



RISCOS

territorium 31 (I), 2024, 5-18

journal homepage: <https://territorium.riscos.pt/numeros-publicados/>

DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_31-1_1

Artigo científico / Scientific article



SUSCEPTIBILIDAD A INESTABILIDAD DEL TERRENO DERIVADA DEL CRECIMIENTO URBANO
EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO, MÉXICO*

SUSCEPTIBILITY TO GROUND INSTABILITY ARISING FROM URBAN GROWTH
IN THE CITY OF QUERÉTARO, MÉXICO

5

Rocio Marisol Alanís Anaya

Universidad Nacional Autónoma de México

Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras (México)

ORCID 0000-0001-5899-8465 rocioalanis@filos.unam.mx

RESUMEN

La ciudad de Querétaro ha tenido un crecimiento urbano constante desde 1970 abarcando nuevos espacios en áreas con relieve suavizado y que presentan un cambio de uso de suelo urbano intensivo y extensivo en los últimos tres años. Es por ello que este trabajo muestra la asociación entre la susceptibilidad a inestabilidad del terreno y el crecimiento urbano en un relieve poco abrupto. Para ello, se siguió una metodología que integra el análisis del crecimiento urbano, la identificación de la susceptibilidad a inestabilidad del terreno a partir de factores condicionantes y desencadenantes y la recopilación de evidencia documental y con trabajo de campo de eventos de inestabilidad del terreno. Los resultados indican que en la ciudad de Querétaro hay un crecimiento urbano horizontal fuera del graben queretano y un crecimiento vertical en el que destaca la construcción de nuevos edificios de más de 12 pisos en zonas con alta y muy alta susceptibilidad a inestabilidad del terreno.

Palabras clave: Cambio de uso de suelo, procesos gravitacionales, subsidencia del terreno, relieve suavizado.

ABSTRACT

The city of Querétaro has seen constant urban growth since 1970, occupying new spaces in areas with smooth relief which have undergone intensive and extensive urban land use change in the last three years. Thus, this work shows the association between the susceptibility to ground instability and urban growth in relief that is not particularly steep. For this, a methodology that combines the analysis of urban growth, the identification of susceptibility to ground instability with conditioning and triggering factors, and the compilation of documentary evidence and field work for the identification of ground instability was implemented. The results indicate that in the city of Querétaro there is a horizontal urban growth outside the Querétaro Graben together with vertical growth where the construction of buildings with more than 12 floors stands out in areas where the terrain has high and very high susceptibility.

Keywords: Land use change, gravitational processes, ground subsidence, smooth relief.

* O texto deste artigo foi submetido em 29-10-2022, sujeito a revisão por pares a 31-10-2022 e aceite para publicação em 26-12-2022.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 31 (I), 2024, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introducción

El establecimiento de campos de cultivo y el crecimiento de zonas urbanas son factores desencadenantes de inestabilidad del terreno, ya que ambos usos de suelo requieren la remoción de la cubierta vegetal natural, dejando al relieve expuesto y contribuyendo a la aceleración de los procesos erosivos en regiones que poseen pendientes pronunciadas y precipitaciones intensas (Chen y Huang, 2013; Kipkosgei-Kilimo, 2014; Legorreta Paulín *et al.*, 2014; Reichenbach *et al.*, 2014; Alanís Anaya *et al.*, 2017).

Si bien el crecimiento urbano no es la principal causa de deforestación, sí forma parte de la secuencia de transformación del paisaje al ocupar los campos de cultivo que fueron abandonados por desertificación o cambios socioeconómicos de la población (Myers y Kent, 2001; Lambin y Geist, 2006). Asimismo, el vivir en ciudades representa el acceso a servicios y empleos mejor remunerados, por lo que la oferta de viviendas se da en las zonas más cercanas a las zonas urbanas, dejando en segundo plano la elección del relieve adecuado para su edificación (Saavedra, 2010; Mendoza-Mamani, 2021).

Por consiguiente, estos cambios de uso de suelo constituyen una parte inherente del modelado hídrico local del terreno, favoreciendo procesos de erosión pluvial, erosión laminar, erosión lineal y flujos subsuperficiales, los cuales no solo deterioran al relieve sino también a la misma infraestructura que se implementó para establecer las zonas urbanas (Schaetzel y Anderson, 2005; Alayo y Villegas-Lanza, 2021; Mendoza-Mamani, 2021).

Ejemplos de lo anterior ocurrieron en 2011 en La Paz, Bolivia, cuando debido a las lluvias intensas se produjo un megadeslizamiento y colapsaron 400 viviendas al este de la ciudad (Pampahasi Central Bajo, 23 de Marzo, Metropolitana, Cervecería, Valle de las Flores, Kallapa y Kupini II); y en 2019 en el sector de San Jorge Kantutani donde se generó un deslizamiento que destruyó 68 viviendas que habían sido establecidas sobre un antiguo basurero (EA Bolivia, 2011; ABE, 2019; Mendoza-Mamani, 2021). Otro ejemplo es el acontecido al norte de la zona conurbada de la Ciudad de México en 2021, cuando después de un periodo de lluvias intensas colapsó parte de la ladera del Cerro del Chiquihuite y se desplazaron 200 toneladas de roca volcánica sobre al menos 10 viviendas (El Universal, 2021; Garnica-Peña, 2022).

En dichos casos se observa que la mala planificación urbana, las fuertes precipitaciones y el descuido de las autoridades dieron como resultado escenarios de desastre que vinculan el uso de suelo urbano con la inestabilidad del terreno. También resulta pertinente mencionar que los estudios que muestran las evidencias de dicha relación se centran en regiones con relieve

abrupto, de manera que es necesario evaluar aquellos paisajes con relieves suavizados que también presenten modificaciones intensivas y extensivas en su uso de suelo que puedan estar expuestos al incremento de las precipitaciones causado por del cambio climático.

Por estas razones el presente estudio se centra en la ciudad de Querétaro, en la cual destacan dos etapas de crecimiento acelerado; la primera entre 1970 y 1990 cuando la densidad poblacional decreció de 100 a 52.9 habitantes por hectárea, que en términos de superficie significa un incremento de 975.72 a 3,445.93 hectáreas; en tanto que para la segunda etapa de 1990 a 2020 se estima que multiplicó su tamaño 2.64 veces y alcanzó 24,271.02 hectáreas. Además, para 2018 se tenía una oferta del 85.5% en casas-habitación como opción de vivienda, lo que implica que la ciudad seguirá aumentando hacia las periferias (Delgado, 1993; AM Querétaro, 2021; Crea Soluciones, 2019; IMPLAN, 2020). Siendo así, el objetivo de este trabajo es evaluar la susceptibilidad a la inestabilidad del terreno derivada del crecimiento urbano en un relieve suavizado con modificaciones intensivas y extensivas del paisaje, considerando factores condicionantes (topográficos y geológicos) y desencadenantes (hidrometeorológicos y antrópicos) con la finalidad de identificar sitios susceptibles para atenuar los peligros implícitos y generar una conciencia de planeación urbana.

Área de estudio

La ciudad de Querétaro se localiza en los límites de los estados de Querétaro y Guanajuato (fig. 1), al sur del Bajío Mexicano. Tiene una población de 2,368,467 habitantes y una superficie de 24,271.02 hectáreas conformada por los municipios de Querétaro, El Marqués, Corregidora y Huimilpan en el estado de Querétaro y Apaseo el Alto en el estado de Guanajuato (IMPLAN, 2020; INEGI, 2021a).

Su clima es semiseco templado con lluvias en los meses de mayo a septiembre, la precipitación media anual varía de 4.1 a 134.9 mm y la temperatura media anual se encuentra entre 15.3°C y 22.8°C (CONAGUA-SMN, 2022). En términos generales, la vegetación predominante corresponde al matorral xerófilo (matorral crasicaule y matorral espinoso) y vegetación secundaria de bosque tropical caducifolio (Cabrera-Luna y Gómez-Sánchez, 2005).

