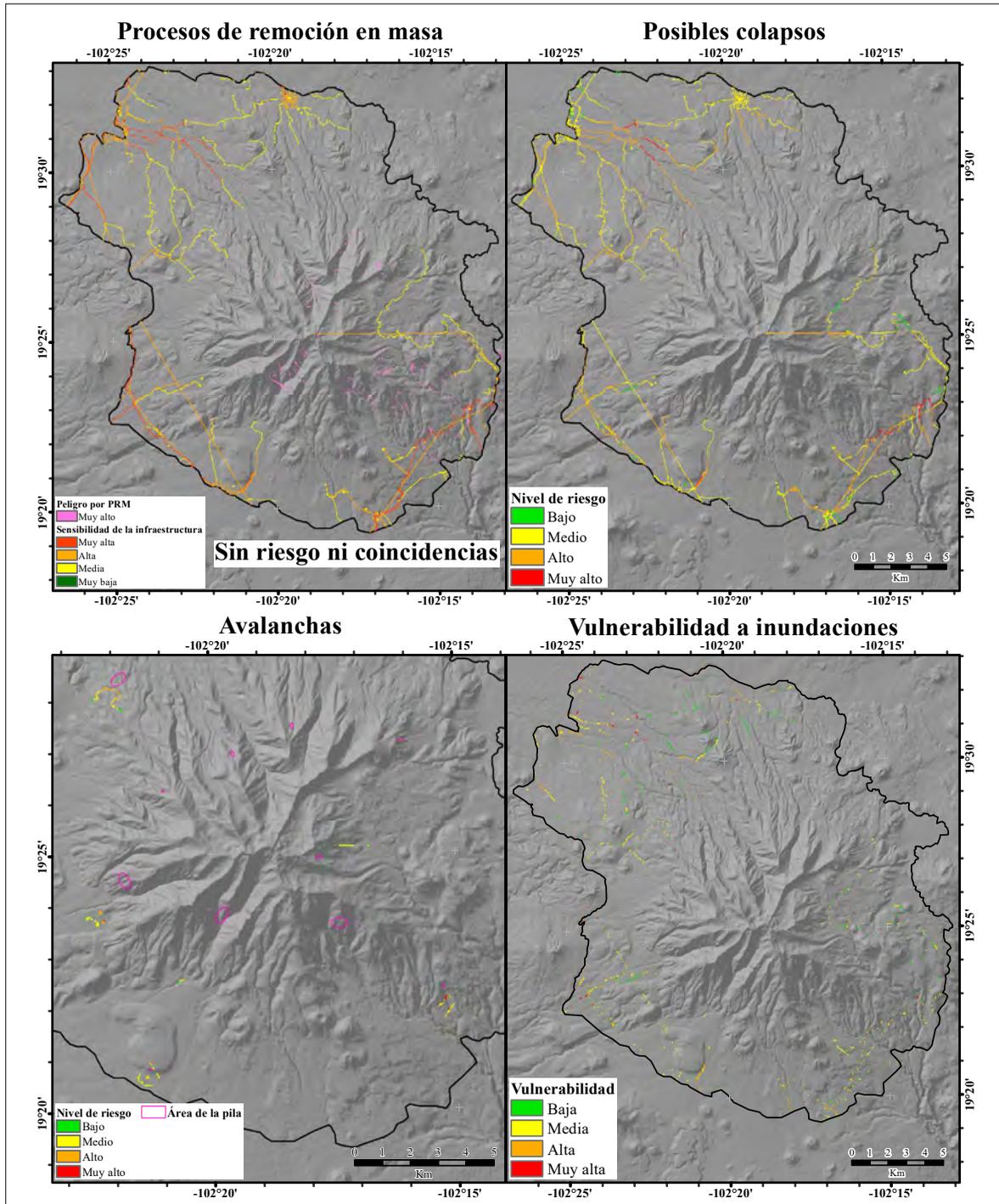


Figura 16. Mapa del riesgo para la infraestructura por PRM y vulnerabilidad a inundación. Fuente: elaboración propia con insumos de Fuentes Junco (2002), INEGI (2013; 2018a; 2021a; 2021b), IMT-SCT-INEGI (2021) y Valdés-Carrera et al. (2022). Nota: para el caso de los procesos de remoción en masa no se encontraron coincidencias por lo tanto se considera que no existe riesgo por los procesos ocurridos y en este mapa se despliegan únicamente las características y niveles de la vulnerabilidad y el peligro.

