

Susceptibilidad a desprendimientos de rocas en la urbanización La Teresona-Zopilocalco Norte, Toluca: premisas para el desarrollo comunitario

Susceptibility to rock landslides in the La Teresona-Zopilocalco Norte suburb of Toluca: assumptions for community development

Alexis Ordaz Hernández,* Rosaura Karina Esquivel Arzate,** José Ramón Hernández Santana*** y Héctor Víctor Cabadas Báez****

Recibido: 26/03/2019. Aceptado: 12/06/2019. Publicado en línea (eprint): 27/06/2019.

Resumen. El crecimiento de los perímetros urbanos en México ha dado lugar a la ocupación de territorios de condiciones geomorfológicas complejas. Este es el caso del sector centro-norte de la ciudad de Toluca, donde actualmente residen 21 687 personas. Este trabajo se enfoca en el análisis de la susceptibilidad a los desprendimientos de rocas donde se consideran criterios litológicos, morfoestructurales y de ocupación y uso de la superficie. La integración de estas variables permitió revelar cinco niveles de susceptibilidad a los desprendimientos de rocas: muy baja, baja, media, alta y muy alta. Los resultados obtenidos evidencian las características desfavorables del sector para el desarrollo de infraestructura urbana. La desinformación geográfica sobre la realidad de este escenario ha conducido a un panorama de vulnerabilidad construida, con 4 270 viviendas en condiciones de media, alta y muy alta susceptibilidad a los desprendimientos, donde residen 15 796 personas. Esta condición de exposición produce un sistemático impacto en el desarrollo local, constatado actualmente con afectaciones

a los inmuebles y a las vialidades, y atentando contra la vida social.

Palabras clave: susceptibilidad, desprendimientos de rocas, desarrollo local, Toluca, México.

Abstract. In the last half-century, the world scientific community, government authorities, and civil society have paid particular attention to environmental management, land-use planning, use of alternative energies, and many other guidelines, seeking to safeguard and improve environmental quality, preserve biodiversity, and ensure sustainable development. This vision of development requires consistent policies, where all urban development, land-use management, productive, and social actions, among many, focus on meeting the needs of the current population and future generations, in a way that is harmonized with the natural conditions and resources, especially at the local level.

* Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Universidad, Universitaria, 50110 Toluca de Lerdo, Estado de México. ORCID: 0000-0002-6788-650X. Email: alexisordaz.1978@gmail.com

** Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Universidad, Universitaria, 50110 Toluca de Lerdo, Estado de México. ORCID: 0000-0002-6961-5666. Email: karina.garh.geo@gmail.com

*** Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, CDMX, México. ORCID: 0000-0002-1375-2776. Email: santana@igg.unam.mx

**** Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Universidad, Universitaria, 50110 Toluca de Lerdo, Estado de México. ORCID: 0000-0002-1375-2776. Email: hvcabadasb@uaemex.mx

In this regards, it is understandable that the analysis of the dangers of natural genesis, including mass removal processes, is a prerequisite to achieving sound land-use and urban-planning policies for the establishment and development of safer communities, where the free fall of rocky debris through steep slopes do not threaten the physical and social vulnerability of these communities.

At the international level, authors like Tanarro and Muñoz (2012) have elaborated geo-referenced inventories of rock falls in the Duero river basin for comparison with other geological-geomorphological parameters, and like Antoniou and Lekkas (2010), who used engineering and geological information, structural analysis, and geomorphology to elaborate maps on the likelihood of reach of boulders and determine the susceptibility of at-risk human activities.

The growth of settlements in urban outskirts in Mexico has led to the occupation of land of complex geomorphological and geological conditions, specifically in mountainous systems in volcanic buildings. This is the case of the central-north suburbs of the city of Toluca (La Teresona-Zopilocalco Norte), where 21687 inhabitants currently live. This urban sector occupies a stretch of 4.0 km along Paseo Matlazincas, a roadway used as reference to delimit the area of study, from the highest mountain tops located to the north of the roadway; to the south, the limit was drafted at 2690 m a.s.l., which marks a significant difference on terrain slope.

Along this corridor, cracks in the asphalt layer of some roadways, cracking of household walls, and fallen rocky blocks of approximately 2.5 m in diameter that at times have impacted Paseo de los Matlazincas, the main communication roadway. Given this situation, it is essential to the elaborate maps on the degrees of susceptibility to rock landslides to make decisions for the implementation of prevention or mitigation measures within a context of local planning addressing the most threatened priority sites.

The research process for the analysis of susceptibility to rock landslides is carried out in three phases: 1. Data

collection and analysis of information directly related to rock landslides; 2. Elaboration of the thematic cartography on the determinants of this geomorphic process and its integrated analysis; and 3. Validation of field results. The analysis of susceptibility to rock landslides includes criteria related to lithology, morphostructure, occupation, and land use, which were inventoried. The inventory form used allowed the tabulation of physical elements that are key for the interpretation of gravitational processes, with an emphasis on rock landslides, namely: (1) location, including the geographic coordinates; (2) description of the geological material; (3) structural analysis of slopes, including measurements of dip direction and angle of lava flows or strata, as well as structural measurements of planes of failures; (4) type of event (detachment, sliding, overturning, or flow); (5) current state of the event (active or inactive); and (6) damage caused.

The integration of these variables revealed five levels of rock landslide susceptibility: very low, low, medium, high, and very high. The results obtained show the unfavorable characteristics of the area for the development of urban infrastructure.

The susceptibility analyses conducted clearly show that this urban area is unfavorable for the development of large infrastructures, such as hospitals, schools, shopping malls, and even for household development and roadways. Currently, poor urban planning and disregard of the geomorphological conditions in the site have led to a scenario of building vulnerability, with 4270 households under conditions of medium, high, and very high susceptibility to landslides, which are home to 15796 persons. This degree of exposure causes a systematic impact on local development, as observed in this study, with damages to both buildings and roadways.

Keywords: Susceptibility, rockfalls, local development, Toluca, México.

INTRODUCCIÓN

En 1992, durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro y denominada “Cumbre de la Tierra”, se legitimó la definición de *desarrollo sustentable*. Análisis posteriores realizados por algunos autores (Maskrey, 1993; Ramírez, Sánchez y García, 2004; Toro, 2007), coinciden en que el desarrollo sustentable requiere de políticas coherentes, donde todas las acciones urbanísticas, de ordenamiento territorial, productivas, sociales, entre otras, se ocupen de satisfacer las necesidades de la población actual, y se preocupen por atender las necesidades de las generaciones futuras.

De esta forma, es entendible que el análisis de los peligros de génesis natural sea una herramienta de trabajo para lograr políticas de planeación sólidas y, a su vez, constituye la antesala para alcanzar comunidades más seguras, donde no se interrumpen los procesos de desarrollo, ya sea de forma súbita o paulatina por un proceso de carácter geólogo-geomorfológico, como la caída libre de escombros rocosos por pendientes pronunciadas, mayores a 30° de inclinación (Lugo-Hubp, 2011), proceso geomórfico conocido en inglés como *rockfall* (Goudie, 2004).

Algunos autores, como Tanarro y Muñoz (2012), han realizado inventarios georreferenciados de caídas de rocas en la cuenca del río Duero para compararlos con otros parámetros significativos,

como la ubicación en el lado del valle, la relación con la estructura tectónica y la edad relativa, así como delimitar el área de origen potencial de la caída de rocas y reclasificar las pendientes de acuerdo con criterios morfométricos. Antoniou y Lekkas (2010), por su parte, aplican una metodología que combina información geológica y de ingeniería, análisis estructural, geomorfología y procesos, para generar un mapa sobre la probabilidad de alcance de bloques de roca y determinar la susceptibilidad ante ello e identificar áreas y actividades humanas expuestas.

