

Mapas geológico, morfoestructural y de tipología volcánica de la región de Morelia[☆]

Geological, morphoestructural and volcanic tipology maps of the Morelia region

Miranda Robles Pereznegrón^a, Pedro Corona-Chávez^b

^aEscuela Nacional de Estudios Superiores, Campus Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, 58190, México

^bInstituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, 58004, México

Resumen

Se presentan los mapas geológico, morfoestructural y de tipología volcánica de la región de Morelia (2,858 km²) escala 1:60,000. Todas las unidades litoestratigráficas y volcánicas previamente definidas han sido revisadas y nuevamente mapeadas a partir de una extensa revisión bibliográfica, modelos digitales de elevación LiDAR, ortofotos escala 1:50,000, imágenes Spot 6, así como la verificación en campo de los contactos, distribución espacial y relaciones estratigráficas. Se identificaron y clasificaron 216 tipologías volcánicas, las cuales fueron proyectadas en el mapa morfoestructural que contiene a su vez 18 dominios que ponen en evidencia la importancia de los procesos tectónicos asociados con el vulcanismo. Se agrupan 20 unidades geológicas en seis grandes etapas geológicas y un hiatus magmático, desde el Oligoceno al Holoceno (30 Ma – 3.2 ka). Con base en la cartografía geológica, se plantea su importancia para el manejo sustentable de las Áreas Naturales Protegidas y de las problemáticas geológico-ambientales de la región de Morelia. Se concluye que la cartografía geológica y morfoestructural representa una potente herramienta para delinear a futuro estrategias de geoconservación como una alternativa para el manejo del territorio de la región de Morelia.

Palabras clave: geología de Morelia, dominios morfoestructurales, tipología volcánica, geoconservación, peligro geológico, Áreas Naturales Protegidas

Abstract

The 1:60,000 scale geological, morphostructural and volcanic typology mapping of the Morelia region (2,858 km²) is presented. All units previously defined have been revised and remapped based on an extensive literature review, LiDAR digital elevation models, 1:50,000 scale orthophotos, Spot 6 images and fieldwork. A total of 216 volcanic typologies were identified and projected on the morphostructural map containing 18 domains, which highlight the relevance of tectonic processes associated with volcanism. Twenty geological units were defined and successively grouped into six major geological events and one magmatic hiatus from the Oligocene to the Holocene (30 Ma – 3.2 ka), configuring the Morelia's region volcanic landscape. The importance of geological cartography for the sustainable management of Natural Protected Areas and geological environmental problems is highlighted. It is concluded that geological and morphostructural maps represent a powerful tool to outline plausible geoconservation strategies as an alternative for the land management of the Morelia region.

Keywords: geology of Morelia, morphostructural domains, volcanic typology, geoconservation, geological hazard, Protected Natural Areas

[☆]© M. Robles Pereznegrón, P. Corona Chávez. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), which permits non-commercial sharing of the work and adaptations, provided the original work is properly cited and the new creations are licensed under identical terms.

*E-mail address: mirandaroblespereznegron@gmail.com

1. Introducción

La región de Morelia (RM) consta de un área de 2,858 km² y se ubica entre las coordenadas de 19°25' y 19°55' de latitud norte y 101°0' y 101°35' de longitud oeste (Figura 1), cubriendo uno de los municipios más amplios e importantes del estado de Michoacán. Desde el punto de vista geológico, se localiza en la porción central de la Faja Volcánica Transmexicana (Ferrari *et al.*, 2012) y en el Campo Volcánico Michoacán Guana-

juato (CVMG; Hasenaka y Carmichael, 1985). Al oriente está delimitada por la sucesión volcánica Mil Cumbres (Oligoceno-Mioceno inferior; Pasquarè *et al.*, 1991; Garduño-Monroy *et al.*, 1999; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015).

La importancia geológica y valor ambiental de la RM se debe por un lado, al hecho de que presenta una vasta geodiversidad relacionada con el registro de diferentes estructuras y morfología volcánica (Hasenaka y Carmichael, 1985; Garduño-Monroy *et al.*, 1999), asociadas con la evolución vulcanotectónica de una serie de secuencias lacustres desde hace 8 Ma (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Por otro lado, la RM incluye 16 Áreas Naturales Protegidas de administración estatal y federal, así como la Ciudad de Morelia, corazón del área y patrimonio de la humanidad por la UNESCO (2024). En contraste, desde el inicio de este siglo, en la RM han sido bien documentadas diversas problemáticas geológico-ambientales relacionadas con el crecimiento urbano y su desconexión con las aptitudes inherentes a las características geológicas y geomorfológicas del territorio (Garduño-Monroy *et al.*, 2001; Garduño-Monroy, 2004; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006). Las problemáticas se refieren a inundaciones (Arreygue *et al.*, 2005), sobreexplotación y contaminación de acuíferos (Buenrostro e Israde-Alcántara, 2003), procesos de subsidencia diferencial o *creep*-falla (Subsidence-Creep-Fault Processes ó SCFP; Ávila-Olivera, 2008; Hernández-Madriral *et al.*, 2011), procesos de remoción en masa (Arreygue-Rocha *et al.*, 2002; Hernández-Madriral *et al.*, 2004) y sus consecuentes daños a infraestructura pública y privada. Sin embargo, los instrumentos de planeación urbana se han orientado más a la consolidación de estrategias formales e informales del mercado inmobiliario, no así a una atención a fondo de las problemáticas, basada en sus características geológicas y naturales (Vargas-Urbe, 2014; IMPLAN, 2020).