La ciudad se ubica al interior de la cuenca Lerma-Chapala en el límite centro-norte del eje neovolcánico; su superficie se distribuye dentro de un graben que está delimitado por fallas normales al occidente, oriente, norte y sur. Posee depósitos sedimentarios y se rodea de micro-mesetas y depósitos volcánicos. En los estratos superficiales destaca un relleno antropogénico de 1 m de espesor de arena, seguido de estratos de arcillas expansivas de origen fluvial y lacustre con espesores

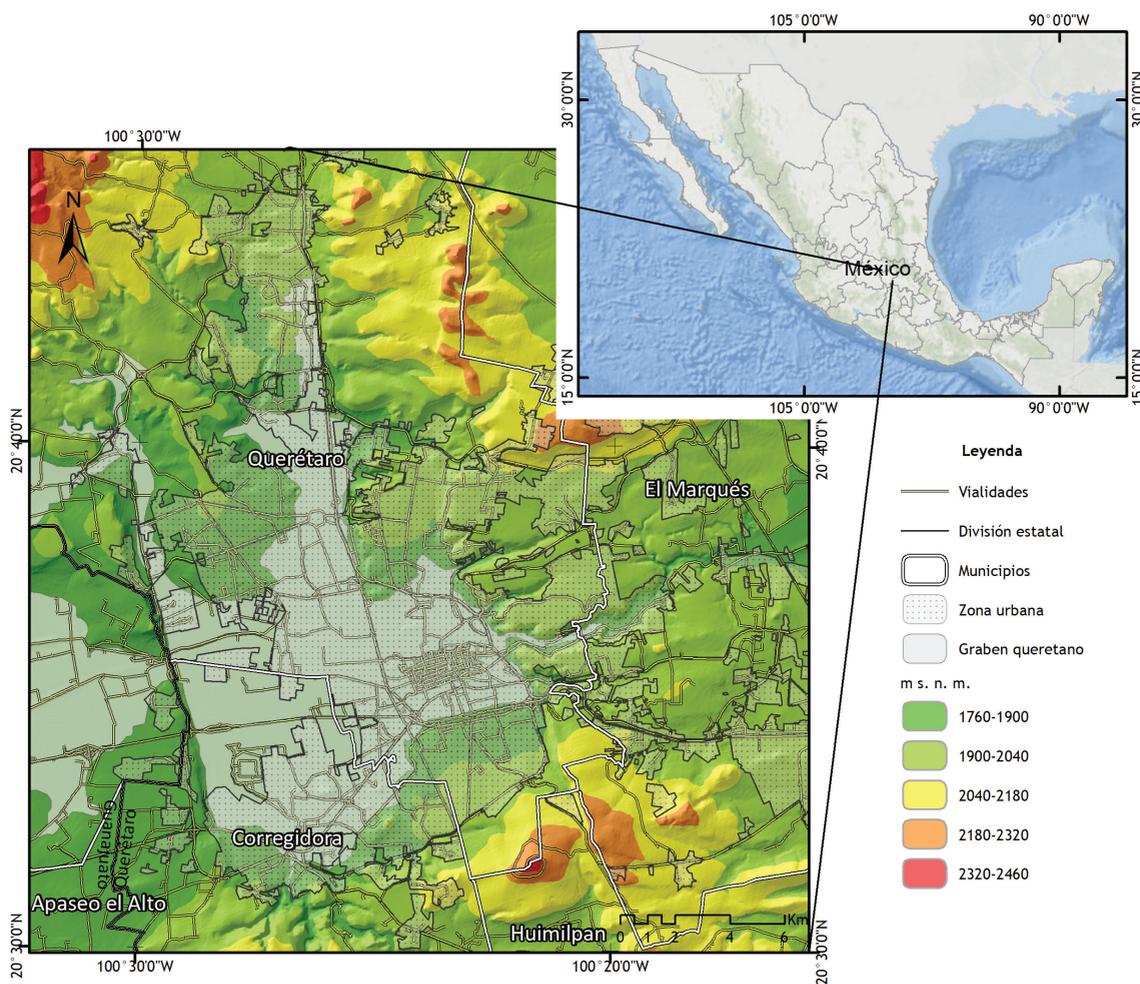


Fig. 1 - Localización de la ciudad de Querétaro (Elaboración propia a partir de datos del INEGI, 2020).

Fig. 1 - Location of the city of Querétaro (Own elaboration based on data from INEGI, 2020).

de entre 1 y 6 m. Cabe mencionar que el relleno antropogénico se colocó para reducir las afectaciones que pudieran ocurrir en las viviendas debido a la expansión y contracción de los depósitos arcillosos (Navarro, 1986; Aguirre-Díaz, 2000; Carreón Freyre et al., 2005).

Metodología

Para evaluar la susceptibilidad a inestabilidad del terreno derivada del crecimiento urbano en la ciudad de Querétaro, se determinó el crecimiento de la zona urbana entre 1990 y 2022; posteriormente se realizó la identificación de áreas susceptibles a inestabilidad de terreno a partir de variables cartográficas correspondientes a factores condicionantes (topográficos y geológicos) y desencadenantes (hidrometeorológicos y antrópicos). Con esta información se recabaron evidencias de los procesos de inestabilidad de terreno a partir de medios digitales de comunicación y trabajo de campo. A continuación, se describe la metodología detallada.

Determinación del crecimiento urbano entre 1990 y 2022

Este proceso consistió en la georreferenciación de imágenes del territorio obtenidas del historial de imágenes de *Google Earth* (1990, 2000, 2010 y 2022). Para ello se descargaron 9 escenas del territorio para cada año y se les asignaron coordenadas por medio de puntos de control utilizando la herramienta Georreferenciador del *software* Qgis. Posteriormente las imágenes se fusionaron en un mosaico por medio de la herramienta Combinar del mismo *software*.

El siguiente paso fue retomar los marcos geoestadísticos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), específicamente la cartografía de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) urbanas y rurales para los años 2000, 2010 y 2020, las cuales muestran en formato vectorial a las unidades territoriales creadas como base para el control de levantamientos de censos de información demográfica y socioeconómica en campo. En Qgis se sobrepusieron las AGEB a las imágenes de

Google Earth y se identificaron áreas de infraestructura que no estaban delimitadas en los polígonos de los años 2000 y 2010, así que se procedió a completar su delimitación por medio de fotointerpretación digital. Para la delimitación de la zona urbana de 2022 se usó la capa vectorial de 2020 y se completó por medio de una fotointerpretación digital con la imagen de *Google Earth* de 2022. Cabe mencionar que debido a que la disponibilidad de las AGEB se tiene a partir del año 2000, se tuvo que realizar una clasificación supervisada a la imagen de *Google Earth* de 1990 y con ello se obtuvo el polígono de la ciudad para ese año.

Susceptibilidad a inestabilidad del terreno

La evaluación se realizó utilizando Qgis y tomando como referencia un análisis multicriterio ponderado que considera factores condicionantes y desencadenantes en una región con relieve abrupto y cambio de suelo intensivo (Saaty, 2008; Alanís Anaya *et al.*, 2017). La adecuación para el presente trabajo integra variables geológicas e hidrometeorológicas propias de la ciudad de Querétaro y considera escenarios de inestabilidad de terreno en un área con relieve suavizado y un uso de suelo urbano extensivo e intensivo. Es por ello que en este análisis se integraron factores condicionantes topográficos (pendientes, disección vertical del terreno y cercanía a ríos y escorrentías) y geológicos (unidades geológicas y fallas y fracturas geológicas); así como factores desencadenantes hidrometeorológicos (erosividad de lluvias y concentración de precipitación) y antrópicos (uso de suelo y vegetación, y caminos y vialidades).

La obtención de los factores condicionantes topográficos se realizó a partir de un modelo digital de elevación (MDE) con resolución de 15 m (INEGI, 2013). Con él se obtuvieron las pendientes en grados de inclinación usando la herramienta Pendiente. En la disección vertical del terreno se agregó una gradilla de 1 km² para medir la altitud relativa e identificar sitios abruptos en el relieve. Para la cercanía a ríos y escorrentías se digitalizaron las corrientes hídricas a partir de un sombreado del MDE, las curvas de nivel con una equidistancia de 10 m y la imagen de *Google Earth* de 2022; a la capa resultante se le aplicó un *buffer* de 50 m considerando la posible influencia lateral en la inestabilidad de terreno. Los factores condicionantes geológicos (unidades geológicas y fallas y fracturas geológicas) se obtuvieron de la digitalización de la cartografía geológica de Carreón Freyre *et al.* (2005).