Particularmente en México, los movimientos gravitacionales son catalizados por las intensas precipitaciones y los sismos, donde las pérdidas humanas y materiales han alcanzado niveles importantes. En el mes de enero de 1920, en el estado de Veracruz, un sismo de magnitud estimada de 6.6 grados Richter detonó varios desprendimientos de rocas y deslizamientos a lo largo del río Pescados, con afectaciones en varias de sus poblaciones ribereñas. La combinación de eventos provocó más de 1 800 víctimas (Secretaría de Gobierno, 2010).

En octubre de 1959, intensas lluvias en Minatitlán, Oaxaca y Zacoalpan, indujeron la ocurrencia de varios bloques rocosos caídos, flujos de tierra y deslizamientos, reportándose más de 1 000 personas fallecidas. Recientemente, Galindo y Alcántara (2015) ilustran el impacto ocasionado por los movimientos de remoción en masa catalizados por las torrenciales lluvias de 1999, en la Sierra Norte de Puebla, donde, según datos de Bitrán *et al.* (2001), las pérdidas ascendieron a 1 541 millones de pesos mexicanos (MPM) por daños a infraestructura y servicios, 520 MPM en el sector social, 225.7 MPM en el sector productivo y 38.6 MPM de gastos en servicios de emergencia.

Estos breves antecedentes muestran incompatibilidades entre el manejo del medio físico y la ocupación del territorio. En este sentido, este trabajo tiene como objetivo analizar la susceptibilidad a los desprendimientos de rocas en el sector centro-norte de la ciudad de Toluca, exactamente en los barrios La Teresona, San Miguel Apinahuizco, San Luis de Obispo y Zopilocalco Norte.

Actualmente se reportan grietas en la carpeta asfáltica de algunos viales, agrietamiento en muros

de hogares y bloques de rocas de aproximadamente 2.5 m de diámetro, que en diferentes momentos han impactado el Paseo de los Matlazincas, principal vía de comunicación del área (Figura 1). En estas circunstancias, resulta de vital importancia la generación de una cartografía, que zonifique los diferentes niveles de susceptibilidad a los desprendimientos rocosos. Esta representación cartográfica permitiría tomar decisiones para la aplicación de medidas de prevención o mitigación, en un contexto de planeación local, para los sitios prioritarios más amenazados.

ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Toluca se encuentra localizado en la porción centro-oeste del Estado de México; la ciudad de Toluca de Lerdo es la cabecera municipal y capital del estado. El área de estudio representa un sector periférico de esta ciudad y ocupa un tramo de 4.0 km del Paseo Matlazincas. Tomando como referencia este vial, se delimitó desde las superficies cumbres máximas, situadas al norte de la citada vía, mientras por el sur se trazó por la curva de nivel de 2 690 msnm, que, a su vez, marca una diferencia significativa en las pendientes del terreno (Figura 2).

Los barrios de La Teresona y San Miguel Apinahuizco (Figura 2), que ocupan aproximadamente el 35% del área, tienen restricciones para el desarrollo urbano, de acuerdo con el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca (Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano, 2018), derivado de las condiciones geomorfológicas complejas, con pendientes que superan, en ocasiones, los 15°. No obstante estas limitantes, existe un desarrollo urbano de alta exposición a los movimientos de laderas en general (Figura 1B).

El área de estudio posee un diseño urbano con 171 manzanas y 6 459 viviendas, con una población de 21 687 (INEGI, 2010). Mancino (2010) estima el índice de marginación por sección electoral para el Estado de México. Particularmente para este caso, corresponden 17 secciones electorales, de ellas, dos presentan grado de marginación muy bajo (3 903 habitantes) y las otras quince



Figura 1. Área de estudio, donde: A: vista general del área, B: vista cercana de un sector con pendientes superiores a los 20° , y C y D: impacto de los desprendimientos rocosos sobre las banquetas (aceras) del Paseo de los Matlazincas.

clasifican en bajo grado de marginación (17 784 habitantes).

Según De la Vega *et al.* (2011), la marginación es un fenómeno multidimensional que considera la exclusión de la población al proceso de desarrollo y al disfrute de sus beneficios. El cálculo del índice de marginación involucra la construcción de indicadores de carencias o déficit en educación, vivienda, ingresos monetarios y en la distribución de la población. De lo anterior se deriva que, necesariamente, las condiciones físicas del entorno geográfico, y específicamente su predisposición a la ocurrencia a fenómenos naturales, no son incluidos explícitamente en esta ecuación. En este sentido, la realidad indica que la ocurrencia esporádica o sistemática de un fenómeno natural impacta en el proceso de desarrollo de las comunidades.

El área forma parte del Complejo Volcánico Sierra Morelos (López Montoya, 2019), ubicado dentro del Parque Sierra Morelos, que constituye

una zona conformada principalmente por lomeños; sin embargo, existen elevaciones importantes, como es el caso del Cerro La Teresona, con 490 m de altura, tomando como base el nivel más bajo del Valle de Toluca en la cota 2 550 msnm (Sierra-Domínguez, 2005).

García-Palomo (1998) clasifica al área como parte de los Complejos Dómicos, circundantes al volcán Nevado de Toluca, que varían en composición de andesítica a dacítica, fuertemente afectados por la erosión y el tectonismo. Dada la falta de fechamientos radiométricos, existe incertidumbre sobre la edad de emplazamiento, por lo que Sánchez-Rubio (1984) propone el Mioceno, mientras que García-Palomo sugiere el Plioceno, dado que sirven de barreras topográficas a los depósitos más recientes, provenientes del Nevado de Toluca.

La estructura tabular, asociada a fisuras de contracción o diaclasas, es el rasgo más llamativo en

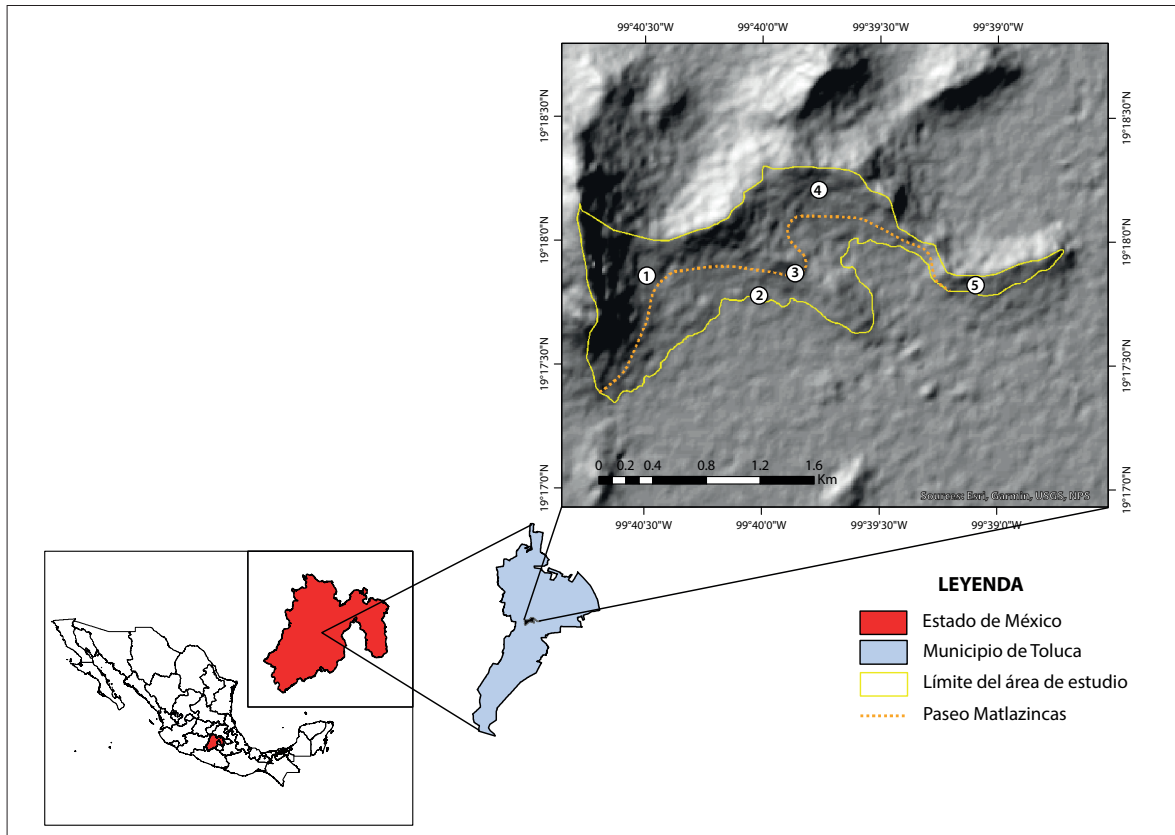


Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio. Donde 1: Barrio La Teresona, 2: Mercado Hidalgo, 3: Barrio San Miguel Apinahuizco, 4: Barrio Sal Luis de Obispo y 5: Barrio Zopilocalco Norte.