La RM cuenta con numerosos estudios geológicos realizados desde el siglo pasado (Hasenaka y Carmichael, 1985; Pasquarè *et al.*, 1991; Garduño-Monroy *et al.*, 1999; Garduño-Monroy, 2004 y referencias in). Desde el punto de vista cartográfico destacan los mapas publicados por Pasquarè *et al.* (1991), escala 1:300,000 y Garduño-Monroy *et al.* (1999), escala 1:250,000. En la última década se han publicado diversos trabajos de tesis y algunos artículos que se han derivado de los mismos (Cardona-Melchor, 2015; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015; Kshirsagar *et al.*, 2015; Cisneros-Máximo, 2016; Pérez-Orozco *et al.*, 2018; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018; Ramírez-Urbe *et al.*, 2019; Avellán *et al.*, 2020 y 2024; Hernández-Bernal *et al.*, 2021; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2021; Trujillo Hernández *et al.*, 2022). Estos trabajos han aportado nuevos datos geoquímicos y geocronológicos, proponiendo modelos petrológicos y estructurales. Desafortunadamente la cartografía geológica que se presenta en la mayoría de estos trabajos se encuentra comúnmente bajo forma de una imagen-figura dentro del texto, por lo cual a menudo las unidades muestran un trazo cartográfico relativamente impreciso, que puede generar confusión en las relaciones estratigráficas y sus contactos. En suma, hasta el momento se adolece de un mapa geológico regional

actualizado de la RM que permita comprender la distribución, relaciones estratigráficas y estructurales de sus unidades.

En este trabajo, se presenta el mapa geológico de la región de Morelia escala 1:60,000. Para la delimitación del área se ha centrado el amplio Municipio de Morelia dentro de un polígono que permitiera identificar las diferentes unidades litoestratigráficas que han configurado el paisaje. Para su realización se cumplieron tres etapas metodológicas: i) la compilación y revisión de una vasta bibliografía que permitiera ponderar la calidad de las descripciones y el trazo cartográfico de las unidades geológicas, ii) el análisis morfoestructural y la identificación y clasificación morfológica de los edificios volcánicos y, iii) el mapeo de las unidades basándonos en criterios morfoestructurales, el detalle de las imágenes y modelos digitales de elevación, así como la verificación de afloramientos y contactos en campo. Considerando lo anterior, se plantea la importancia de la cartografía geológica, morfoestructural y de la tipología volcánica, para el manejo sustentable de las Áreas Naturales Protegidas y de las problemáticas geológico-ambientales, concluyendo que las estrategias de geoconservación son una alternativa para el manejo del territorio en la región de Morelia.

2. Marco geológico y tectónico

La RM se ubica en la porción central de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), que constituye un arco volcánico formado por la subducción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera, por debajo de la placa de Norteamérica en el sur de México (Ferrari *et al.*, 2005; 2012; Figura 1). El basamento relativo de la RM lo constituye una sucesión de rocas volcánicas de composición intermedia a félsica que aflora principalmente en el sector oriental y septentrional. Esta sucesión volcánica inicialmente fue descrita como la Formación Tafetán (Pasquarè *et al.*, 1991), con edades prevalentes del Mioceno inferior (Pasquarè *et al.*, 1991; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Sin embargo, también se han reportado edades del Oligoceno (Pasquarè *et al.*, 1991). Lo anterior es plausible considerando su correlación regional con otras secuencias andesíticas y dacíticas, en la región de Angangueo y la Sierra de Malinalco (Hernández-Bernal *et al.*, 2016 y 2021), donde también han sido reportadas edades del Oligoceno.

Sin embargo, el paisaje predominante de la RM ha sido configurado esencialmente por la actividad volcánica reciente, caracterizada por la renovación constructiva del relieve, relacionado con el emplazamiento de edificios volcánicos de pequeño volumen (conos de escoria y escudos pequeños), del Plioceno tardío al Reciente, del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985; Kshirsagar *et al.*, 2015; Cardona-Melchor, 2015; Pérez-Orozco *et al.*, 2018; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018; Ramírez-Urbe *et al.*, 2019; Avellán *et al.*, 2020 y 2024). Este vulcanismo está asociado con la evolución de sistemas tectónicos de fallamiento NE-SO, E-O y NNO (Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Pasquarè *et al.*, 1991; Garduño-Monroy *et al.*, 1999 y 2009; Suter *et al.*, 2016; Menella *et al.*, 2022), en concomitancia con la