En el caso de la elaboración de los factores desencadenantes hidrometeorológicos se consideró evaluar cuál es el impacto de la precipitación en el relieve. Para ello, se partió de datos de precipitación diaria para el periodo del 1 de enero de 1990 al 31 de diciembre de 2021 descargados del Servicio Meteorológico Nacional

para las estaciones climatológicas de Ameche, El Obraje, Eta Carrillo, El Batán, El Pueblito, Juriquilla, Plantel 7, Querétaro DGE y Querétaro Obs (CONAGUA-SMN, 2022); no obstante, dado que en las estaciones se identificaron datos faltantes (20% del total de días) se procedió a realizar una reconstrucción de datos de precipitación con el método de razones promedio (Ecuación 1) (Pizarro *et al.*, 2003).

$$PX = \frac{\overline{PX}}{N} * \frac{PA}{PA} + \frac{PB}{PB} + \dots + \frac{PN}{PN} \quad (1)$$

Donde:

Px = Razón promedio

$\frac{\overline{PX}}{N}$ = Promedio de precipitaciones en la estación de interés entre N estaciones de validación

$\frac{PA}{PA} + \frac{PB}{PB} + \dots + \frac{PN}{PN}$ = Precipitación en estación de validación entre el promedio total de la misma

Para evaluar la erosividad por lluvias, con los valores de precipitación completos se calculó el Índice de Fournier Modificado (IFM) que relaciona la suma de lluvia mensual y la lluvia anual (Ecuación 2) (Arnoldus, 1980; Lobo *et al.*, 2005).

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} (p^2/P) \quad (2)$$

Donde

IFM = Índice de Fournier Modificado (mm)

p = Lluvia mensual (mm)

P = Lluvia anual (mm)

Asimismo, también se calculó el Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) que estima la incidencia y agresividad de la precipitación estacional sobre la erosión del suelo (Ecuación 3) (Oliver, 1980; Velasco y Cortes, 2009).

$$ICP = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{p^2} \quad (3)$$

Donde

ICP = Índice de Concentración de la Precipitación (%)

p = Lluvia mensual (mm)

P = Lluvia anual (mm)

Una vez obtenidos los datos del IFM e ICP, se hizo un promedio de los resultados de cada estación climatológica y se integraron a una capa vectorial para realizar una interpolación de Kriging, la cual permitió conocer la distribución de la erosividad, incidencia y agresividad de la lluvia en el relieve de la ciudad de Querétaro.

Para los factores desencadenantes antrópicos se utilizaron dos capas vectoriales del INEGI. En el caso de uso de suelo y vegetación, se descargó la serie VII de uso de suelo y vegetación escala 1:250,000 (INEGI, 2021b), y con la imagen de *Google Earth* 2022 y el polígono derivado de ella, se delimitaron los elementos espaciales más recientes, para actualizar y aumentar la escala de

resolución de las entidades incluidas en el uso de suelo y vegetación de la capa vectorial. Para obtener el factor desencadenante de caminos y vialidades se usó la capa Red Nacional de Caminos 2021 a escala 1:50,000; de ella se tomaron los datos vectoriales correspondientes a las vialidades primarias para la ciudad de Querétaro y áreas circundantes. Dicha capa se sobrepuso a la imagen de *Google Earth 2022* y se actualizó la información sobre caminos pavimentados primarios y de principales terracerías, para posteriormente aplicar un *buffer* de 50 m para evaluar la influencia que tiene la distancia a las principales vialidades y caminos con la inestabilidad del terreno.

Derivado de los procesos anteriores, todas las capas asociadas a factores condicionantes y desencadenantes se reclasificaron de acuerdo a las clases internas de cada factor, y a cada capa vectorial se le asignaron los pesos ponderados correspondientes a cada clase, resultantes de matrices de jerarquización analítica (Roa, 2007). Estas matrices se elaboraron considerando la contribución de cada clase en la inestabilidad del terreno. Las capas resultantes se reclasificaron nuevamente utilizando el módulo *r.reclass* en *Qgis* a partir de los pesos ponderados por clase y en el mismo proceso se obtuvieron capas categorizadas en formato raster con 10 m de resolución.

Por último, para obtener la cartografía de susceptibilidad a inestabilidad del terreno derivada del crecimiento urbano en la ciudad de Querétaro, las capas raster generadas se sometieron a una suma lineal ponderada utilizando los pesos relativos para cada grupo de factores condicionantes (topográficos y geológicos) y desencadenantes (hidrometeorológicos y antrópicos), los cuales se calcularon a partir de los pesos ponderados por clase. La ecuación se construyó de la siguiente forma:

$$\text{Susceptibilidad} = [\text{Top} \cdot \text{PRG}\%] + [\text{Geo} \cdot \text{PRG}\%] + [\text{Hidrom} \cdot \text{PRG}\%] + [\text{Antrop} \cdot \text{PRG}\%]$$

Donde:

Top = Factores condicionantes topográficos

Geo = Factores condicionantes geológicos

Hidrom = Factores desencadenantes hidrometeorológicos

Antrop = Factores desencadenantes antrópicos

PRG% = Peso relativo de grupo (%)

Recopilación de evidencia en medios digitales de comunicación y trabajo de campo

Para poder corroborar los resultados de la cartografía de susceptibilidad a inestabilidad del terreno derivada del crecimiento urbano en la ciudad de Querétaro, por un lado, se recopilaron notas de medios digitales de comunicación (octubre de 2017 a julio de 2022) que incluían noticias de portales periodísticos y videos subidos a redes sociales, los cuales estaban relacionados con algún evento de inestabilidad del terreno asociado a la temporada de lluvias.

Por otro lado, se realizó un trabajo de campo durante el mes de mayo de 2022, en el que se visitaron a pie y en automóvil las áreas marcadas con mayor susceptibilidad a inestabilidad del terreno; con ello se identificaron y georreferenciaron los puntos donde se encontró evidencia de erosión fluvial, caída de rocas, flujos de lodo, flujos de escombros, deslizamientos y subsidencias.

Resultados y discusión

Si bien el crecimiento urbano de la ciudad de Querétaro se ha evaluado en otros trabajos, su análisis se ha realizado a partir del Marco Geoestadístico del INEGI (Delgado, 1993; Implan, 2020; Oropeza y Leyva, 2020), lo que implica que la representación del área urbana sea una generalización cartográfica de manzanas o áreas de superficie variable que componen las AGEB, y por ende algunos elementos espaciales con uso de suelo urbano puedan no verse representadas en los polígonos vectoriales. No obstante, para el presente trabajo, los polígonos de dichas AGEB fueron el referente para conocer los límites del uso de suelo urbano y del uso de suelo rural que se integró a la ciudad, así como para identificar la aceleración del crecimiento urbano.

Es por ello que se realizó una fotointerpretación digital con imágenes de *Google Earth* para complementar la información del INEGI, y obtener datos más precisos de la superficie que abarca la zona urbana en la ciudad de Querétaro. Siendo así, en el análisis de este trabajo se observó que entre 1990 y 2022 la ciudad de Querétaro tuvo un incremento notable de su superficie urbana pasando de 4,698.63 a 27,053.42 hectáreas (fig. 2). Lo anterior implica que en 32 años la ciudad de Querétaro aumentó su tamaño un 575.77% con respecto al año 1990.

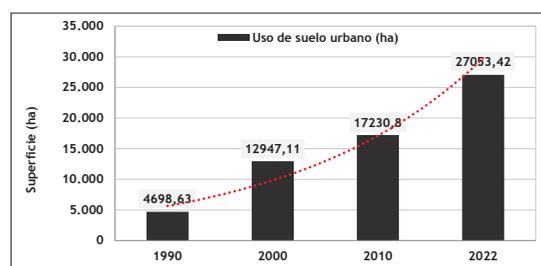


Fig. 2 - Crecimiento urbano de la ciudad de Querétaro entre 1990 y 2022.

Fig. 2 - Urban growth of the city of Querétaro between 1990 and 2022.

Al evaluar los datos por periodos, se puede observar que el crecimiento más acelerado ocurrió entre 1990 y el año 2000 con un 175.55%. No obstante, a pesar de que en el periodo del 2000 al 2010 el aumento solo fue del 33.09%, para el periodo de 2010 a 2022 el porcentaje de crecimiento volvió a subir y alcanzó un 57.01% (TABLA I).

TABLA I - Periodos de crecimiento urbano en la ciudad de Querétaro entre 1990 y 2022.

TABLE I - Periods of urban growth in the city of Querétaro between 1990 and 2022.