la base del Cerro La Teresona (Figura 3). Se trata de un domo exógeno, formado por la sucesión de derrames de lava, con unidades de flujo bandeado y espesores que varían de pocos centímetros a un par de metros y que llegan a presentar intemperismo del tipo “capas de cebolla”. Su estructura está afectada por depósitos de talud, de material aluvial y piroclástico de los domos aledaños, así como del Nevado de Toluca. Presenta escarpes de falla visibles, próximos a la cima, donde el echado de los flujos es cercano a los 90° . Sánchez-Rubio (1976) llamó informalmente a dichos derrames como “andesitas Calixtlahuaca” y consideró que eran un remanente de los depósitos de un volcán compuesto, ya erosionado. Macroscópicamente presentan una textura predominantemente afanítica, con algunos fenocristales aislados de feldespatos y hornblenda oxidada.

Los suelos desarrollados sobre la superficie rocosa y en las laderas son principalmente los Leptosoles, mientras que es posible observar un mejor desarrollo edáfico en la superficie cumbral, con la presencia de algunas áreas restringidas de Andosoles. Hacia las partes bajas, cercanas al eje vial, dominan los suelos redepositados, producto del arrastre hídrico y de la erosión. La afectación del domo por actividades humanas se observa en los cortes de ladera para la explotación del material pétreo y la urbanización. La vibración de vehículos pesados, las filtraciones de agua de uso doméstico, la sobrecarga de viviendas y la quema de vegetación, también pueden ser considerados como afectaciones directas a la estabilidad estructural de este tipo de sitios (Valerio García-Palomo, López-Miguel y Galván-García, 2007).



Figura 3. Estructuras tabulares asociadas a fisuras de contracción o diaclasas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de investigación para el análisis de la susceptibilidad a los desprendimientos rocosos se efectuó en tres fases. En la primera se recopila y analiza la información con incidencia directa en los desprendimientos de rocas; en la segunda se elabora la cartografía temática que refleja los factores condicionantes de este proceso geomórfico y se realiza su análisis integrado, mientras que en la tercera se validan los resultados en campo.

En la primera fase el equipo de trabajo consultó distintas plataformas de información, como el *Plan de Desarrollo Municipal de Toluca* (Ayuntamiento de Toluca, 2016), el *Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca* (Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano, 2018), información demográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010), Google Earth, bibliotecas, periódicos, entre otros. Las fuentes citadas permitieron tener una idea clara de las características sociales y físicas del territorio.

Durante el análisis de la información recopilada en la fase inicial se revelaron algunas carencias

de información, como es la no existencia de una cartografía geológica detallada, lo que justificó un posterior levantamiento geológico para, al menos, definir las litologías de mayor afluencia. De igual forma, en esta fase se realizó el inventario de movimientos gravitacionales ocurridos en el pasado, especialmente aquellos que aún muestran huellas palpables.

El formato de inventario empleado permitió tabular elementos físicos, que fueron claves en la interpretación de los procesos gravitacionales, con énfasis en los desprendimientos de rocas. En este caso, los principales elementos tabulados en el inventario fueron: 1) localización con sus coordenadas geográficas; 2) descripción del material geológico, 3) análisis estructural de taludes, que incluyó la mediciones de direcciones y ángulos de buzamientos de los flujos de lavas o estratos presentes, así como mediciones estructurales de los planos de fallas; 4) clasificación del tipo de evento (desprendimiento, deslizamiento, vuelco o flujo); 5) estado actual del evento (activo o inactivo), y 6) daños ocasionados.

El inventario permitió confirmar los niveles de

importancia de cada parámetro (litología, geomorfología y uso del suelo) durante la ponderación y el álgebra de mapas. Una segunda aportación del inventario está relacionada con el proceso de validación mediante el que se pretende comprobar la coincidencia espacial entre los desprendimientos activos u ocurridos en el pasado, con la propuesta de mapa de susceptibilidad a desprendimientos de rocas.

Durante la segunda fase se confeccionó la cartografía temática y se realizaron los procesos de álgebra de mapas. Para el procedimiento se consideraron las sugerencias metodológicas de Segura Badilla y Obando (2011), que ajustan la aplicación del método heurístico en sus dos variantes “análisis geomorfológico” y la “combinación cualitativa de mapas”.

De acuerdo con Segura *et al.* (2011), el análisis geomorfológico o método de cartografía directa, se sustenta en niveles de susceptibilidad del terreno, determinados por el investigador directamente en el campo, donde adquiere un importante valor la experiencia y el nivel de conocimiento del entorno físico del escenario geográfico.

El análisis geomorfológico como herramienta en el análisis de movimientos de remoción en masa, por si solo resulta incompleto y, en este caso, se robustece con la combinación cualitativa de mapas de condiciones del terreno, donde se retoma el criterio de experto del especialista para asignar pesos (valores que representan un determinado grado de importancia) a las variables involucradas.

Esta investigación considera como “mapa de susceptibilidad” a aquella cartografía que representa áreas con diferente predisposición a la ocurrencia de futuros deslizamientos (Ayala-Carcedo y Corominas, 2003), sin considerar los factores detonantes (Suárez, 2009). Atendiendo a los elementos teóricos descritos, y de acuerdo con las adecuaciones necesarias para el sector centro-norte de la ciudad de Toluca, la susceptibilidad (S) a los desprendimientos de rocas, queda sustentada en la susceptibilidad litológica (S_L), la susceptibilidad geomorfológica (S_G) y la susceptibilidad por uso del suelo (S_T) (Ecuación 1).

$$S = S_L * S_G * S_T \quad (1)$$

Donde:

S: grado de susceptibilidad a desprendimientos de rocas

S_L : valor del parámetro de susceptibilidad litológica

S_G : valor del parámetro de susceptibilidad geomorfológica

S_T : valor del parámetro de susceptibilidad por uso del suelo

Para definir la susceptibilidad litológica (S_L) fue necesario el levantamiento geológico mediante trabajo de campo, para lo que se visitaron 51 puntos, lográndose un punto de reconocimiento geológico por cada 1.5 km², aproximadamente. El mapa geológico derivado permitió conocer la distribución espacial de los diferentes tipos de materiales (suelo o roca). Posteriormente, y con apoyo del inventario realizado en la primera fase, se distinguieron los tipos de materiales susceptibles a los desprendimientos rocosos en el pasado. Otro elemento, aportado por el levantamiento geológico, se vincula a rasgos estructurales, como la yacencia de las rocas, expresada mediante el ángulo de buzamiento y la dirección del buzamiento (S_0), y de igual forma para los planos identificados de fallas. En la Tabla 1 se muestra la relación de materiales geológicos con sus niveles de influencia a la ocurrencia de desprendimientos de rocas. El nivel de influencia (ponderación) fue determinado a través el análisis de inventario de movimientos de laderas, realizado en campo y mediante la experiencia acumulada en investigaciones anteriores, donde se evaluaron materiales geológicos de comportamiento geomecánico similar (Díaz de Terán *et al.*, 1997; Corominas, 2006; Arango, 2014; Mergili,

Tabla 1. Materiales geológicos identificados en el área de estudio y los pesos asignados para el proceso de ponderación.