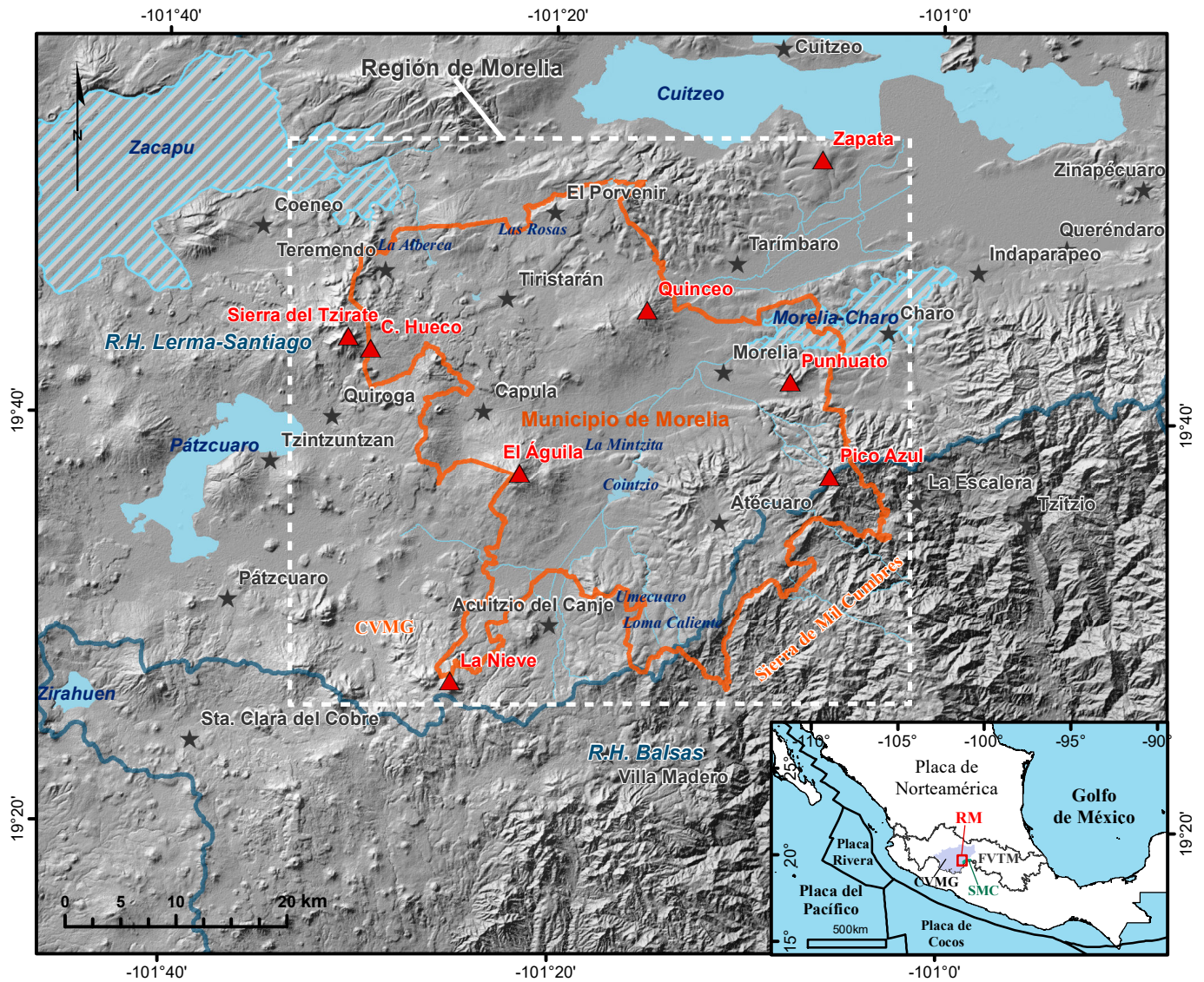


Figura 1: Modelo digital de elevación en donde se muestra la localización geográfica de la región de Morelia (RM). El área de estudio está delimitada con una línea discontinua de color blanco y al centro el polígono que corresponde al municipio de Morelia con línea de color naranja. Se destacan algunas localidades relevantes (estrella) y algunas cimas de volcanes importantes (triángulo rojo) por ser referencia para la cartografía geológica. Se muestra también la delimitación de lagos (azul) y paleolagos (azul achurado), parte importante de la evolución tectónica de la región, como se verá más adelante. Se muestra también la división de las redes hidrográficas Balsas y Lerma-Santiago (línea gruesa color azul). / Figure 1: Digital elevation model showing the geographical location of the Morelia region (RM). The study area is delimited with a white dashed line and in the center the polygon that corresponds to the municipality of Morelia with an orange line. Some relevant localities (star) and some tops of important volcanoes (red triangle) stand out as references for geological cartography. The delimitation of lakes (blue) and paleolakes (dark blue) is also shown, an important part of the tectonic evolution of the region. The division of the Balsas and Lerma-Santiago hydrographic networks is also drawn (thick blue line).

apertura de cuencas fluvio-lacustres, como la antigua Subcuenca Morelia-Charo y de Cuitzeo (Israde-Alcántara, 1995; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999).

3. Problemáticas ambientales de la región de Morelia

La antigua Valladolid, hoy Morelia, fue fundada en 1541 sobre la loma de Guayangareo, en una zona caracterizada por un clima templado, ocurrencia de ríos, abundancia de bosques, amplios espacios de cultivo y disponibilidad de

proteína animal (López-Granados *et al.*, 2001; Vargas-Uribe, 2014). El sitio fundacional corresponde a un conjunto de lomeríos que se elevan con poca pendiente con respecto a los principales ríos que atraviesan e irrigan la ciudad. De acuerdo con López-Granados *et al.* (2001) y Vargas-Uribe (2014), la ciudad de Morelia ha tenido al menos dos etapas de crecimiento: la primera abarca desde su fundación hasta la década de 1960, donde mantenía esencialmente el trazo de una ciudad relativamente ordenada y caracterizada por una delimitación urbana ortogonal. Posteriormente, de la década

de 1980 hasta la fecha, presenta un crecimiento que no refleja un proyecto de ciudad, sino un crecimiento relativamente desordenado y principalmente asociado con la especulación edilicia (Vargas-Urbe, 2014), lo cual ha dado lugar a una desbordante invasión urbana al medio ambiente, caracterizada por la aparición recurrente de fraccionamientos irregulares, sin alguna previsión de uso y consumo de sus servicios urbanos y de las consecuencias ambientales. Tan solo de 1960 a 1990, el cambio de uso de suelo agrícola o forestal a superficie urbana presentó un aumento del 506 % (López-Granados *et al.*, 2001).