Periodo	Superficie de crecimiento (ha)	Crecimiento anual (ha)	Porcentaje de crecimiento (%)
1990-2000	8,248.48	824.85	175.55
2000-2010	4,283.69	428.37	33.09
2010-2022	9,822.62	818.55	57.01

10

Por su parte, en el análisis espacial del crecimiento urbano destaca que en el año 1990 había muchos polígonos pequeños que se encontraban separados del núcleo urbano de la ciudad, los cuales para el año

2000 ya estaban incorporados a la mancha urbana, además de que se comenzó a construir hacia las laderas volcánicas que bordean el graben queretano. También es evidente que el crecimiento urbano para 2010 se mantuvo principalmente hacia los bordes del polígono correspondientes al año 2000. Sin embargo, para el año 2022 se observa que el crecimiento fue mayor e incluso hay una alta incidencia de polígonos urbanos de considerables dimensiones que no están conectados a la mancha urbana principal (fig. 3).

En este punto es necesario mencionar que la ciudad de Querétaro ocupa el quinto lugar en la lista de las principales ciudades del futuro en Latinoamérica (fDi Financial Times, 2021) y uno de los motivos es su

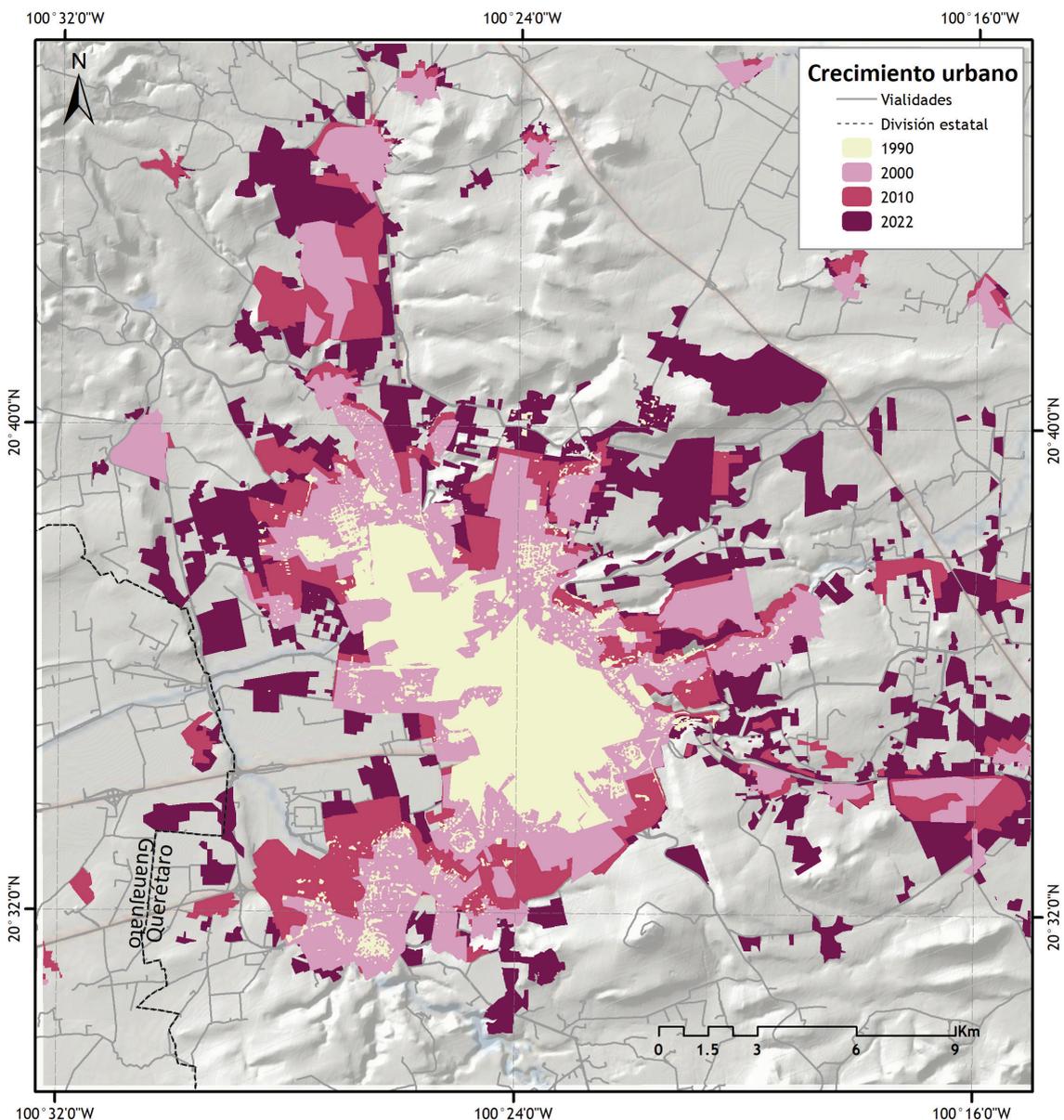


Fig. 3 - Cartografía del crecimiento urbano en la ciudad de Querétaro.

Fig. 3 - Map of urban growth in the city of Querétaro.

conectividad urbana. La secuencia lógica de crecimiento urbano apunta a la urbanización de las áreas que se ubican entre la mancha urbana principal y los polígonos urbanos que aún permanecen aislados, por lo que se puede esperar una mayor modificación del relieve para esas zonas.

Antes de abordar la susceptibilidad a inestabilidad del terreno, es necesario mencionar que el área de estudio para evaluar los factores condicionantes y desencadenantes en la ciudad de Querétaro fue de 29 km²; esto es para poder analizar la influencia de dichos factores dentro y fuera del polígono urbano de la ciudad y así poder identificar los sitios con menor susceptibilidad a inestabilidad del terreno y facilitar un futuro ordenamiento territorial.

Dicho lo anterior, a continuación se describen los factores condicionantes topográficos: en el caso de las pendientes se observan inclinaciones de 0 a 50°; las diferencias de altitud relativa mínima van de 0 a 331 m/km² y la presencia de ríos y escorrentías ocurre principalmente en las laderas y drenes de concreto y roca que encausan las corrientes al interior del graben. Por su parte en los factores condicionantes geológicos se observaron las siguientes unidades: andesitas y basaltos del Mioceno Tardío (48,383 ha); calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas (196 ha); riolita/toba riolítica (116 ha); rocas volcánicas Mioceno Inferior 2,053 ha); secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas (14,552 ha); secuencia de tobas, gravas, arenas y arcillas con abundantes materiales piroclásticos (24,575 ha); toba riolítica/toba dacítica (2,388 ha) y una unidad volcánica de composición intermedia a básica (2,316 ha) (Carreón Freyre *et al.*, 2005). Respecto a las fallas y fracturas geológicas se observó la presencia de un sistema de 24 fallas y 17 fracturas cuya distribución enmarca los límites del graben queretano (Carreón Freyre *et al.*, 2005).

En relación a los factores desencadenantes hidrometeorológicos, se obtuvieron valores del Índice de Fournier Modificado de entre 100 y 146 mm, lo que acuerdo con la

escala de Lobo *et al.* (2005), indica erosividad moderada y alta. En tanto que el Índice de Concentración de la Precipitación muestra datos que van de 20.74 a 24.36% y señalan que la precipitación sobre la erosión del suelo es altamente estacional según la escala de Oliver (1980). En este punto cabe mencionar que la distribución temporal de lluvias entre 1990 y 2021 (fig. 4) muestra incrementos de precipitación anual acumulada importantes cada 10 a 12 años aproximadamente; lo anterior es necesario que se considere ya que podría tratarse de ciclos en los cuales dichos aumentos en la cantidad de lluvia pueden ocasionar inundaciones y mayor presencia de eventos de inestabilidad del terreno.

En el factor desencadenante antrópico de uso de suelo y vegetación se observaron las siguientes clases: asentamiento humano (28,465 ha), agricultura (42,480 ha), cuerpos de agua (259 ha), matorral crasicale (6,371 ha), pastizal inducido (1,126 ha), suelo desnudo (208 ha) y vegetación secundaria de selva baja caducifolia (15,795 ha). Por último, en el factor desencadenante antrópico de caminos y vialidades se consideró la presencia de 274 km de vialidades primarias y principales terracerías, aunque en la región existen 2,643 km; esta selección fue para evitar la sobreestimación de este factor.

Derivado de la asignación de pesos ponderados a partir de matrices de jerarquización analítica (Anexo I), el peso relativo por grupo de factores fue mayor en los factores condicionantes topográficos (29.29%), le siguen los factores condicionantes geológicos (25.94), los factores desencadenantes antrópicos (25.24%) y los factores desencadenantes hidrometeorológicos (19.53%); destacando que el aporte de los factores desencadenantes antrópicos está casi al mismo nivel que el factor condicionante geológico, lo que indica que el uso de suelo y las vialidades sí tienen un peso significativo en la inestabilidad del terreno para la ciudad de Querétaro (Anexo II).