Materiales geológicos	
Tipo	Ponderación
Andesita	5
Material piroclástico de Andesita	2
Suelo	0

Marchant y Moreiras, 2015; Galindo y Alcántara-Ayala, 2015).

Por su parte, la susceptibilidad geomorfológica (S_G) consideró dos indicadores: 1) las pendientes del terreno, en grados, y 2) la posible coincidencia espacial entre la dirección de las pendientes (aspecto de la pendiente) con la tendencia de la yacencia de los estratos (S_0) o con la dirección de echado de las fallas (Tabla 3 y Figura 4). Los rangos de pendientes y los pesos asignados (Tabla 2) se sustentaron con los eventos de desprendimientos inventariados.

En la segunda fase metodológica para el análisis de desprendimientos se incluyó la posible predisposición que pueda tener la superficie en función de su uso (S_T , Ecuación 1). Los usos considerados fueron: bosque denso, bosque semidenso, pastizal, habitacional y vialidades. La digitalización de los polígonos, que representan los diferentes usos y ocupaciones, se obtuvieron directamente mediante la vectorización de las imágenes Google Earth (2018). Posteriormente, la asignación de pesos, en función de su nivel de influencia frente a los desprendimientos, se realizó primeramente con-

siderando algunos trabajos que abordan explícitamente la problemática (Suárez, 1998; Raghuvanshi, Negassa y Kala, 2015), lo que permitió ordenar jerárquicamente los usos del suelo en función de su susceptibilidad a los movimientos de laderas. Como segundo criterio se analizó la frecuencia de los eventos a partir del inventario realizado y se confrontó con los diferentes usos cartografiados (Tabla 4).

Finalmente, se procedió con la validación cartográfica resultante (tercera fase). El proceso de validación tuvo dos etapas, la primera en gabinete, mediante la superposición de los 12 desprendimientos inventariados sobre los polígonos de susceptibilidad obtenidos, y la segunda etapa mediante la verificación en el terreno de la presencia real de las condiciones de susceptibilidad para cada criterio (litología, geomorfología y uso del suelo).

Tabla 2. Rangos de pendientes adoptados y los pesos asignados.

Rango	Ponderación	Desprendimientos ocurridos en el pasado
0°-2°	0	0
2°-5°	1	0
5°-15°	2	2
15°-20°	3	4
>20	4	8

Tabla 3. Valores de ponderación adoptados, en función de la coincidencia espacial entre la dirección de las pendientes y las direcciones de buzamiento, medidas en los afloramientos estudiados.

Coincidencia entre el aspecto de la pendiente y las direcciones de buzamiento de fallas y estratos	Ponderación
No	1
Si	5

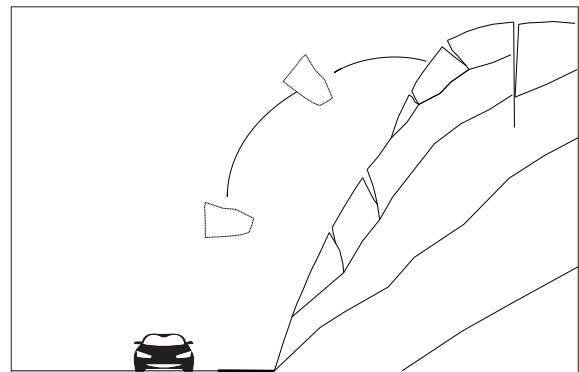


Figura 4. Representación esquemática de la coincidencia entre la dirección de las pendientes con la tendencia de la yacencia de los estratos como factor de alta favorabilidad a la ocurrencia de desprendimientos de rocas.

Tabla 4. Principales usos del suelo y valores de ponderación asignados.

Uso de suelo	
Tipo	Ponderación
Bosque denso	2
Bosque semidenso	3
Pastizal	4
Habitacional	5
Vialidad	5

RESULTADOS

Susceptibilidad litológica frente a desprendimientos de rocas

La descripción de 51 puntos en campo permitió cartografiar tres tipos de materiales litológicos. La litología de mayor aflorabilidad (70%) corresponde a las rocas andesíticas. Estas presentan un marcado predominio de fisuras de contracción o diaclasas, cuyos planos delimitan, por todas sus caras, potenciales fragmentos susceptibles a caídas (Figura 3 y 4); esta litología, de acuerdo con la metodología descrita, clasifica como de alta susceptibilidad a los desprendimientos de rocas (Figura 6).

Según su posición en el corte, se logra identificar posteriormente el material piroclástico de composición andesítica, con una cobertura del 10%. Los cortes descritos para la zona norte de la ciudad de Toluca alcanzan hasta 5.0 m de altura. La descripción a escala mesoscópica muestra fragmentos con diámetros entre 5.0 y 40.0 cm, sostenidos por una matriz fina de consistencia media. De acuerdo con la frecuencia de caídas de bloques en este sitio, y a su comportamiento en México y Centroamérica (Navarro, 2012; Pineda, 2014 y Alcántara, Echevarría, Gutiérrez y Domínguez, 2014), estos materiales se clasificaron con susceptibilidad media a los desprendimientos de rocas. El proceso, observado a escala de detalle en los afloramientos de material piroclástico, transita inicialmente por la erosión de las fracciones de arcilla, limos y arenas, todas

de diámetros inferiores a los 4.75 mm, quedando debilitada la matriz que sostiene los fragmentos de mayor diámetro para, finalmente, desencadenar en la caída de los bloques de diámetros variables, entre los 5.0 y 40.0 cm (Figura 5). El corte litológico culmina con suelos (Leptosoles) que abarcan el 20% del área y con profundidades comprobadas en campo de hasta 2.0 m; estos materiales, por su propia naturaleza, no son susceptibles a las caídas de rocas.

Susceptibilidad geomorfológica frente a desprendimientos de rocas

La susceptibilidad geomorfológica (Figura 7C) se obtiene considerando la inclinación de las pendientes (Figura 6A) y la coincidencia de la dirección de las pendientes con la dirección de buzamientos de los estratos y planos de fallas identificados en campo (Figura 7B). Las zonas donde no se reveló la citada coincidencia representan, aproximadamente, un 80% del área, mientras que los sitios donde se comprobó coincidencias entre ambos parámetros morfométricos cubren un 20% de la superficie.

Según la metodología descrita, las zonas reveladas como de alta y muy alta susceptibilidad, desde la óptica geomorfológica, son sitios de pendientes superiores a los 20°, con una disposición geométrica espacial de sus laderas, planos de falla y echado de los estratos, que favorecen considerablemente el desarrollo de una energía potencial, desde el punto de vista físico, para la caída de rocas.



Figura 5. Taludes conformados por material piroclástico de composición andesítica.