El crecimiento desbordado de la Ciudad de Morelia ha impactado el ambiente de toda la RM y a sus propios habitantes. Desde principios de este siglo han sido bien documentadas diversas problemáticas geológico-ambientales: i) las problemáticas por inundaciones (Arreygue-Rocha *et al.*, 2005; Hernández y Vieyra, 2010); ii) los daños a viviendas y edificios localizados en zonas con alta influencia por fallamiento geológico (Garduño-Monroy *et al.*, 1998; Garduño-Monroy *et al.*, 2001; Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Suter, 2016); iii) los procesos de remoción en masa (Arreygue-Rocha *et al.*, 2002; Hernández-Madrigal *et al.*, 2004; Pola-Villaseñor *et al.*, 2006); iv) los procesos de subsidencia diferencial o *creep*-falla (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006; Ávila-Olivera, 2008) y; v) la contaminación de los mantos acuíferos debido a la inadecuada ubicación de tiraderos de basura (Buenrostro e Israde-Alcántara, 2003; Israde-Alcántara *et al.*, 2008).

A pesar de los estudios realizados en las diversas problemáticas, los programas institucionales de desarrollo urbano que se han elaborado desde hace más de cuatro décadas (e.g. IMPLAN, 2020) no han logrado pasar del documento escrito a los hechos, los criterios geológicos han sido poco considerados y desafortunadamente las autoridades respectivas rematan con reglamentos con un exiguo cumplimiento.

3.1. Las Áreas Naturales Protegidas de la región de Morelia

La región de Morelia cuenta con los decretos de 16 Áreas Naturales Protegidas (Mapas geológico y morfoestructural; Tabla 1; CONANP, sf; SECMA, sf). Su reconocimiento comenzó con decretos federales desde los años 1930 y se retomó con decretos estatales a partir de los años 1990 y sucesivamente con otros decretos, en cada década, hasta la fecha. La mayor parte de estas áreas se concentran en el sector sureste de la región de Morelia, sector que históricamente ha dotado de agua por medio de los principales caudales superficiales que drenan hacia la ciudad. De la información consultada destaca que solo 7 áreas cuentan con planes de manejo, así como 4 de ellas corresponden a áreas voluntarias de conservación. Las Áreas Naturales Protegidas de la región de Morelia, con diferentes decretos, con o sin plan de manejo, desafortunadamente tampoco han sido un instrumento que permita detener o regular con mayor efectividad la degradación del medio ambiente de la RM. En general, no solo no muestran un manejo adecuado, también han sido modificadas con fines de expansión urbana, como fue el caso del cambio de área del polígono loma de Santa María y depresiones aledañas, el 31 de diciembre de

2009. Todo esto, a pesar de las recomendaciones en términos ambientales, de riesgo geológico y la continua oposición de asociaciones civiles (Sánchez-Sepúlveda y Urquijo-Torres, 2014; Ávila-García, 2014).

4. Metodología

El diseño conceptual y construcción de los mapas geológico y morfoestructural-tipología volcánica de la RM escala 1:60,000 se llevó a cabo en tres etapas: i) Recopilación bibliográfica, revisión conceptual de las unidades litoestratigráficas previamente descritas y agrupamiento en etapas de evolución geológica; ii) el análisis morfoestructural y clasificación de la tipología volcánica; iii) el mapeo, revisión de campo y construcción de secciones geológicas transversales.

El listado bibliográfico completo de los trabajos geológicos consultados sobre la RM puede revisarse en el Material suplementario 1. Este listado representa una selección de 204 publicaciones relevantes, las cuales fueron subdivididas en 15 temas: por tema de estudio, por región geológica o tectónica, por su contribución cartográfica, por su problemática ambiental y ordenamiento territorial (Tabla 2). Para el objetivo específico de este trabajo, se identificaron 30 trabajos que presentaron algún tipo de mapa geológico. Desafortunadamente, muchos de ellos son repetitivos en publicaciones de diferentes años y revistas por los mismos autores. Se destacan los trabajos fundamentales de Pasquarè *et al.*, 1991 y Garduño *et al.*, 1999. A pesar de que los trabajos más recientes presentan su propio mapa geológico, a menudo se presentan bajo forma de figura en media página, con muy baja resolución y algunas veces sin algún tipo de rigor cartográfico, ya sea en su leyenda, simbología, referencia geográfica o metadata. El mapa índice de cobertura de cada trabajo cartográfico puede ser observado en los mapas geológico y morfoestructural. Por otra parte, se presenta la compilación de 97 edades isotópicas (Material suplementario 2), con su referencia bibliográfica y coordenadas, las cuales han sido proyectadas en los mapas geológico y morfoestructural. Es oportuno mencionar que en este trabajo no se presentan datos de tesis que no hayan sido publicados bajo forma de artículos.

El análisis espacial, el mapa morfoestructural, la identificación y clasificación tipológica de los centros eruptivos de la RM, se llevó a cabo mediante el uso combinado de modelos digitales de elevación LiDAR con resolución de 5 m, ALOS PALSAR de 12.5 m, imágenes satelitales SPOT 6 con resolución de 1.5 m pancromática y de 6 m multiespectral, así como utilizando la cartografía topográfica digital e hidrográfica de INEGI escala 1:50,000. La clasificación tipológica de los diferentes centros eruptivos se basa en la clasificación de morfología volcánica usada por Kereszturi y Németh (2012), complementada por otros autores (Bishop, 2009; Grosse *et al.*, 2012; 2014; Valentin y Connor, 2015). Es oportuno mencionar que las geoformas volcánicas reconocidas previamente como derrame fisural o derrame de lava sin cono (e.g. Hasenaka y Carmichael, 1985; Hasenaka, 1994), se han clasificado como

Tabla 1: Nombre oficial de áreas protegidas en la región de Morelia y claves usadas en etiquetas de los mapas morfoestructural y geológico. Respecto a los programas de manejo de las áreas voluntarias de conservación, estas son manejadas por sus legítimos propietarios. Los programas de manejo de las áreas La Huerta, La Mintzita, Cañadas del Río Chiquito y Ciudad Industrial se encuentran publicados en el Diario Oficial del estado de Michoacán. Existe un programa de manejo para el área Cerro Punhuato, publicado por la extinta Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente (SUMA, 2008) y un programa de restauración para Loma de Santa María y depresiones aledañas, por parte de la misma secretaría (SUMA, 2012). / Table 1: Natural protected areas in the Morelia region. Note the label keys used in morphostructural and geological maps. Management of voluntary conservation areas are concerned those followed by their owners. There is a management program for the Cerro Punhuato area, published by the Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente (SUMA, 2008) and a restoration program for Loma de Santa María y depresiones aledañas, by the same source (SUMA, 2012).