A partir de los resultados de la suma lineal ponderada para evaluar la inestabilidad del terreno, se puede observar que

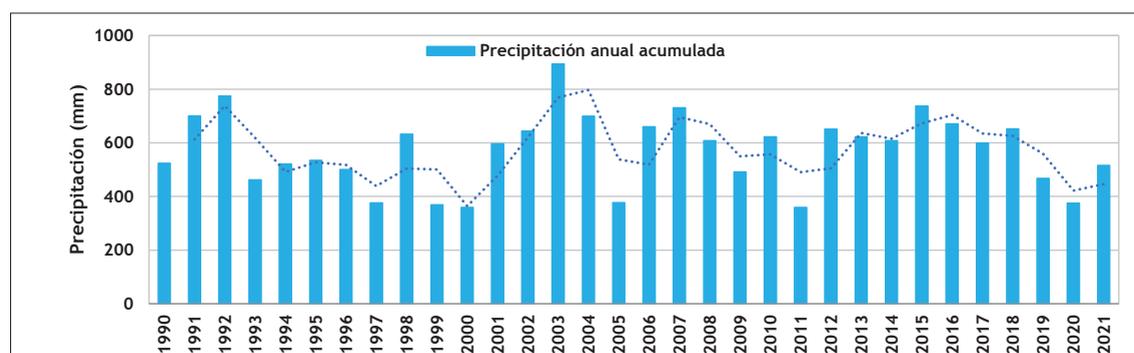


Fig. 4 - Distribución espacial de la precipitación anual acumulada en la ciudad Querétaro (1990-2021).

Fig. 4 - Spatial distribution of the accumulated annual precipitation in the city of Querétaro (1990-2021).

en la región existe una mayor distribución de áreas con susceptibilidad baja (37,014 ha); le siguen la susceptibilidad moderada (23,254 ha) y la susceptibilidad muy baja (18,719 ha). No obstante, existen superficies de 7,187 ha con susceptibilidad alta y 3,238 ha con susceptibilidad muy alta, las cuales corresponden a sitios con mayor pendiente, en polígonos urbanos sobre las micro-mesetas ubicadas al este de la ciudad y en áreas cercanas a ríos y caminos. Asimismo, los resultados de la cartografía anterior indican que los municipios con mayor superficie de alta y muy alta susceptibilidad a inestabilidad del terreno son Corregidora, El Marqués y Querétaro (fig. 5).

Para complementar los resultados anteriores, se documentó la evidencia de 28 eventos asociados a inestabilidad del terreno por uso de suelo a través de

medios digitales de comunicación y trabajo de campo. Se identificaron 4 eventos de erosión fluvial que incluyen la presencia de rocas con alto grado de intemperismo, cárcavas bajo los restos de un local inmobiliario y la colocación de gaviones en una ladera donde se está construyendo un edificio de 15 pisos. También se encontraron 12 sitios con caída de rocas en los que se observaron bloques en riesgo de caer o ya desprendidos en laderas intervenidas y modificadas hasta con 90° de inclinación para avances laterales de construcciones de edificios y en un caso con la construcción de una barda perimetral en el borde la ladera, bloques removidos en perturbaciones recientes para terraseo de laderas y caída de bloques en laderas con perturbaciones antiguas. Se documentó la presencia de un flujo de lodo que

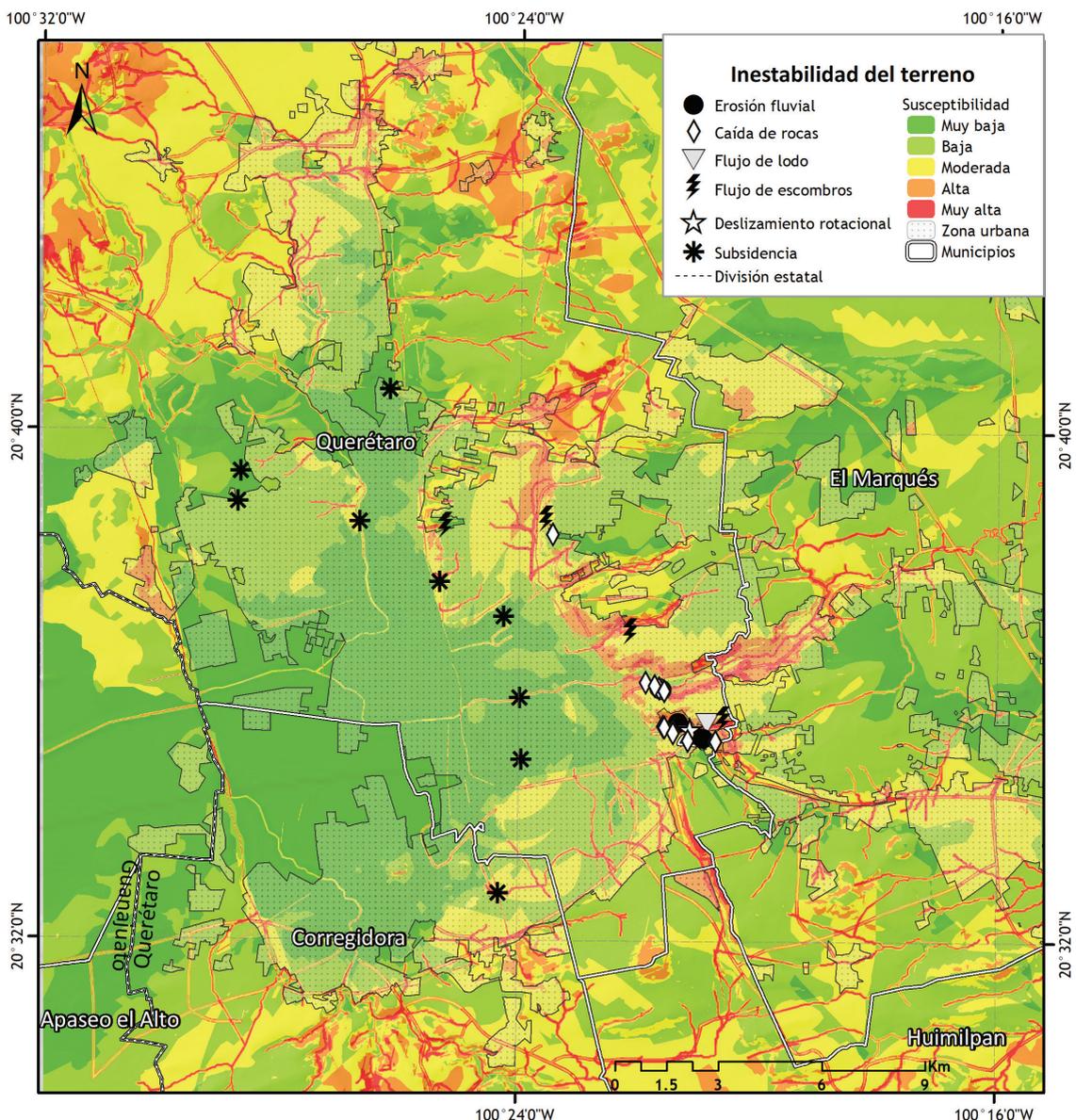


Fig. 5 - Susceptibilidad a inestabilidad del terreno en la ciudad de Querétaro 2022.

Fig. 5 - Susceptibility to terrain instability in the city of Querétaro 2022.

ingresó a dos viviendas durante una fuerte precipitación; cabe mencionar que las viviendas se encuentran con una separación mínima en la parte trasera que colinda con la ladera y el frente de las casas está prácticamente en el borde de la ladera con terraseo. Se ubicaron 4 flujos de escombros, dos de ellos en laderas terraseadas, otro ocurrió en una vialidad y fue producto de una fuerte precipitación que inestabilizó una ladera altamente erosionada por la extracción de materiales para la construcción y el último se desencadenó después de una lluvia acontecida en una ladera con intervención humana debido al establecimiento de terrenos irregulares. Además, se identificó la formación de un deslizamiento rotacional en el borde de una avenida, el cual fue resultado de la intervención para la construcción de una vialidad elevada en una ladera de toba y roca volcánica. Finalmente, se registró la incidencia de 9 subsidencias presentadas sobre vialidades al interior del graben, las cuales aparecieron después de inundaciones importantes en las zonas. La más notable ocurrió el 2 de octubre de 2021 cuando se formó un socavón en una de las paredes de un dren lo cual ocasionó la caída de un auto y con ello la pérdida de vidas humanas (Quadratin Querétaro, 2021). Cabe mencionar que dichas inundaciones se pueden relacionar a la modificación del relieve que en zonas de ladera ha reemplazado la cobertura vegetal y la primera capa superficial del suelo por concreto y asfalto, impidiendo la correcta infiltración del agua de lluvia y ocasionando un incremento de agua en los ríos, así como

la aparición de caudales sobre calles que conectan hacia las partes bajas del graben queretano.