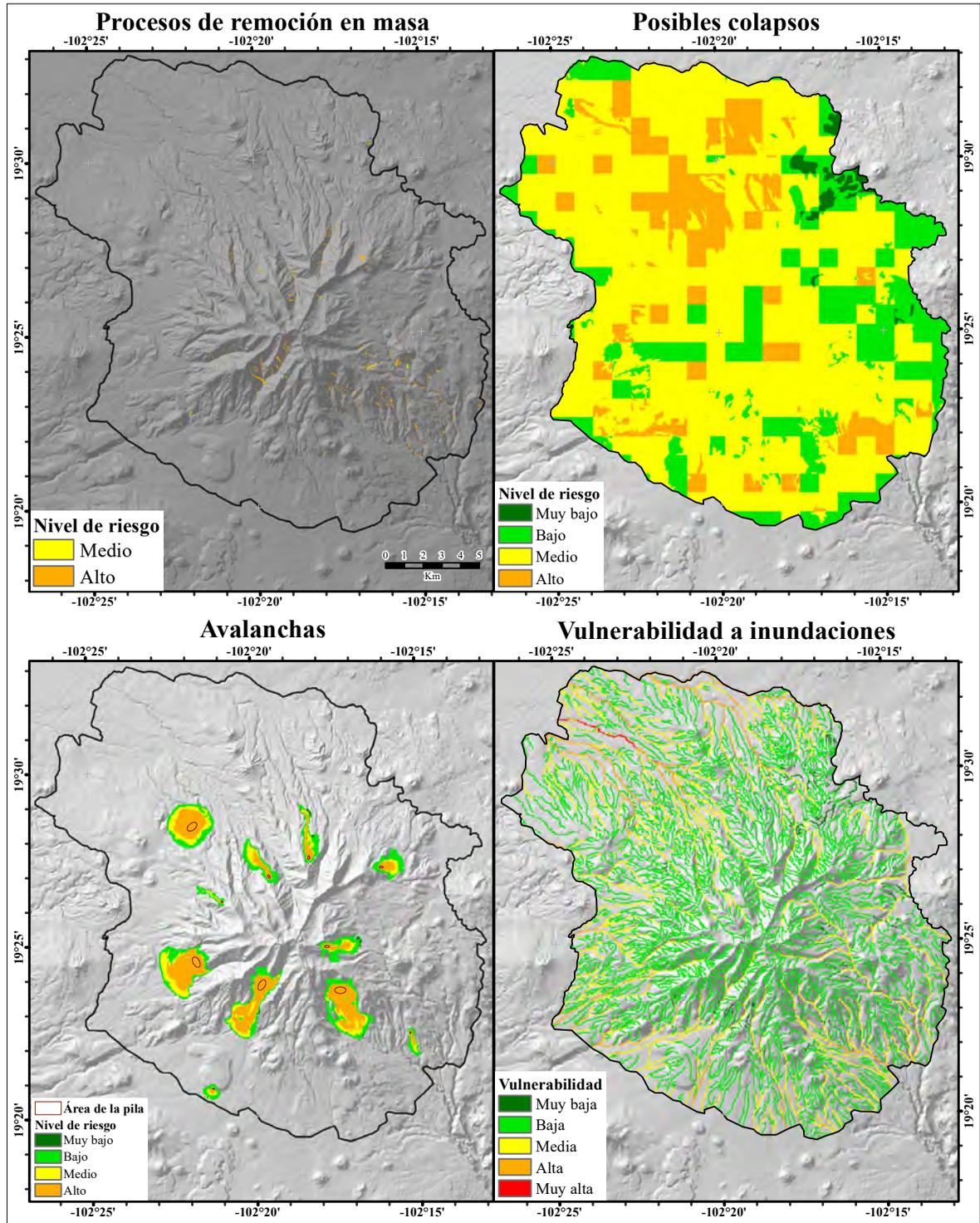


Figura 17. Mapa de riesgo por PRM para los recursos naturales y las actividades agrícolas y de vulnerabilidad a inundación. Fuente: elaboración propia con insumos de Fuentes Junco (2002), INEGI (2013; 2018a; 2021a; 2021b) y Valdés-Carrera et al. (2022).