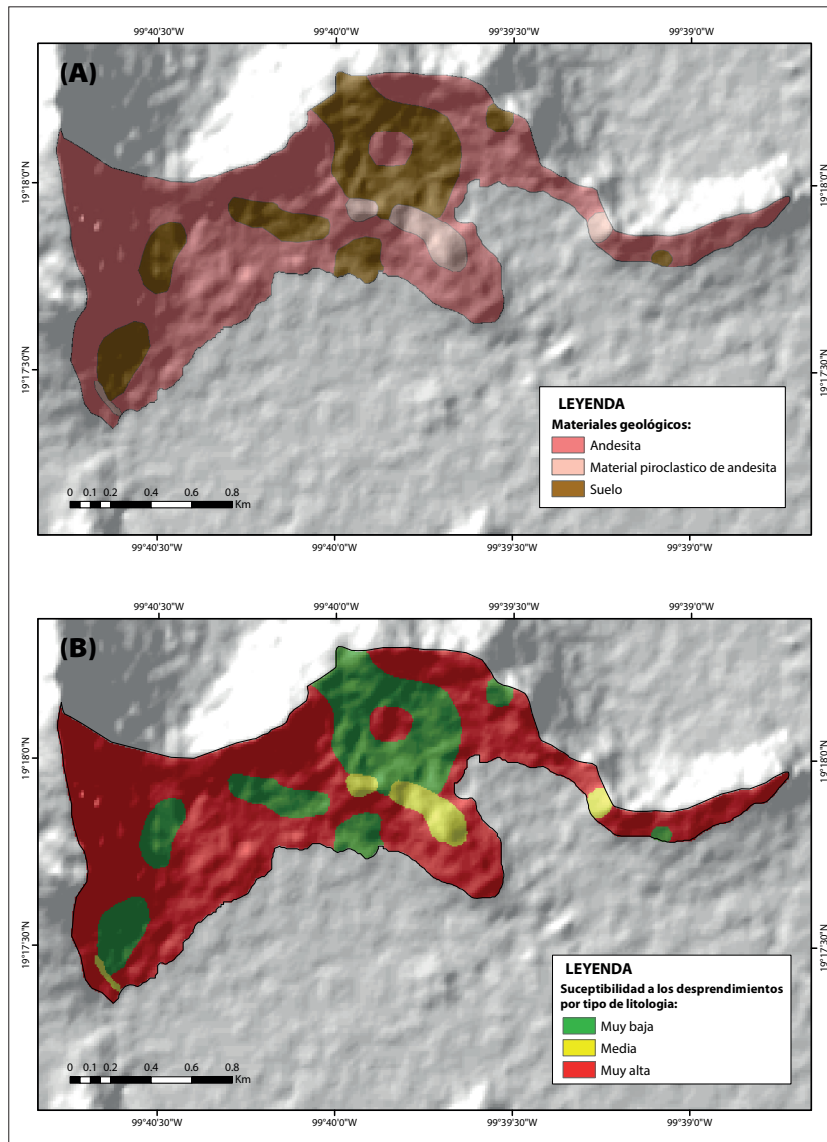


Figura 6. Susceptibilidad litológica. A: disposición espacial de las litologías identificadas. B: reclasificación de las litologías según su nivel de susceptibilidad a los desprendimientos de rocas.

Susceptibilidad por uso de la tierra frente a desprendimientos de rocas

Los usos que más favorecen la ocurrencia de los desprendimientos de rocas son el habitacional y las vialidades (65% del área). El crecimiento urbanístico y habitacional desordenado, en un escenario geográfico de condiciones geomorfológicas complejas, conduce a la ejecución de cortes y nivelaciones del terreno con maquinarias, que conlleva a un debilitamiento del macizo geológico, con daños inmediatos en las estructuras

habitationales adyacentes (Figura 8). Por su parte, en las zonas de pastizales existe ausencia total de árboles, derivado de la deforestación sistemática y, en algunos casos, se asientan pequeños huertos familiares. La zona de pastizales, de acuerdo con los criterios adoptados en la metodología, clasifica como una zona proclive a la ocurrencia de desprendimientos de rocas, solo adoptando el criterio de uso y ocupación de la superficie (Figura 9).

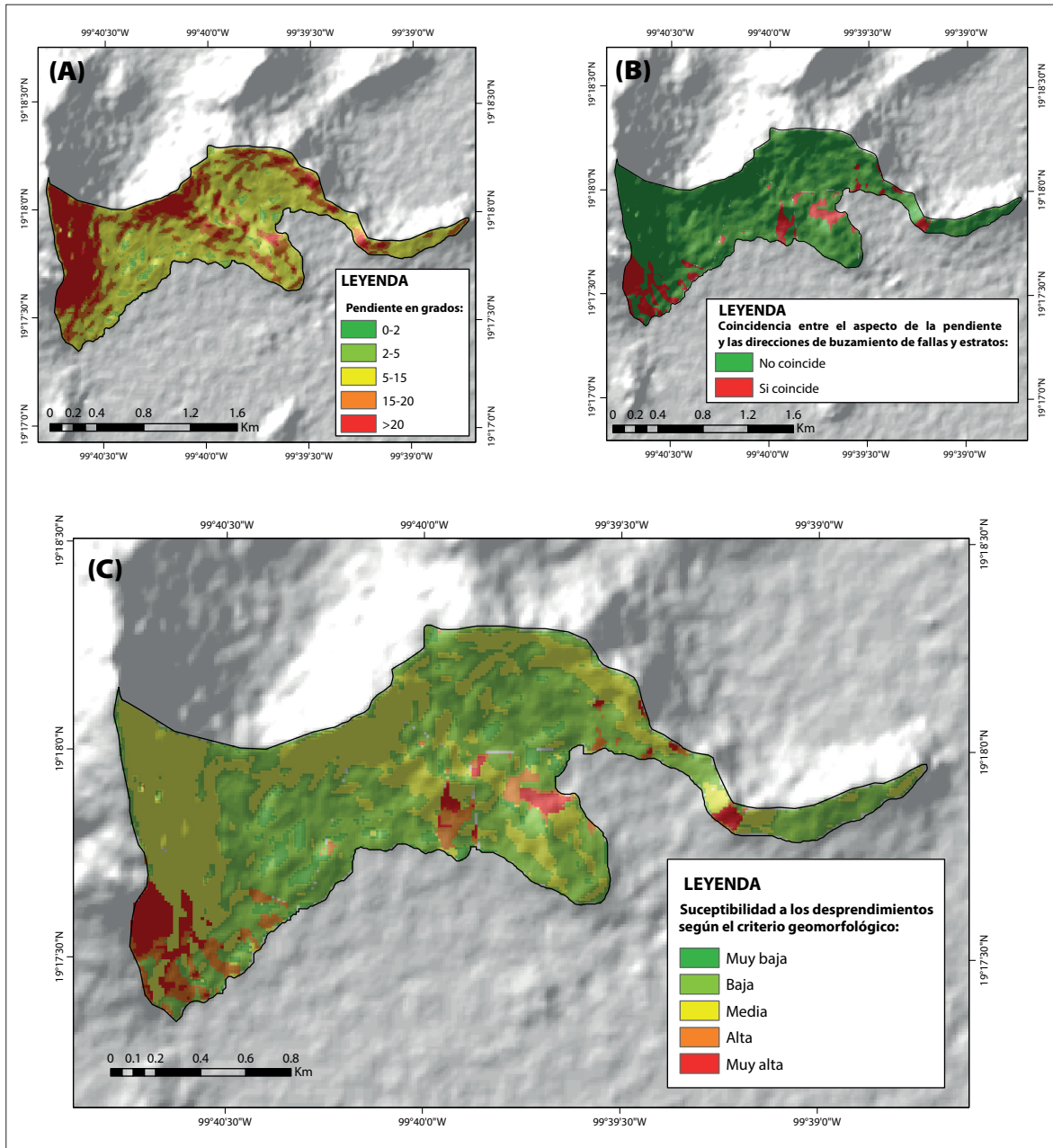


Figura 7. Cartografía de susceptibilidad geomorfológica para centro-norte de la ciudad de Toluca.

Susceptibilidad a desprendimientos de rocas en el sector centro-norte de la ciudad de Toluca y su posible impacto en el desarrollo local

De acuerdo con los resultados mostrados en el mapa de susceptibilidad a los desprendimientos,

basado en el método heurístico en sus dos variantes, “análisis geomorfológico” y la “combinación cualitativa de mapas”, se logran definir cinco niveles de susceptibilidad: muy baja, baja, media, alta y muy alta (Figura 10).