A continuación, se muestran algunas de las evidencias de procesos de inestabilidad del terreno que se encontraron para la ciudad de Querétaro (fot. 1).

Si bien la inestabilidad del terreno asociada a zonas urbanas ha sido ampliamente documentada en áreas con relieve abrupto y pendientes pronunciadas (Reichenbach *et al.*, 2014; Alanís Anaya *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2021), existen algunos estudios que muestran la relación entre los procesos gravitacionales y la urbanización en sitios con relieve suavizado, por ejemplo, desde 1962 en las colinas de La Popa en la Ciudad de Cartagena (Colombia), se ha observado que la deforestación y la modificación del relieve para el establecimiento de sitios urbanos ha ocasionado deslizamientos en sitios que tenían menos de 30° de inclinación (Arce-Herrera, 1962; Aguilar-Collazo, 2015). Asimismo, al norte de la Ciudad de México, en los escarpes de la Sierra de Guadalupe, se han encontrado 14 procesos de inestabilidad de laderas en pendientes modificadas por la expansión urbana y que originalmente tenían menos de 30° (García Palomo *et al.*, 2006). Dichos trabajos analizan los procesos gravitacionales principalmente desde un punto de vista geológico-estructural, y sus resultados coinciden con la investigación plasmada en este documento, al evidenciar que el crecimiento urbano que modifica la topografía afecta a la estabilidad de las laderas aun en relieves



Fot. 1 - Evidencias de inestabilidad del terreno asociada al crecimiento urbano: a) Edificio en borde de ladera terraseada, b) Ladera con terrazas y gaviones, c) Deslizamiento rotacional, d) Vista superior del deslizamiento rotacional, e) Bloques colapsados en ladera modificada, f) Flujo de escombros (Noticias de Querétaro, 2022), g) Subsidencia del terreno (Expreso Press, 2021).

Photo 1 - Evidence of ground instability associated with urban growth: (a) Building on the edge of a terraced hillside; (b) Hillside with terraces and gabions; (c) Rotational slide; (d) Rotational slide viewed from above; (e) Collapsed blocks on modified slope; (f) Debris Flow (Noticias de Querétaro, 2022); (g) Ground subsidence (Expreso Press, 2021).

suavizados, por lo que es necesario que los planes de ordenamiento territorial también incluyan análisis de la estabilidad del terreno en relieve suavizado que ha sido modificado por el crecimiento urbano.

Conclusiones

La ciudad de Querétaro ha crecido considerablemente en los últimos 30 años. En su avance ha conectado áreas que anteriormente se consideraban rurales y ahora forman parte de una mancha urbana de más de 27 mil hectáreas; además de que su crecimiento se está distribuyendo hacia áreas de micro-mesetas fuera del graben queretano las cuales poseen un relieve suavizado. En los años anteriores a 2019 se ofrecían viviendas tipo casa habitación lo cual explica el crecimiento horizontal de la ciudad. Sin embargo, en los últimos tres años han proliferado las construcciones de edificios de más de 12 pisos con hasta 82 departamentos, los cuales se están estableciendo sobre laderas terrazadas y en algunos casos en áreas muy cercanas a paredes de laderas a las que se les modificó la pendiente dejándolas hasta en 90° de inclinación, evidenciando un uso de suelo urbano intensivo y extensivo en algunas áreas con alta y muy alta susceptibilidad a inestabilidad del terreno.

Lo anterior complementa el análisis de susceptibilidad a inestabilidad de terreno, ya que junto con la documentación en medios digitales de comunicación y el trabajo de campo, se valida la ocurrencia de eventos gravitacionales y de subsidencia en las áreas correspondientes a alta y muy alta susceptibilidad en la cartografía presentada en este trabajo. Además de que la mayoría de dichos eventos de inestabilidad del terreno (erosión fluvial, caída de rocas, flujo de lodo, flujo de escombros y deslizamiento rotacional) se asocian a modificaciones en laderas debido al uso de suelo urbano para la construcción de inmuebles y ocupación de laderas. En el caso de las subsidencias, estas se pueden asociar al aumento del crecimiento urbano sobre las cumbres y las laderas, lo cual impide la infiltración del agua de lluvia, facilitando los escurrimientos hacia las partes bajas del graben queretano y generando inundaciones.

Finalmente, se puede concluir que si la ciudad de Querétaro continúa con un ritmo constante en el crecimiento de su mancha urbana hacia zonas fuera del graben queretano, entonces aumentará la incidencia de procesos asociados a la inestabilidad del terreno. Asimismo, la metodología propuesta en este trabajo funciona para la identificación de zonas con alta y muy alta susceptibilidad a inestabilidad del terreno en relieves suavizados, lo cual puede coadyuvar al ordenamiento territorial en áreas donde antes no se creía que pudiera ocurrir el fenómeno y que ahora deben considerarse debido a los cambios de uso de suelo intensivos y al cambio climático que puede incidir en el aumento de la precipitación.

Agradecimientos

Se hace un reconocimiento a las instituciones que publican datos que sirven como base para realizar cartografía (CONAGUA e INEGI). Asimismo, al esfuerzo que hacen las personas para informar afectaciones derivadas de inestabilidad del terreno, por lo que se agradece la labor de periodistas y particularmente de los pobladores que han encontrado en las redes sociales un medio de alertamiento e información sobre los daños ocurridos en su región. A Lucero Parra, Aslam, Khalil y Siria, quienes facilitaron el trabajo de campo. Finalmente, a María Fernanda de la Torre por la revisión de estilo que contribuyó a mejorar la lectura del presente documento.

Bibliografía

- ABE - AGENCIA BOLIVIANA ESPACIAL (2019). Deslizamiento San Jorge/Kantutani. Agencia Boliviana Espacial. URL: <https://www.abe.bo/actividades/observacion-de-la-tierra/deslizamiento-san-jorge-kantutani/>
- Aguilar-Collazo, R. D. (2015). Calibración de los Parámetros Detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la Generación de un Escenario de Amenaza por Deslizamientos en la Ciudad de Cartagena. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá, Colombia, 365 p.
- Aguirre-Díaz, G. J., Zuñiga-Davila Madrid, F. R., Pacheco-Alvarado, F. J., Guzmán-Speziale, M. y Nieto-Obregón, J. (2000). El graben de Querétaro, México. Observaciones de Fallamiento activo. *GEOS*. Vol. 20, n.º 1, 2-7. URL: <https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos00-1/Aguirre-Diaz00-1.pdf>
- Alayo, J. T. y Villegas-Lanza, J. C. (2021). Estimación de desplazamientos ocasionados por deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba, Piura, mediante análisis de imágenes satelitales para el periodo 2017-2019. *Revista de Investigación de Física*. Núm. 24 (3). DOI: <https://doi.org/10.15381/rif.v24i3.20805>
- Alanís, A. R. M., Legorreta, P. G., Mas, J. F., and Granados, R. G. R. (2017). Susceptibility to gravitational processes due to land cover change in the río chiquito-barranca del muerto subbasin (Pico de Orizaba volcano, México). *Journal of Mountain Science*, 14(12), 2511-2526. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4268-9>
- AM QUERÉTARO (2021). Crece población 125% en las últimas décadas. Recuperado del 11 de julio de 2021. URL: <https://amqueretaro.com/queretaro/estado/2021/07/11/crece-poblacion-de-queretaro-125-en-las-ultimas-decadas-2/>