	Nombre	Tipo	Decreto/ Cambio	Plan de manejo	Clave
16	La Nieve	Área voluntaria de conservación	2023	n/a	ANP LN
15	Cerro del Águila	Reserva de captación y recarga de mantos acuíferos	11-05-2023	No	ANP CA
14	Cerro Quinceo	Reserva de captación y recarga de mantos acuíferos	31-03-2023	No	ANP CQ
13	El Tocuz	Área Voluntaria de conservación	08-10-2018	n/a	ANP TZ
12	Arcos de la cascada	Área Voluntaria de Conservación	07-01-2015	n/a	ANP AC
11	Tsintsani	Área voluntaria de conservación	11-03-2013	n/a	ANP TS
10	Cañadas del Río Chiquito	Zona de restauración y protección ambiental	29-04-2011	Si	ANP RCh
9	Pico Azul-La Escalera	Zona de protección ambiental	13-09-2011	No	ANP PA
8	Loma de Santa María y depresiones aledañas	Zona de restauración y protección ambiental	31-12-2009	Si	ANP LSM
7	Parque Francisco Zarco	Parque urbano ecológico	15-02-2008	No	ANP FZ
6	Manantial La Mintzita	Zona sujeta a preservación ecológica	31-01-2005	Si	ANP LM
5	Ex escuela agrícola La Huerta (Piedra del Indio)	Zona sujeta a preservación ecológica	31-01-2005	Si	ANP LH
4	Cerro Punhuato	Parque urbano ecológico	26-01-2005	Si	ANP PH
3	Instituto Tecnológico Agropecuario No. 7	Parque Urbano ecológico	04-06-1998	No	ANP IT
2	Fideicomiso de la ciudad industrial de Morelia	Parque Urbano ecológico	10-07-1995	Si	ANP CI
1	Insurgente José María Morelos	Parque Nacional	22-02-1939	No	ANP IM

spatter (Head y Wilson, 1989; Summer *et al.*, 2005), donde se asume la definición de *spatter*: como una acumulación de material piroclástico fluido mezclado con lava, el cual generalmente se puede aglutinar cuando se emplaza. La variación progresiva y el arresto de este proceso de emplazamiento da como resultante un depósito aglutinado o una pila de *spatter* (salpicadura), en la cual los clastos son parcialmente retenidos o rotados, las cuales pueden presentarse en erupciones basálticas tipo hawaiano o estromboliano (Jones *et al.*, 2018). Para su identificación, se simplifica considerando tipológicamente a un *spatter* como un centro eruptivo de pequeño volumen, con diámetro basal menor a 200 m, altura menor a 100 m y con pendiente incluso mayor a 33°, con morfologías volcánicas aglutinadas o lávicas muy variables (e.g. *spatter cone*, *rootless flow*, *lava ponds*, *lava flows*, *spatter rampants*). La localización de los centros eruptivos clasificados de la RM se presenta en el Material suplementario 3.

En este trabajo se considera un dominio morfoestructural como una unidad de relieve o morfogenética que puede ser delimitada y definida por poseer características geomorfológicas relativamente distintivas, dentro de un espacio continuo, y están relacionadas con procesos geológicos y su relativa temporalidad. La delimitación de los dominios morfoestructurales se realiza mediante el análisis de las características geomorfológicas cualitativas y cuantitativas que son el resultado de los agentes de la morfogénesis o procesos geológicos endógenos y exógenos; constructivos y destructivos; primarios y secundarios. La metodología descriptiva y definición de los dominios morfoestructurales se presentan en el Material suplementario 4.

La última etapa corresponde a la construcción del mapa geológico de la RM escala 1:60,000. Las principales unidades litoestratigráficas fueron definidas a partir de los mapas preliminares (Pasquarè *et al.*, 1991; Garduño-Monroy *et al.*,

Tabla 2: Síntesis de los temas y número de publicaciones seleccionados y consultados para la revisión bibliográfica conceptual y cartográfica del mapa geológico de la RM / Table 2. Synthesis of the topics and number of publications selected and consulted for the conceptual and cartographic bibliographic review of the geological map of the RM.

Tema	No publicaciones
Sierra de Mil Cumbres	4
Secuencias fluvio-lacustres de la región de Morelia-Charo	10
Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato	33
Sistema de fallas Morelia-Acambay	20
Cartografía geológica de la región de Morelia	28
Cantera de Morelia	8
Cambios de cobertura en la cuenca de Cuitzeo	10
Crecimiento urbano y manejo del territorio	9
Estudios geológicos con enfoque en geotermia	10
Estudios integrales de la cuenca de Cuitzeo	3
Fallas geológicas de la Ciudad de Morelia y riesgo sísmico	34
Riesgos hidrológicos	8
Problemática geológico-ambiental de la ubicación de los tiraderos de basura	9
Procesos de remoción en masa	10
Sobreexplotación de acuíferos y subsidencia diferencial	8