Figura 18. Situación actual del área de estudio: a) fotografía del encauzado artificial del río Cutio en Peribán; b) cauce en la localidad de Zirimondiro, donde las viviendas se ubican sobre y a los lados del lecho del río. Fuente: fotografías propias tomadas en 2023.

zona de estudio), ya que esto puede contribuir a la ocurrencia o aceleración de estos fenómenos y las repercusiones económicas y de infraestructura pueden ser cada vez mayores.

A lo largo de la elaboración de este trabajo se mantuvo comunicación con las autoridades municipales y organismos de protección civil de los municipios en cuestión, los cuales comentan que ellos han identificado el peligro y le han informado a la población, pero que esta (de manera general) prefiere hacer caso omiso de los avisos o consideran que es un riesgo aceptable y que pueden vivir así. En este sentido, lo que se recomienda es que se informe y concientice a las poblaciones en riesgo de la necesidad de realizar las acciones (colectivas e individuales) que deben llevar a cabo en caso de presentarse un fenómeno adverso ya que el elemento clave en estos casos será la preparación (UNISDR, 2009).

Desde esta investigación se ha propuesto y extendido la invitación a las autoridades de los municipios para organizar talleres informativos y participativos y dar a conocer esta información (principalmente enfocados a las zonas de alto ries-

go), solamente dos de tres municipios han estado interesados. Adicionalmente, se ha sugerido a las autoridades que soliciten o gestionen una estación meteorológica (operada por la Comisión Nacional del Agua) para sus respectivos municipios o cercana a la cima del PT, con el objetivo de realizar un mínimo de monitoreo climatológico y se les recalcó la importancia de impulsar la elaboración del Atlas de Riesgo municipal a través de la solicitud de los apoyos federales que existen para obtener estas herramientas de planeación. Obtenerlas será de vital importancia para estos municipios que presentan peligros naturales por sismicidad, inundaciones y procesos de remoción en masa, sin descartar los de carácter meteorológico que también son de importancia en la región.

Finalmente, se considera que los estudios de los peligros naturales en la zona deben de continuar y ser monitoreados a detalle. Con ello se puede lograr una mejor comprensión de estos fenómenos y tener mejores herramientas en su prevención. En la parte social, es primordial informar, capacitar y preparar a los distintos actores, para que, a mediano plazo se logre disminuir la vulnerabilidad, y con ello, el riesgo.

AGRADECIMIENTOS

La primera autora agradece la beca de investigación posdoctoral otorgada por el programa de Becas Posdoctorales de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Se agradece también a la Unidad de Planeación y Manejo Territorial (UPLAMAT) por su recepción y financiamiento durante la estancia posdoctoral.