Las zonas catalogadas como de “muy alta sus-



Figura 8. A: nivelación del terreno para la construcción de una obra en una zona de pendientes superiores a los 15°. Se indica con una flecha roja la aplicación de una medida estructural “Muros de gaviones” para evitar la ocurrencia de movimientos de ladera. B: grietas en paredes en construcciones adyacentes. C: desprendimientos de rocas que debilitan el sustento de viviendas, provocando el socavamiento de sus cimientos.

ceptibilidad” corresponden a sitios donde afloran las rocas andesíticas muy fracturadas, desarrolladas en condiciones geomorfológicas complejas, donde el uso de la superficie ha sido fundamentalmente urbano y en menor medida pastizales; mientras que las zonas clasificadas como de “alta susceptibilidad” se diferencian de la primera únicamente en una disminución de la susceptibilidad geomorfológica, exactamente en la no coincidencia de la dirección de inclinación de las laderas con la dirección de echado de los estratos o planos de fallas (Tabla 3 y Figura 4). En ambas zonas, o categorías de susceptibilidad, y a modo de validación de la calidad de cartografía obtenida en los trabajos de campos realizados en el año 2018, se pudieron identificar al menos diez desprendimientos rocosos.

La “susceptibilidad media” se relaciona con las rocas andesitas, pero en pendientes entre 5° y 20°, con uso especialmente urbano, donde se identificaron dos desprendimientos. Así mismo, los mate-

riales piroclásticos pueden alcanzar susceptibilidad media en condiciones de pendientes superiores a los 15°; tal es el caso de la zona ubicada al este del Barrio San Miguel Apinahuizco (Figura 10).

Los sitios clasificados como de “baja” y “muy baja” susceptibilidad a los desprendimientos están conformados por suelos donde la característica del material no consolidado anula la posibilidad del proceso geomórfico. La diferencia fundamental en estas dos categorías consiste en sus condiciones geomorfológicas. Durante los trabajos de verificación de la calidad de la cartografía no se comprobaron desprendimientos de rocas en estas dos últimas categorías de susceptibilidad; sin embargo, se verificaron cuatro deslizamientos rotacionales en zonas de pendientes superiores a los 15°, derivado de la poca cohesión de los suelos (Figura 10).

Finalmente, este trabajo pretende colocar en perspectiva el impacto actual y futuro de los desprendimientos de rocas en el bienestar y calidad

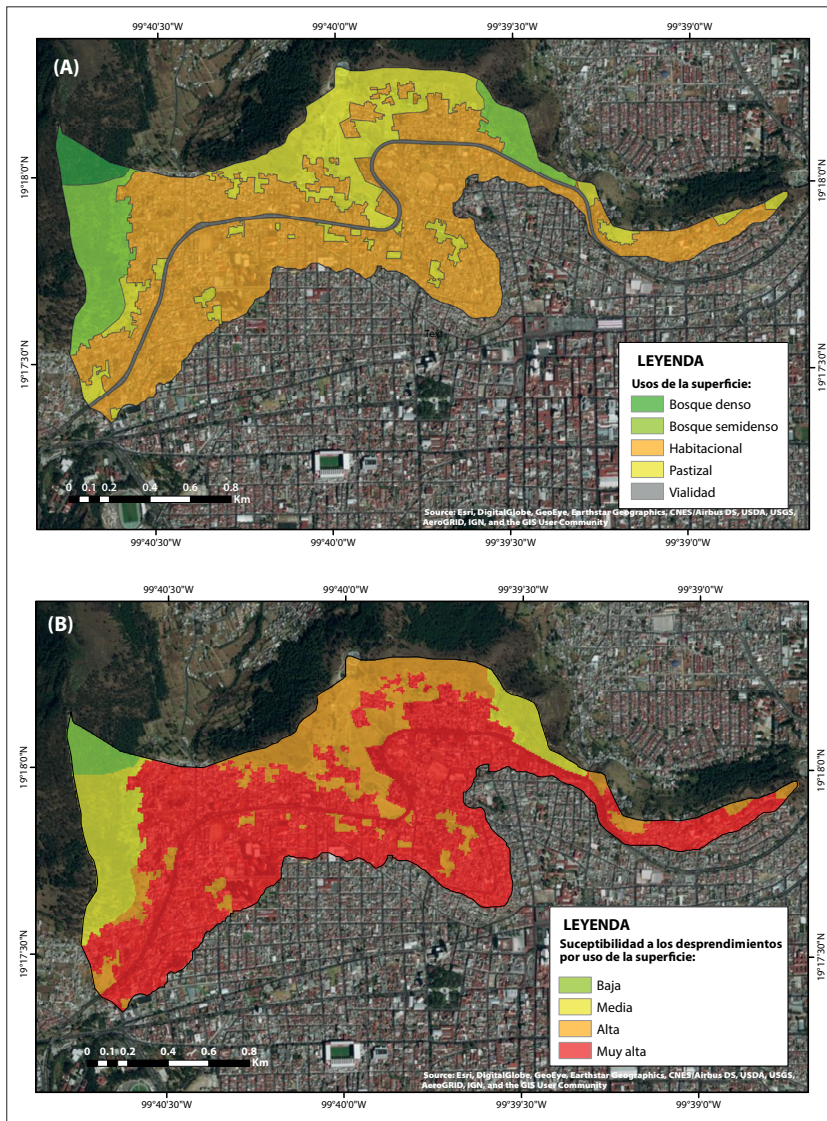


Figura 9. Susceptibilidad por uso del suelo frente a desprendimientos de rocas. A: actualización del uso de la superficie. B: reclasificación de los usos del suelo, según su nivel de susceptibilidad a los desprendimientos.

de vida de los residentes, así como la incidencia que este proceso geomórfico puede tener en un desarrollo local sustentable, de acuerdo con un escenario geográfico similar al investigado. Para lograrlo, se le asignó a cada manzana el nivel de susceptibilidad predominante y se verificaron la cantidad de viviendas y habitantes, según INEGI (2010) (Figura 11 y 12). Es oportuno aclarar que los límites de susceptibilidad a los desprendimientos o, en general, a cualquier fenómeno o proceso de carácter natural, no necesariamente guardan correspondencia con los límites urbanos,

como las manzanas. Es así como las escenas de las Figuras 11 y 12 solo representan la susceptibilidad predominante en el perímetro de cada manzana y pierden pequeños pixeles de otras categorías de susceptibilidad hacia su interior.

De este análisis se puede concluir que aproximadamente el 22 % de la población reside en zonas de muy alta y alta susceptibilidad a los desprendimientos de rocas (4 687 personas), mientras que el 51 % (11 109) habitan en zonas de susceptibilidad media (Figura 11). Esta realidad ofrece una dimensión de las circunstancias complejas