1999). A partir de la bibliografía se revisaron las descripciones previas de las unidades litológicas, así como la contextualización petrológica y geocronológica con la finalidad de presentar una síntesis conceptual regional. Considerando que en la RM predomina el vulcanismo monogenético, se agruparon los diferentes centros eruptivos o volcanes en 18 grupos volcánicos que coexisten con dos unidades litoestratigráficas sedimentarias y vulcano sedimentarias (Material suplementario 5). Las unidades geológicas han sido ordenadas en forma cronológica en seis etapas geológicas y un hiatus magmático. Cada unidad volcánica o centro eruptivo, unidad litológica sedimentaria, así como las estructuras tectónicas de deformación discontinua han sido mapeadas en forma digital respetando el principio de área mínima cartografiable para la escala 1:50,000 (Marquina y Mogollón, 2018) y, basándonos en criterios morfoestructurales, los cuales fueron asistidos por la resolución y el detalle de las imágenes y modelos digitales de elevación. A partir del mapa geológico preliminar se realizó la verificación en campo de contactos, estructuras tectónicas y relaciones estratigráficas, para dar lugar a la versión final del mapa geológico de la región de Morelia. A partir de la versión final del mapa geológico se trazaron dos secciones geológicas regionales y una relativamente local con la finalidad de ilustrar las relaciones estratigráficas y tectónicas. Estas secciones se incorporan en la discusión de los resultados, así como en la edición final del mapa geológico de la RM.

5. Resultados

5.1. Morfología volcánica de la región de Morelia

En la Tabla 3 se presentan el conteo y clasificación de la tipología volcánica de la RM, comparados con aquellos identificados en el emblemático conteo realizado para todo el

CVMG por Hasenaka y Carmichael (1985). En nuestro estudio han sido identificados más edificios volcánicos (~63 %) que los identificados por estos autores. Esta diferencia se debe en parte a que estos autores no reportan el conteo de los edificios en escudo pequeño, pero sobre todo, al uso de las imágenes y modelos digitales de elevación con alta resolución con que se cuenta, después de más de cuarenta años.

La clasificación tipológica ha sido incorporada en el mapa morfoestructural. En total han sido identificados 216 centros eruptivos con las tipologías de: cono cinerítico o de escoria (72), *spatter* (28), *maar* (1), domo de lava (61), domo erosionado (40), escudo pequeño (11), y caldera (3). Se destaca que en el sector oriental se identificaron 40 domos fuertemente erosionados y 3 estructuras semi-circulares relacionadas con calderas de colapso volcánico, las cuales están asociadas al vulcanismo más antiguo en la región (Oligoceno-Mioceno inferior) y, por lo tanto, se exponen deformadas con un fallamiento y fracturamiento variables. En Puerto La Sosa se ha identificado una estructura circular no reportada previamente, la cual presenta las mismas características de otras estructuras de caldera previamente descritas (Pasquarè *et al.*, 1991; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Las geoformas de cono cinerítico o de escoria, *spatter*, *maar*, domo de lava y escudo pequeño se distribuyen principalmente en el sector occidental y de manera limitada al noreste. Los centros eruptivos muestran una evidente tendencia de distribución espacial bajo forma de lineamientos volcánicos asociada con estructuras tectónicas de primer orden con direcciones prevalentes NE-SO y NO-SE, (e. g. El-Águila-Quinceo y la Sierra del Tzirate respectivamente).

Tabla 3: Clasificación de la morfología volcánica de la región de Morelia. La tipología de flujos de lava sin cono asociado aquí es clasificada como volcán tipo *spatter* (Kereszturi y Németh, 2012). Se compara con el conteo de la base de datos de Hasenaka y Carmichael (1985). Notar que en este trabajo la tipología de cono cinerítico integra a las clasificaciones usadas por Hasenaka y Carmichael (1985) de cono cinerítico, cono brechado, cono erosionado y cono redondeado. / Table 3: Classification of the volcanic morphology of the Morelia region. The typology of lava flows without an associated cone was classified as a spatter-type volcano (Kereszturi and Németh, 2012). It is compared with the volcanic count database from Hasenaka and Carmichael (1985). Note that in this work the typologies: cineritic, brecciated, eroded and rounded cones from Hasenaka and Carmichael (1985) were incorporated as a single cineritic cone typology.

Tipología	Hasenaka y Carmichael (1985)	Este trabajo
Cono cinerítico	53	69
Domo	2	59
<i>maar</i>	1	1
<i>spatter</i>	6	24
Escudo	-	10
Total =	62	163

5.2. Dominios morfoestructurales (paisaje) de la región de Morelia

En el mapa morfoestructural se presenta la distribución de 18 dominios morfoestructurales asociados con la localización puntual de la tipología volcánica. La descripción detallada de los dominios morfoestructurales se presenta en el Material suplementario 4, mientras que en la Tabla 4 se presenta una síntesis de sus parámetros físicos (altitud, área, orientación, cimas), localización por municipio, tipología volcánica, patrón de drenaje, edad relativa, así como las geofomas distintivas de geodiversidad.

A partir de una observación inmediata del mapa de dominios morfoestructurales, se observa una estrecha relación del paisaje con la distribución de los sistemas tectónicos, en particular el sistema orientado NE-SO, el cual está asociado con los procesos de renovación del paisaje en la región occidental, donde predominan edificios volcánicos de pequeño volumen o monogenético del Pleistoceno-Holoceno que contrasta con los dominios con geofomas erosionadas y antiguas en el sector oriental, de la Sierra de Mil Cumbres.

Por su parte, el sector central, donde se localiza la capital michoacana, se asocia con una relativa depresión morfológica, asociada con un bajo estructural del sistema tectónico extensional Morelia-Acambay (Garduño-Monroy *et al.*, 1999 y 2009; Suter *et al.*, 2016). La elocuencia de los dominios de paisaje de Morelia con una orientación regional NE-SO representan per se una propuesta de geodiversidad y de patrimonio intangible de la RM.