REFERENCIAS

- Bocco, G., Mendoza, M. E., Velázquez, A., y Torres, A. (1999). La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo. *Investigaciones Geográficas*, 40, 7-22.
- Canonical-Ltd. (2012). UBUNTU - Linux. 12.04 LTS *Precise Pangolin* (12.04).
- Capra, L., y Macías, J. L. (2000). 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). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 117, 213-235.
- Capra, L., Macías, J. L., Scott, K. M., Abrams, M., y Garduño-Monroy, V. H. (2002). Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico - Behavior, and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 81-110.
- Danciu, C., Mrchis, D., y Cucăilă, S. (2021). The Influence of Physical Parameters on the Mechanical Characteristics of Some Volcanic Magmatic Rocks of the Andesite Type. *Mining Review*, 27(2), 30-41. <https://doi.org/10.2478/minrv-2021-0014>
- Demant, A. (1981). L'Axe Néovolcanique Transmexicain—Etude volcanologique et pétrographique—signification géodynamique [PhDthesis]. *UniversitadedeAix-Marseille, Marseille*.
- Demant, A. (1979). Vulcanología y petrografía del sector occidental del Eje Neovolcánico. *Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 3, 39-57.
- ESRI (2009). ArcGIS Desktop: Release 9.3.1. *Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute*.
- Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C. M., y Manetti, P. (2000). Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 318, 161-185.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., y Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522–523, 122-149.
- Fuentes Junco, J. de J. A. (2000). *Evaluación del deterioro en áreas naturales protegidas. Un enfoque geomorfológico. El caso del Parque nacional Pico de Tancitaro, Michoacán*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fuentes Junco, J. de J. A. (2002). Cuencas y áreas naturales protegidas: el manejo integrado de los recursos naturales en el Pico de Tancitaro, Michoacán. *Gaceta Ecológica*, 64, 35-71.
- Fuentes Junco, J. de J. A., y Alvarado-Ramos, F. (2006). *Programa de Manejo Sustentable de Ecosistemas de Montaña Propuesta de Programa Operativo de Gestión 2006-2011 "Montaña Pico de Tancitaro"*.
- García, E. (2001). "Climas" (clasificación de Köppen, modificado por García). *Escala 1:1000000. México*.
- Garduño-Monroy, V. H., Corona, P. Ch., Israde, I. A., Menella, L., Arreygye, E., Bigioggero, B., y Chiesa, S. (1999). *Carta Geológica del Estado de Michoacán, Escala 1:250,000*. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas.
- Gares, P. A., Sherman, D. J., y Nordstrom, K. F. (1994). Geomorphology and natural hazards. *Geomorphology*, 10, 1-18.
- Geophysical Mass Flow Group (GMFG) (2007). Titan2D. *State University of New York (SUNY) at Buffalo*, Ed.; 4.0, p. NCSA Open Source License.
- Google Earth (2021). *Imagen satelital de alta resolución (4.5 metros)*.
- Hasenaka, T., y Carmichael, I. S. E. (1985). The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, Central Mexico: Their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 105-124.
- IMT-SCT-INEGI (2021). *Red Nacional de Caminos (RNC)*. <http://rnc.imt.mx/#>
- INEGI (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano. En *CEM 3.0 resolución de 15 x 15 metros, escala 1:50,000*. Clave de cartas usadas: E13B28, E13B29, E13B38 y E13B39. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI (2018a). Conjunto de datos vectoriales serie III, escala 1:50,000. Clave de cartas usadas: E13B28, E13B29, E13B38 y E13B39.
- INEGI (2018b). División política municipal, 1:250000. "Áreas Geoestadísticas Municipales". Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. (01/06/2018). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- INEGI (2018c). Modelo Digital de Elevación Tipo Superficie con 5m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados. Escala 1:10,000. *Claves de carta usadas: E13B28e1*,