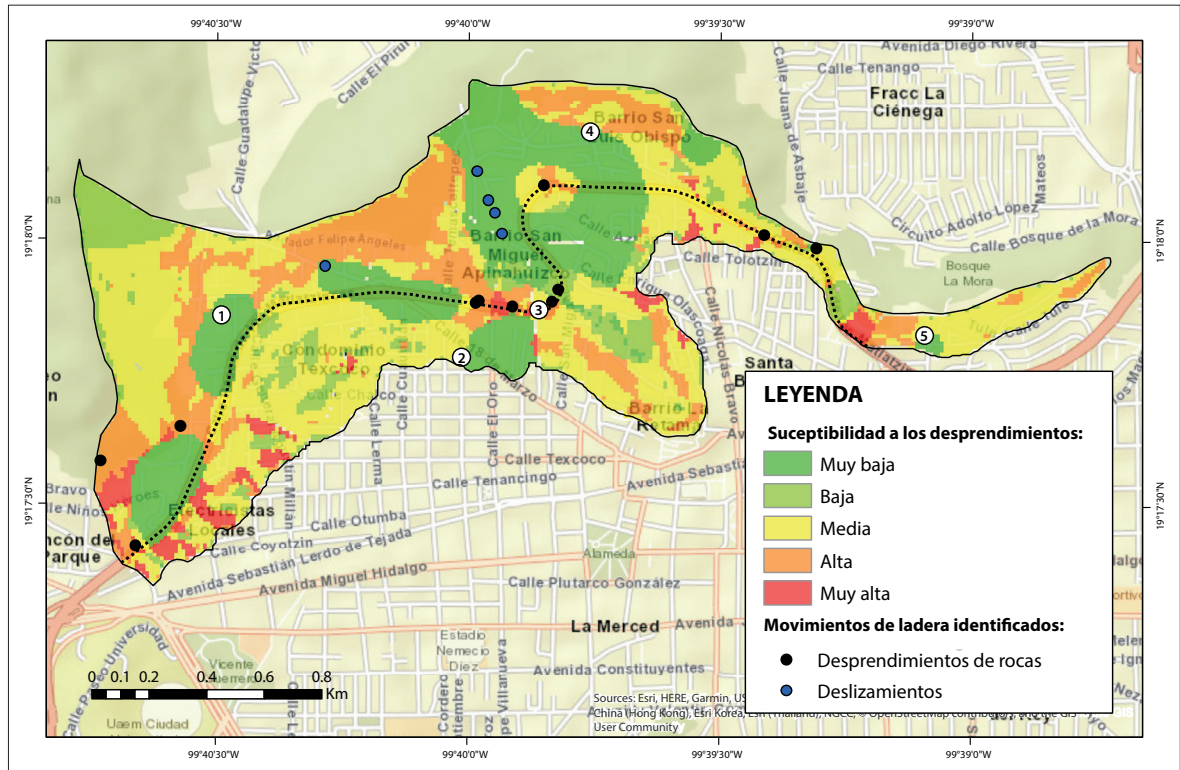


Figura 10. Mapa de susceptibilidad a los desprendimientos de rocas para el centro-norte de la ciudad de Toluca, donde 1: Barrio La Teresona, 2: Mercado Hidalgo, 3: Barrio San Miguel Apinahuizco, 4: Barrio Sal Luis de Obispo y 5: Barrio Zopilocalco Norte.

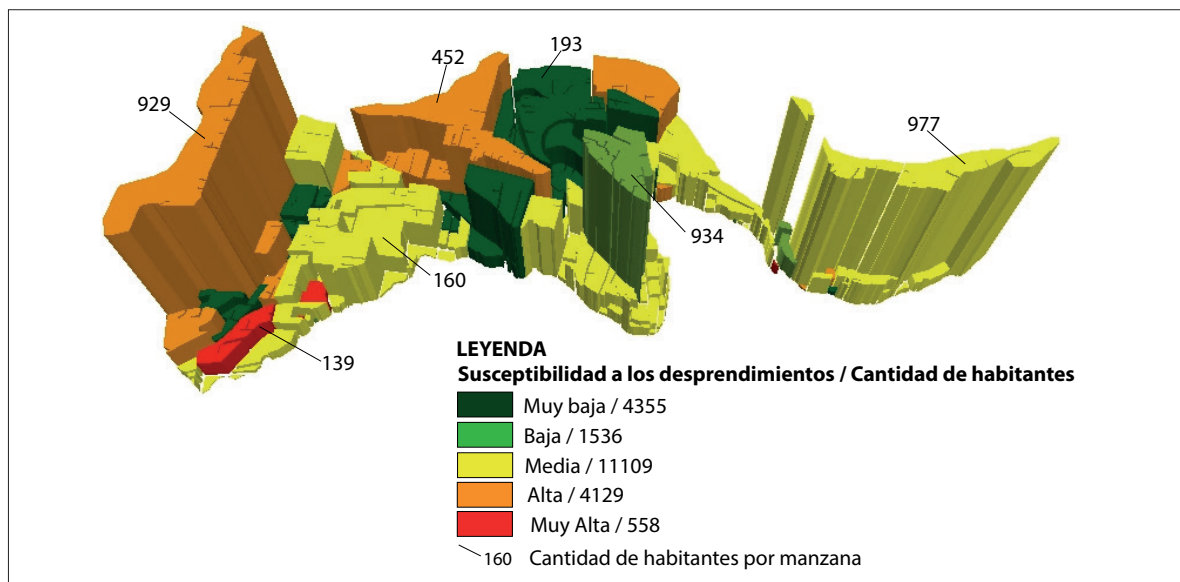


Figura 11. Escena gráfica que ilustra la cantidad de habitantes por categoría de susceptibilidad a los desprendimientos de rocas.

que afronta una importante parte de la población del centro-norte de la ciudad de Toluca. Además, marca pautas para la toma de decisiones, por parte de Protección Civil Municipal, especialmente para el establecimiento de sistema de alertas, en periodos de intensas lluvias, principal factor detonante. Es importante indicar que se está en presencia de un desarrollo urbano que califica perfectamente con la denominación de “vulnerabilidad construida”, como señalan Hernández-Santana, Méndez, Ordaz y Baró (2017). Este calificativo aplica a comunidades que se asientan en sitios proclives a amenazas naturales, donde eventualmente los acontecimientos conducen al incremento de pérdidas humanas y de daños materiales y de las infraestructuras socioeconómicas.

Este estudio revela 1 126 viviendas en condiciones de alta y muy alta susceptibilidad a los desprendimientos de rocas (Figura 12), cuyas zonas presentan condiciones muy desfavorables para el desarrollo urbano, ya sea de viviendas o de infraestructura de gran porte, como hospitales, escuelas, plazas comerciales u otras. Incluso, la zona de susceptibilidad media, donde actualmente se emplazan 3 144 viviendas, debe ser manejada con estricta precaución, especialmente en la ejecución

de obras que exijan taludes, con el ulterior debilitamiento de las estructuras adyacentes.

CONCLUSIONES

El desarrollo urbano del sector centro-norte de la Ciudad de Toluca se ha desplegado sobre un relieve proclive a la ocurrencia de movimientos gravitacionales, lo que da como resultados desprendimientos de rocas y, en menor medida y frecuencia, los deslizamientos de tierra. La metodología empleada consideró factores condicionantes para el análisis de susceptibilidad a los desprendimientos de rocas, como la litología, el uso y la ocupación del terreno y las condiciones geomorfológicas y estructurales locales. La integración de estas variables permitió revelar cinco niveles de susceptibilidad a los desprendimientos de rocas: muy baja, baja, media, alta y muy alta.

Los sitios clasificados con “muy alta susceptibilidad” y “alta susceptibilidad” se caracterizan, desde el punto de vista geológico, por afloramientos de andesitas muy fracturadas, con un uso del suelo predominantemente urbano. Ambas categorías se desarrollan sobre pendientes del terreno superiores

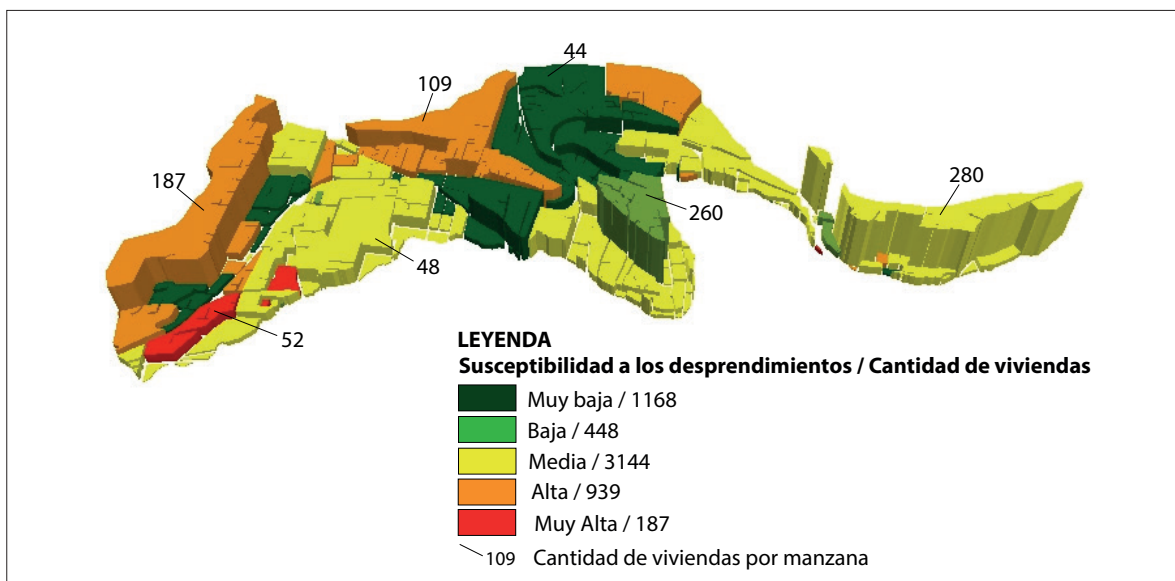


Figura 12. Escena gráfica que ilustra la cantidad de viviendas por categoría de susceptibilidad a los desprendimientos de rocas.

a los 15°, con una disminución de la susceptibilidad geomorfológica para la categoría de alta susceptibilidad, derivada de la relación geométrica entre los estratos y las laderas. El resultado cartográfico presentado se puede considerar como un instrumento técnico para justificar la contención del crecimiento urbano en las zonas de susceptibilidad media, alta y muy alta, aunque se debe complementar un análisis de la susceptibilidad a los deslizamientos en el futuro inmediato, especialmente en las áreas ocupadas por suelos y material piroclástico.