5.3. Cartografía y etapas geológicas de la región de Morelia

La distribución espacial y estratigráfica de 18 grupos volcánicos y 2 unidades litoestratigráficas con edades que varían

desde el Oligoceno-Mioceno al Holoceno, así como las estructuras tectónicas se presentan en el mapa geológico de la región de Morelia. Por motivos de espacio, la descripción extendida de cada grupo y unidad geológica, con sus respectivas referencias bibliográficas, se presenta en el Material suplementario 5; mientras que en la Tabla 5 se presenta una síntesis conceptual en seis etapas de evolución geológica y un hiatus magmático. En esta tabla se incluyen las referencias bibliográficas más relevantes para cada unidad, su época geológica, su edad isotópica, así como su correspondencia con la tipología volcánica descrita en este trabajo.

5.4. Etapas y cronología de los eventos vulcanotectónicos de la región de Morelia

Considerando que la RM es una región con una historia geológica configurada eminentemente por procesos volcánicos y tectónicos de deformación frágil, en la Figura 2 se presenta un esquema de evolución de cada etapa geológica, en donde se destaca la variación espacial y temporal de los grupos y las unidades litoestratigráficas del mapa geológico, relacionadas en una columna lateral con su morfología volcánica.

5.4.1. Etapa I. Vulcanismo andesítico-dacítico (Oligoceno - Mioceno temprano)

La etapa geológica I de la RM se caracteriza por el predominio de la actividad volcánica andesítico-dacítica (Oligoceno-Mioceno temprano). Incluye tres unidades litoestratigráficas: 1. Sucesión Tafetán-Mil Cumbres; 2. Sistemas caldéricos y secuencias ignimbríticas Morelia-Cuitzeo y 3. Domos post-caldéricos Atécuaro-Punhuato. Representa la actividad volcánica más antigua de la RM y se expone en el sector este, sureste y noreste, región conocida como el sector oriental de la Sierra de Mil Cumbres, cubriendo al menos un 40 % del área total de la región. Está conformada fundamentalmente por flujos lávicos de composición andesítica-dacítica, asociados y estratificados con sucesiones volcánicas de tipo epiclástico. Las edades de las andesitas basales de estas secuencias esencialmente corresponden al Mioceno temprano (~20-22 Ma; Pasquarè *et al.*, 1991; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015), pero muy probablemente se extienda al Oligoceno (Pasquarè *et al.*, 1991; Hernández-Bernal *et al.*, 2016; 2021).

La Sucesión volcánica andesítico-dacítica se encuentra sobre yacida por una sucesión de rocas ignimbríticas del Mioceno temprano con edades de alrededor de ~16 Ma (e.g. Piedra Cantera de Morelia, Atécuaro y Cuitzeo), las cuales están asociadas con la erupción de al menos 4 sistemas volcánicos de calderas de colapso y muy probablemente a un sistema extensional, seguido por la emisión de domos post-caldéricos (e.g. volcán Punhuato) de composición dacítica y andesítica (Pasquarè *et al.*, 1991; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015; Trujillo-Hernández *et al.*, 2022). La actividad volcánica explosiva de las ignimbríticas producidas por el colapso de calderas representa uno de los rasgos más distintivos de la ciudad de Morelia, por el uso edilicio de la piedra rosa de cantera (Bigioggero *et al.*, 2004).