- E13B28e2, E13B28e3, E13B28e4, E13B28f1, E13B28f2, E13B28f3, E13B28f4.
- INEGI (2020). Inventario Nacional de Viviendas. En *Shapefile de manzanas del estado de Michoacán*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/masiva/indicadores/inv/16_Manzanas_INV2020_shp.zip.
- INEGI (2021a). Principales resultados por localidad (ITER) 2020. *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=9>
- INEGI (2021b). Principales resultados por AGEB y manzana urbana. *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=10>
- IPCC (2001). Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg2/>
- Landeros Mugica, K. y Urbina Soria F. J. (2021) Guía metodológica para realizar diagnósticos sobre la percepción local del riesgo de desastres. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, *Coordinación Nacional de Protección Civil y Centro Nacional de Prevención de Desastres*. https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/408-GUIA_METODOLOGICA_PCEPCION_RIESGO_LOCAL.PDF
- Lechowska, E. (2018). What determines flood risk perception? A review of factors of flood risk perception and relations between its basic elements. *Natural Hazards*, 94, 1341-1366. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3480-z>
- Legrand, D., Perton, M., Macías, J. L., Siebe, C., Pacheco, J., Chacón, F., Lermo, J., Quintanar, L., y Cisneros, G. (2023). Repeated seismic swarms near Parícutin volcano: precursors to the birth of a new monogenetic volcano in the Michoacán-Guanajuato volcanic field, México? *Bulletin of Volcanology*, 85(30), 15. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01645-0>
- Magaña-González, Y. (2015). "Patricia" destruyó carreteras, casas y cultivos en Michoacán. *Notivideo*. <https://www.notivideo.com/noticia/nota,7870/titulo,%E2%80%9CPatricia%E2%80%9D+destruy%C3%B3+carreteras%2C+casas+y+cultivos+en+Michoac%C3%A1n+/>
- Martínez-Elorriaga, E. (2018, September 26). Suman 8 fallecidos por inundaciones en Peribán. *La Jornada*, 34. <https://www.jornada.com.mx/2018/09/26/estados/034n1est>
- Mazzarini, F., Ferrari, L., y Isola, I. (2010). Self-similar clustering of cinder cones and crust thickness in the Michoacan-Guanajuato and Sierra de Chichinautzin volcanic fields, Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 486, 55-64.
- McGuire, W. J. (1996). Volcano instability: a review of contemporary themes. *Geological Society, London, Special Publications*, 110, 1-23.
- Morales-Manilla, L. M. (2010). SAVE: A Geographic approach to vulnerability assessment (Spatial Analysis of the Vulnerability Environment).
- Morales-Manilla, L. M., y Prieto, J. L. P. (2010). The definition of a minimum set of spatial relations. En [Tesis de Doctorado]. Posgrado en Geografía.
- Morelli, S., Garduño Monroy, V. H., Gigli, G., Falorni, G., Arreygue Rocha, E., y Casagli, N. (2010). The Tancitaro Debris Avalanche: Characterization, propagation and modeling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 193, 93-105.
- Onwuegbuzie, A. J., y Collins, K. M. (2007). A Typology of Mixed Methods Sampling Designs in Social Science Research. *The Qualitative Report*, 12(2), 281-316.
- Ownby, S. E., Delgado-Granados, H., Lange, R. A., y Hall, C. M. (2007). Volcan Tancitaro, Michoacan, Mexico, 40ar/39ar constraints on its history of sector collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161(1-2), 1-14.
- Pacheco, J. F., Valdés-González, C., Delgado, H., Singh, S. K., Zuñiga, F. R., Mortera-Gutiérrez, C. A., Santoyo, M. A., Domínguez, J., y Barrón, R. (1999). Tectonic implications of the earthquake swarm of 1997 in the Michoacan Triangle, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 12, 567-577.
- Pola, A., Crosta, G., Fusi, N., Barberini, V., y Norini, G. (2012). Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks. *Tectonophysics*, 566-567, 67-86.
- Redacción-ME (2021). Deslave bloquea carretera Tancitaro-San Juan Nuevo. 2 de Octubre. Monitor Expreso. <https://www.monitorexpresso.com/deslave-bloquea-carretera-Tancitaro-San-Juan-Nuevo/>.
- Secretaría de Gobernación (2018). DECLARATORIA de Desastre Natural por la presencia de inundación fluvial ocurrida el día 23 de septiembre de 2018, en el Municipio de Peribán del Estado de Michoacán de Ocampo. *Diario Oficial de la Federación. Gobierno de México*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5540159&fecha=05/10/2018#gsc.tab=0
- SEMARNAT-CONANP. (2017). Áreas Naturales Protegidas Federales de México. En *Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. <http://geportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/anpnov17gw.html>.
- Siebert, L. (1984). Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 22(3-4), 163-197.
- Siebert, L. (1996). Hazards of Large Volcanic Debris Avalanches and Associated Eruptive Phenomena. En R. Scarpa y R. Tilling (Eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer, Berlin, Heidelberg.

- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *American Geophysical Union Transactions*, 38, 913-920.
- Tamayo y Tamayo, M. (2003). *El Proceso de la Investigación Científica. Incluye evaluación y administración de proyectos de investigación* (4ª. ed.). Editorial Limusa.
- Turner II, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Corell, R. W., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A., y Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *PNAS*, 100(14), 8074-8079.
- Ui, T. (1983). Volcanic dry avalanche deposits — Identification and comparison with nonvolcanic debris stream deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18, 135-150.
- UNISDR (2009). *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres*. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas.
- Valdés Carrera, A. C., Mendoza, M. E., Carlón Allende, T., y Macías, J. L. (2022). Multitemporal landslide inventory analysis of an intertropical mountain in west-central Mexico — Basis for hazard management. *Journal of Mountain Science*, 19(6), 1650-1669. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7223-3>
- van Wyk de Vries, B., y Delcamp, A. (2015). Volcanic Debris Avalanches. En: T. Davies y J. F. Shroder Jr (Eds.), *Landslide Hazards, Risks, and Disasters* (Número Hazards and disasters series). University of Canterbury.
- Vázquez, R., Carlón-Allende, T., García-Tenorio F. y Mendiola, F. (2023) Numerical modelling of a flash-flood event at Peribán de Ramos, Michoacán (Mexico). *Physical Geography*, DOI: <https://doi.org/10.1080/02723646.2022.2163539>
- Villeneuve, M., y Heap, M. J. (2021). Calculating the cohesion and internal friction angle of volcanic rocks and rock masses. *Volcanica*, 4(2), 279-293. <https://doi.org/10.30909/vol.04.02.279293>