Los análisis de susceptibilidad desarrollados evidencian categóricamente que esta zona urbana es desfavorable para el desarrollo de infraestructura de grandes dimensiones, como hospitales, escuelas, plazas comerciales e incluso para el desarrollo habitacional y de vialidades. Actualmente, la deficiente planeación urbana y la débil observancia a las condiciones geólogo-geomorfológicas del sitio han conducido a un escenario de vulnerabilidad construida, con 4 270 viviendas en condiciones de media, alta y muy alta susceptibilidad a los desprendimientos, donde residen 15 796 personas. Esta condición de exposición produce un sistemático impacto en el desarrollo local, constatado en el presente con afectaciones a los inmuebles y a las vialidades.

REFERENCIAS

- Alcántara, I., Echavarría, A., Gutiérrez, C. y Domínguez, L. (2014). *Inestabilidad de Laderas*. Serie Fascículos. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Antoniou, A. A. y Lekkas, F. (2010). Rockfall susceptibility map for Athinios port, Santorini Island, Greece. *Geomorphology*, 118, 152-166.
- Arango, I. F. (2014). *Desprendimiento de rocas en laderas: una guía para la evaluación del riesgo en vías*. Tesis de maestría. Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Ayala-Carcedo, F. J. y Corominas, J. (2003). Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales mediante el uso de un sistema de información geográfica. Aplicación a la pobla de Lillet (Pirineo Oriental). En F. J. Ayala-Carcedo y J. Corominas, *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG* (pp. 182-186). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Ayuntamiento de Toluca (2016). *Plan de Desarrollo Municipal de Toluca 2016-2018*. Toluca: Gaceta Municipal Especial.
- Bitrán, D., Jiménez, M., Eslava, H., Salas, M. A., Vázquez, M. T., Matías, L. G., Camacho, K. S. y Acosta, L. (2001). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2000. *Serie Impacto socioeconómico de los desastres en México*, 2, 98.
- Mancino, M. (2010). Índice de marginación por sección electoral 2010. Recuperado el 2 de febrero de 2019 de <http://ri.uaemex.mx/MensajeCartografico/>
- Corominas, J. (2006). El clima y sus consecuencias sobre la actividad de los movimientos de ladera en España. *Cuaternario y Geomorfología*, 20(3-4), 89-113.
- De la Vega, S., R. y González, A. (2011). *Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010*. México: CONAPO.
- Díaz de Terán, J. R., Cendrero, A., Araña, V., Badiola, E. R., Berga, L., Carracedo, J. C., Chacón, J., Coello, J., Corominas, J., Dabrio, C., Durán, J. J., Elizaga, E., Ferrer, M., García, M., Garzón, G., González, A., Goy, J. L., López, J., Martínez-Goytre, J., Mezcuca, J., Nuez, J. de la Salinas, J. L., Soler, V., del Val, J. y Zazo, C. (1997). Natural hazards in Spain. En C. Embleton y Ch. Embleton-Hamann (Eds.), *Geomorphological hazards of Europe* (pp. 429-456). Elsevier Science.
- Galindo, J. A. y Alcántara, I. (2015). Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México. *Investigaciones Geográficas*, 88, 122-145.
- García-Palomo, A. (1998). *Evolución estructural en las inmediaciones del Volcán Nevado de Toluca, Estado de México*. Tesis de maestría en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- Goudie, A. S. (2004). *Encyclopedia of Geomorphology*. Londres: Routledge.
- Hernández-Santana, J. R., Méndez, A. P., Ordaz, A. y Baró, J. E. (2017). Vulnerabilidad construida. Una mirada geomorfológica y geodinámica. En M. F. Rodríguez van Gort (Coord.), *Factores de vulnerabilidad en la construcción del riesgo* (pp. 102-120). México: UNAM e Itaca.
- INEGI. (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Aguascalientes: INEGI. Recuperado el 23 de enero de 2019 de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- López Montoya, M. A. (2019). *Cartografía geológico-ambiental de los volcanes de la zona centro de Toluca con énfasis en controles estructurales y su influencia en las características hidrogeológicas del área*. Tesis de licenciatura en Geología Ambiental y Recursos Hídricos. Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México.

- Lugo-Hubp, J. I. (2011). *Diccionario Geomorfológico*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Maskrey, A. (1993). Los desastres no son naturales. Recuperado el 25 de febrero de 2019 de <http://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/LosDesastresNoSonNaturales-1.0.0.pdf>
- Mergili, M., Marchant, C. y Moreiras, S. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región andina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24, 113-131. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50211.
- Navarro, J. (2012). *Susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera mediante S.I.G. en el Municipio de Berlín, El Salvador*. Tesis de maestría en Tecnologías de la Información Geográfica. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
- Pineda, J. J. (2014). *Procesos gravitacionales en el Municipio de Lerma, Estado de México*. Tesis de licenciatura en Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.
- Raghuvanshi, T. K, Negassa, L. y Kala, P. M. (2015). GIS based Grid overlay method versus modeling approach - A comparative study for landslide hazard zonation (LHZ) in Meta Robi District of West Showa Zone in Ethiopia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 235-250.
- Ramírez, A., Sánchez, J. M. y García, A. (2004). El desarrollo sustentable: interpretación y análisis. *Revista del Centro de Investigación de la Universidad la Salle*, 6(21), 55-59.
- Sánchez-Rubio, G. (1976). Las rocas volcánicas de Toluca, México. En *III Congreso Latinoamericano de Geología*. México: Instituto de Geología, UNAM.
- Sánchez-Rubio, G. (1984). *Cenozoicvolcanism in the Toluca-Amealcoregion, Central Mexico*. Tesis de doctorado. The University of London, Londres.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano. (2018). *Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca*. Recuperado el 12 de diciembre de 2018 de <http://seduym.edomex.gob.mx/toluca>
- Secretaría de Gobierno. (2010). *Peligros naturales y tecnológicos relevantes durante el período 1810-2010*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Segura, G., Badilla, E. y Obando, L. (2011). Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba. *Revista Geológica de América Central*, 45,101-121.
- Sierra-Domínguez, G. (2005). *Parque estatal Sierra Morelos, Estado de México: diagnóstico, zonificación y programas para su manejo*. Tesis de maestría en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Suárez, J. (2009). Zonificación de susceptibilidad, amenaza y riesgo. Recuperado el 2 de octubre de 2018 de <http://www.erosion.com.co>
- Tanarro, L. M. y Muñoz, J. (2012). Rockfalls in the Duratón canyon, central Spain: Inventory and statistical analysis. *Geomorphology*, 169-170, 17-29.
- Toro F. J. (2007). El desarrollo sostenible: un concepto de interés para la geografía. *Cuadernos Geográficos*, 40, 149-181.
- Valerio, C. V., García-Palomo, A., López-Miguel, C., Galván-García, A. H. (2007). Geología y procesos de remoción en masa asociados a un domo volcánico tipo *couleé*: Cerro El Tenayo, Tlalnepantla, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59, 183-201.