- Arce-Herrera, M. (1962). Estudio sobre la erosión en el Cerro de La Popa, Cartagena. *Boletín Geológico*. Vol. X. Núm. 1-3, 203-216.
- Arnoldus, H. M. (1980). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In *Assessments of Erosion*, de Boodts M, Gabriels D (eds). John Wiley and Sons Ltd, Chichester 127-132 p.
- Cabrera-Luna, J. A. y Gómez-Sánchez, M. (2005). Análisis florístico de la Cañada, Querétaro, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 77, 35-50. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsoci.1711>
- Carreón Freyre, D., Cerca, M., Luna González, L. y Gámez González, F. J. (2005). Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 22, n.º 1, 1-18. DOI: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57222101>
- Chen, C. Y. and Huang, W. L. (2013). Land use change and landslide characteristics analysis for community-based disaster mitigation. *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol. 185, Issue 5: 4125-4139. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-012-2855-y>
- CONAGUA-SMN (2022). *Información de estaciones climatológicas*. Comisión Nacional del Agua-Servicio Meteorológico Nacional. URL: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- CREA SOLUCIONES (2019). *El acelerado crecimiento de Querétaro*. CREA Bright Solutions Profitable Results. URL: <https://creasoluciones.com.mx/general/el-acelerado-crecimiento-de-queretaro/>
- Delgado, J. (1993). Querétaro: hacia la ciudad-región. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 8(3), 655-699. DOI: <https://doi.org/10.24201/edu.v8i3.889>
- EA BOLIVIA (2011). Mega deslizamiento en La Paz: 400 casas se desploman y deja 5000 afectados. Recuperado del 27 de febrero de 2011. URL: <https://www.eabolivia.com/social/6456-mega-deslizamiento-en-la-paz-400-casas-se-desploman-y-deja-5000-afectados.html>
- EL UNIVERSAL (2021). Se desgaja el Cerro del Chiquihuite; se reportan 10 desaparecidos y un muerto. Recuperado del 10 de septiembre de 2021. URL: <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/reportan-desgajamiento-del-cerro-del-chiquihuite-en-tlalnepantla>
- EXPRESO PRESS (2021). Tras fuertes lluvias, rescatan dos cuerpos en el río Queretaro. Recuperado del 3 de octubre de 2021. URL: <https://expreso.press/2021/10/03/tras-fuertes-lluvias-rescatan-dos-cuerpos-en-el-rio-queretaro/>
- fDi Financial Times. (2021). Americas Cities of the Future 2021/2022 overall winners. Recuperado del 17 de julio de 2021.
- IMPLAN (2020). Crecimiento del Área Urbana de la Zona Metropolitana de Querétaro 1970-2020. Instituto Municipal de Planeación del Municipio de Querétaro. RL: <http://implanqueretaro.gob.mx/v2/>
- INEGI - INSTITUTO DE CIÊNCIA E INOVAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E ENGENHARIA INDUSTRIAL (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano. URL: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI - INSTITUTO DE CIÊNCIA E INOVAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E ENGENHARIA INDUSTRIAL (2021a). Marco Geostadístico diciembre 2021. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. URL: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas>
- INEGI - INSTITUTO DE CIÊNCIA E INOVAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E ENGENHARIA INDUSTRIAL (2021b). Uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000. Serie VII. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. URL: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>
- García-Palomo, A., Carlos-Valerio, V., López-Miguel, C., Galván-García, A. y Concha-Dimas, A. (2006). Mapa de inventario de deslizamientos de la Sierra de Guadalupe, al norte de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. LVIII(2), 195-204. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94320213004>
- Garnica-Peña, R. y Alcántara-Ayala, I. (2022). Evaluation of exposure to mass movement processes using UAVacquired aerial imagery: insights after the 2021 El Chiquihuite hill disaster, Estado de Mexico, Mexico. *10th International Conference on Geomorphology, ICG2022-719*. DOI: <https://doi.org/10.5194/icg2022-719>
- Kipkosgei-Kilimo, R. (2014). *Land cover changes and landslide occurrence: A case of Tirap Division in Elgeyo Marakwet county, Kenya*. University of Nairobi. Department of Urban and Regional Planning.
- Lambin, E. y Geist, H. (2006). *Land-use and land-cover change. Local processes and global impacts*. Springer.
- Legorreta-Paulín, G. y Lugo-Hubp, J. (2014). Zonación de peligros por procesos gravitacionales en el flanco suroccidental del Volcán Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, n.º 84, 20-31. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.37004>
- Liu, J., Wu, Z., Zhang, H. (2021). Analysis of Changes in Landslide Susceptibility according to Land Use over 38 Years in Lixian County, China. *Sustainability*, n.º 13, 10858. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131910858>

- Lobo, D., Lozano, Z. and Delgado, F. (2005). Water erosion risk assessment and impact on productivity of a Venezuelan soil, *Catena*, 64, 297 p.
- Mendoza-Mamani, R. (2021). Situación físico-Legal de las áreas de riesgo de la ciudad de La Paz. Revista del Instituto de Investigaciones Geográficas. IIGEO-UMSA. *REVIGEO*, 13, Vol. 3, Núm. 13. URL: <https://revistaiiggeo.umsa.bo/index.php/revista/article/view/39/36>
- Myers, N., Kent, J. (2001). *Perverse subsidies: How tax dollars can undercut the environment and the economy*. Island Press, Washington D.C., 277 p.
- Navarro-Ochoa, L. A. (1986). *Estabilización de arcillas expansivas del Estado de Querétaro con cal y cemento a corto plazo (Tesis Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón)*. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, 43 p.
- Oliver, J. E. (1980). Monthly precipitation distribution: A comparative index. *Professional Geographer*, 32 (3), 300-309.
- NOTICIAS DE QUERÉTARO (2022). Se deslava cerro en San Pedrito Peñuelas. Recuperado del 6 de junio de 2022. <https://noticiasdequeretaro.com.mx/2022/06/06/se-deslava-cerro-en-san-pedrito-penuelas-4ta-seccion/>
- Oropeza Sandoval, D. y Leyva Picazo, V. (2020). El crecimiento urbano y sus consecuencias en la movilidad. Caso de estudio: Zona conurbada de Querétaro. *Anuarios de Espacios Urbanos*, n.º 27, 27 p. DOI: <https://doi.org/10.24275/ARWI7430>
- Pizarro, R., Ausensi, P., Aravena, D. y Sangüesa, C. (2003). *Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones pluviométricas de la VII Región del Maule, Chile*. Centro Tecnológico de hidrología ambiental. Universidad de Talca, Chile.
- QUADRATIN QUERETARO (2021). Cae auto a dren en avista candiles, conductor esta desaparecido. Recuperado del 2 de octubre de 2021. <https://queretaro.quadratin.com.mx/cae-auto-a-dren-en-avenida-candiles-conductor-esta-desaparecido/>
- Roa, J. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado de Mérida-Venezuela. *Revista geográfica venezolana*, vol. 48 (2), 183-219.
- Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, A. C. and Rossi, M. (2014). The Influence of Land Use Change on Landslide Susceptibility Zonation: The Briga Catchment Test Site (Messina, Italy). *Environ Manage*, vol. 56 (6): 1372-1384. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-014-0357-0>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal Services Sciences UK*, Volume 1, n.º 1, 83-98. URL: <https://www.rafikulislam.com/uploads/resourses/197245512559a37aadea6d.pdf>
- Saavedra, F. (2010). Vulnerabilidad de la población frente a inundaciones e inestabilidad de laderas. En Cotler Ávalos, H. (coord.). *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización*, México: Semarnap-INE, Fundación Río Arronte, 132-137. URL: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/639/vulnerabilidad.pdf>
- Schaetzl, R., Anderson, S. (2005). *Soils Genesis and Geomorphology*. Cambridge. University Press.
- Velasco, I. y Cortés, G. (2009). Índice de Fournier modificado y de concentración de la precipitación, como estimadores del factor de riesgo de la erosión, en Sinaloa, México. Soil Erosion and Desertification. Trabajo presentado en el *Congreso Internacional sobre Desertificación*, Murcia, España.

territorium 31 (I)

Anexo I - Pesos ponderados a partir de matrices de jerarquización analítica.

Appendix I - Weighted weights from analytical hierarchic matrices.

Pendientes	24 a 50°	18 a 24°	12 a 18°	6 a 12°	Menos de 6°	Peso ponderado (Σxj/n)
24 a 50°	1	1	2	3	4	2.20
18 a 24°	1.00	1	1	2	3	1.60
12 a 18°	0.50	1.00	1	1	2	1.10
6 a 12°	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
Menos de 6°	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Disección vertical	133 a 331 m	99 a 133 m	66 a 99 m	33 a 66 m	0 a 33 m	Peso ponderado (Σxj/n)
133 a 331 m	1	1	2	3	4	2.20
99 a 133 m	1.00	1	1	2	3	1.60
66 a 99 m	0.50	1.00	1	1	2	1.10
33 a 66 m	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
0 a 33 m	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Cercanía a ríos y escorrentías	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	Peso ponderado (Σxj/n)
10 m	1	1	2	3	4	2.20
20 m	1.00	1	1	2	3	1.60
30 m	0.50	1.00	1	1	2	1.10
40 m	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
50 m	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Unidades geológicas (Parte 1)	Secuencia de tobas, gravas, arenas y arcillas con abundantes materiales piroclásticos	Riolita / toba riolítica	Toba riolítica / Toba dacítica	Calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas
Secuencia de tobas, gravas, arenas y arcillas con abundantes materiales piroclásticos	1	2	2	2
Riolita / toba riolítica	1	1	2	2
Toba riolítica / Toba dacítica	1	1	1	2
Calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas	1	1	0.50	1
Rocas volcánicas Mioceno Inferior	0.33	0.33	0.33	0
Andesitas y basaltos del Mioceno Tardío	0.33	0.33	0.33	0
Unidad volcánica de composición intermedia a básica	0.25	0.25	0.25	0.25
Secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas	0.20	0.20	0.20	0.20

Unidades geológicas (Parte 2)	Rocas volcánicas Mioceno Inferior	Andesitas y basaltos del Mioceno Tardío	Unidad volcánica de composición intermedia a básica	Secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas	Peso ponderado (Σxj/n)
Secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas	3	3	4	5	2.20
Unidad volcánica de composición intermedia a básica	3	3	4	5	2.05
Andesitas y basaltos del Mioceno Tardío	3	3	4	5	1.90
Rocas volcánicas Mioceno Inferior	3	3	4	5	1.75
Calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas	1	2	3	4	1.13
Toba riolítica / Toba dacítica	1	1	2	3	0.78
Riolita / toba riolítica	0.33	1	1	2	0.48
Secuencia de tobas, gravas, arenas y arcillas con abundantes materiales piroclásticos	0.25	0	1	1	0.29

Fallas y fracturas geológicas	0 a 4 m	4 a 8 m	8 a 12 m	12 a 16 m	16 a 20 m	Peso ponderado (Σxj/n)
0 a 4 m	1	1	2	3	4	2.20
4 a 8 m	1.00	1	1	2	3	1.60
8 a 12 m	0.50	1.00	1	1	2	1.10
12 a 16 m	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
16 a 20 m	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Erosividad de lluvias (IFM)	136 - 146	127 - 136	118 - 127	109 - 118	100 - 109	Peso ponderado (Σxj/n)
136 - 146	1	1	2	3	4	2.20
127 - 136	1.00	1	1	2	3	1.60
118 - 127	0.50	1.00	1	1	2	1.10
109 - 118	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
100 - 109	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Índice de concentración de la precipitación (ICP)	23 - 24.36	22.37- 22.9	21.85 -22.36	21.29 -21.84	20.74 - 21.28	Peso ponderado (Σxj/n)
23 - 24.36	1	1	2	3	4	2.20
22.37- 22.9	1.00	1	1	2	3	1.60
21.85 -22.36	0.50	1.00	1	1	2	1.10
21.29 -21.84	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
20.74 - 21.28	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Anexo I (continuación) - Pesos ponderados a partir de matrices de jerarquización analítica.

Appendix I (continued) - Weighted weights from analytical jerarchic matrices.

Uso de suelo y vegetación	Suelo desnudo	Asentamiento humano	Campo de cultivo agrícola	Vegetación secundaria selva baja caducifolia	Pastizal inducido	Matorral Crasicaule	Peso ponderado (Σxj/n)
Suelo desnudo	1	1	1	2	2	2	2.25
Asentamiento humano	1	1	1	2	2	2	2.25
Campo de cultivo agrícola	1	1	1	1	1	2	1.75
Vegetación secundaria selva baja caducifolia	1	1	1.00	1	1	2	1.50
Pastizal inducido	0.50	0.50	1.00	1	1	2	1.50
Matorral Crasicaule	0.50	0.50	0.50	1	1	1	0.88

Caminos y vialidades	0 - 10 m	10 - 20 m	20 - 30 m	30 - 40 m	40 - 50 m	Peso ponderado (Σxj/n)
0 - 10 m	1	1	2	3	4	2.20
10 - 20 m	1.00	1	1	2	3	1.60
20 - 30 m	0.50	1.00	1	1	2	1.10
30 - 40 m	0.33	0.50	1.00	1	2	0.97
40 - 50 m	0.25	0.33	0.50	0.50	1	0.52

Anexo II - Pesos ponderados y relativos para la evaluación de inestabilidad del terreno.

Appendix II - Weighted and relative weights for evaluating terrain instability.

Factores condicionantes						
Grupo	Factor	Clases	Intensidad	Peso ponderado	Peso relativo (%)	Peso relativo de grupo (%)
Topográficos	Pendiente	<6°	Muy baja	0.52	0.79	29.29
		6° a 12°	Baja	0.97	1.48	
		12° a 18°	Moderada	1.1	1.68	
		18° a 24°	Alta	1.6	2.44	
		24° a 50°	Muy alta	2.2	3.36	
	Disección vertical	0 a 33 m	Muy baja	0.52	0.79	
		33 a 66 m	Baja	0.97	1.48	
		66 a 99 m	Moderada	1.1	1.68	
		99 a 133 m	Alta	1.6	2.44	
		133 a 331 m	Muy alta	2.2	3.36	
	Cercanía a ríos y escorrentías	40 - 50 m	Muy baja	0.52	0.79	
		30 - 40 m	Baja	0.97	1.48	
20 - 30 m		Moderada	1.1	1.68		
10 - 20 m		Alta	1.6	2.44		
0 - 10 m		Muy alta	2.2	3.36		
Geológicos	Unidades geológicas	Secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas	Baja	0.49	0.44	25.94
		Unidad volcánica de composición intermedia a básica	Moderada	0.79	0.73	
		Andesitas y basaltos del Mioceno Tardío	Moderada	1.18	1.19	
		Rocas volcánicas Mioceno Inferior	Moderada	1.41	1.73	
		Calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas	Alta	2.34	2.67	
		Toba riolítica / Toba dacítica	Alta	2.57	2.90	
		Riolita / toba riolítica	Alta	2.8	3.13	
	Secuencia de tobas, gravas, arenas y arcillas con abundantes materiales piroclásticos	Muy alta	3.03	3.36		
	Fallas y fracturas geológicas	16 a 20 m	Muy baja	0.52	0.79	
		12 a 16 m	Baja	0.97	1.48	
8 a 12 m		Moderada	1.1	1.68		
		4 a 8 m	Alta	1.6	2.44	
		0 a 4 m	Muy alta	2.2	3.36	
Factores desencadenantes						
Grupo	Factor	Clases	Intensidad	Peso ponderado	Peso relativo (%)	Peso relativo de grupo (%)
Hidrometeorológicos	Erosividad de lluvias (IFM)	100 - 109	Muy baja	0.52	0.79	19.53
		109 - 118	Baja	0.97	1.48	
		118 - 127	Moderada	1.1	1.68	
		127 - 136	Alta	1.6	2.44	
		136 - 146	Muy alta	2.2	3.36	
	Índice de concentración de la precipitación (ICP)	20.74 - 21.28	Muy baja	0.52	0.79	
		21.29 - 21.84	Baja	0.97	1.48	
		21.85 - 22.36	Moderada	1.1	1.68	
		22.37 - 22.9	Alta	1.6	2.44	
		23 - 24.36	Muy alta	2.2	3.36	
Factores condicionantes						
Grupo	Factor	Clases	Intensidad	Peso ponderado	Peso relativo (%)	Peso relativo de grupo (%)
Antrópicos	Uso de suelo y vegetación	Matorral crasicaule	Baja	0.79	1.33	25.24
		Pastizal inducido	Baja	1.41	2.29	
		Vegetación secundaria selva baja caducifolia	Baja	1.41	2.29	
		Agricultura	Moderada	1.5	2.67	
		Asentamientos humanos	Alta	3.25	3.43	
	Camino y vialidades	Suelo desnudo	Muy alta	3.25	3.43	
		0 - 10 m	Muy baja	0.52	0.79	
		10 - 20 m	Baja	0.97	1.48	
		20 - 30 m	Moderada	1.1	1.68	
		30 - 40 m	Alta	1.6	2.44	
		40 - 50 m	Muy alta	2.2	3.36	
Sumatoria				66	100	100