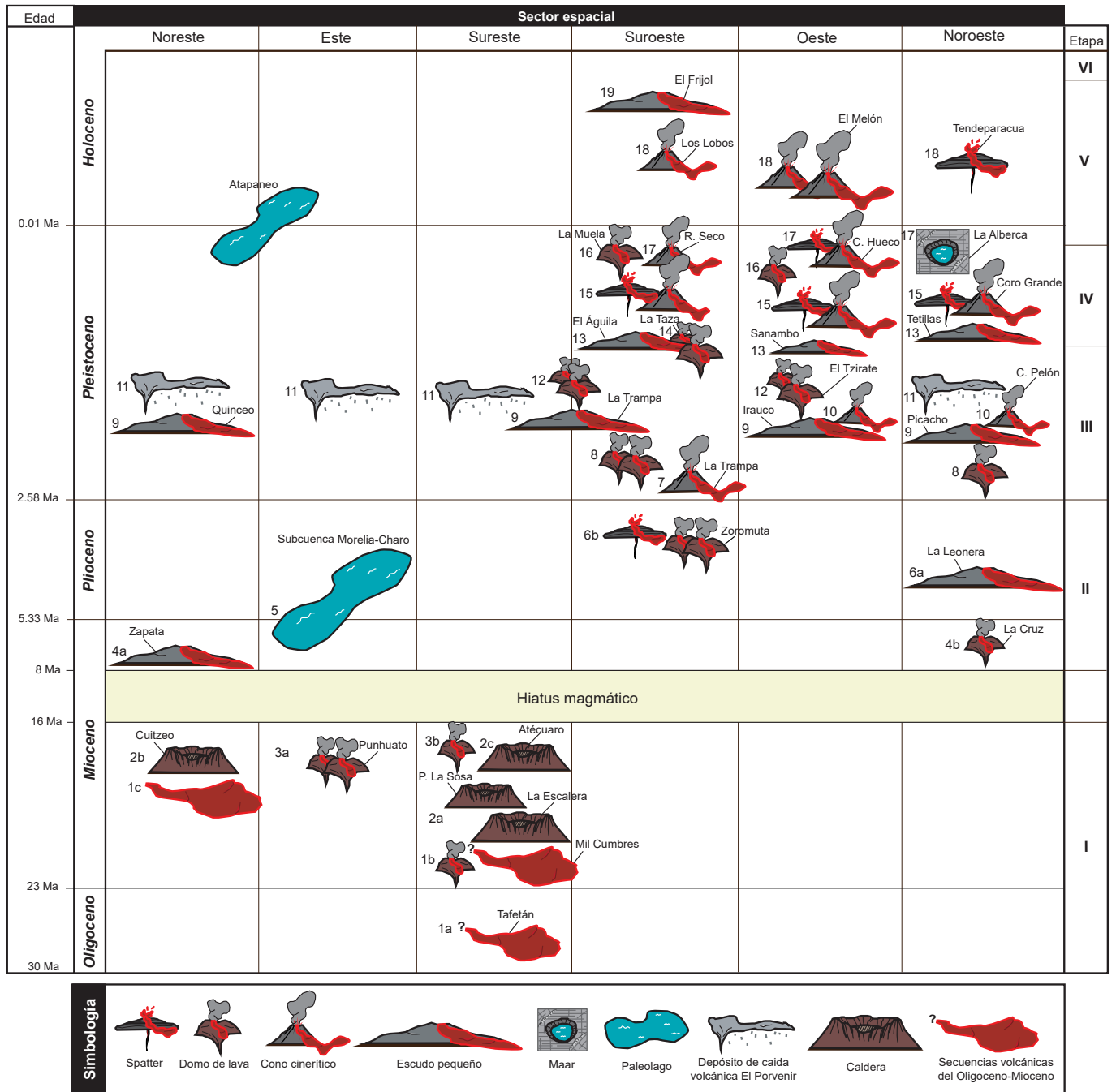


Figura 2: Modelo de evolución espacial y temporal de eventos vulcano-tectónicos de la región de Morelia. Consultar en el material suplementario, así como en el texto la descripción y distribución detallada de los eventos geológicos. Notar que se agrega como referencia el nombre de al menos un edificio volcánico representativo para cada unidad volcánica y su correspondiente clave. / Figure 2: Model of spatial and temporal evolution of vulcano-tectonic events in the Morelia region. For the detailed description see the supplementary material. It is worth to note the name of representative volcanic buildings for each volcanic unit.

Tabla 4. Síntesis descriptiva de los dominios morfoestructurales de la región de Morelia. Claves: CC cono cinerítico; SP *spatter*; MR *maar*; DM domo; ED escudo; C caldera; DE domo erosionado; PRM deslizamientos de masa. / Table 4. Descriptive synthesis of the morphostructural domains of the Morelia region. Keys: CC cineritic cone; SP *spatter*; MR *maar*; DM dome; ED shield; C caldera; eroded dome DE; PRM mass landslides.

Dominio y subdominios	Área (km ²)	Altitud (m s.n.m.)	Orientación	Tipología volcánica	Edad	Patrón de drenaje	Sistemas de lineamientos	Geodiversidad	Área Natural Protegida	Peligro geológico potencial	Municipio	Cimas (m s.n.m.)
18. Planicies región de Morelia	214				Holoceno							
d. Ribera del lago de Pátzcuaro	25	2040-2060	-	-		-	E-O	-	No	-	Quiroga, Tzintzuntzan y Pátzcuaro	-
c. Tiripetío-Santiago Undameo	38	2020	NE-SO	-		Subparalelo	NE-SO y E-O	-	No	-	Morelia y Acuitzio	-
b. Zacapu	37	2000-2050	ENE-OSO	-		Subparalelo	NE-SO Y ENE-OSO	-	No	-	Huaniqueo y Coeneo	-
a. Tarímbaro-Álvaro-Obregón	114	1840-1880	E-O	-		Subparalelo	NE-SO Y E-O	-	No	-	Tarímbaro y Álvaro Obregón	-
17. Escudo, domos y conos Pátzcuaro-Tzintzuntzan	127	2040-3100	-	ED, CC y DM	Pleistoceno-Holoceno	Subdesarrollado	E-O	Mirador de escenario lacustre y volcánico	No	-	Pátzcuaro, Tzintzuntzan y Huiramba	Yahuarato (2500) y El Frijol (3100)
16. Conos y <i>spatter</i> Morelia	146	2130-2980	-	CC y SP	Pleistoceno-Holoceno	Subdesarrollado	NE-SO	Cuevas de lava de Tiristarán y C. Hueco	No	-	Morelia, Quiroga y Chucándiro	La Mina (2580) y Los Caballos (2600)
15. Conos Rancho Seco	53	2060-2520	NO-SE	CC	Pleistoceno	Subdesarrollado	NO-SE	Sitio arqueológico de Angamuco (lavas)	No	-	Tzintzuntzan y Quiroga	Rancho Seco (2520)
14. Conos y <i>spatter</i> de Tanimireche	32	1850-2430	ENE-OSO	CC y SP	Pleistoceno	Radial centrifugo	ENE-OSO	-	No	-	Chucándiro y Huaniqueo	C. Pelón (2420)
13. <i>maar</i> La Alberca	19	2100-2300	NNO-SSE	MR y CC	Pleistoceno	Subparalelo	NNO-SSE y ENE-OSO	La Alberca de Teremendo (<i>maar</i>)	No	-	Morelia y Huaniqueo	C. Pelón (2240)

12. Escudos, conos y <i>spatter</i> de Sanambo	82	2100-2760	-	ED, CC y SP	Pleistoceno y Holoceno	Radial centrifugo	NO-SE	Mirador de escenario volcánico	No	-	Morelia, Quiroga y Tzintzuntzan	C. Irauco (2760) y Sanambo (2740)
11. Escudos Morelia	357		NE-SO									
b. El Águila-El Remolino	172	2020-3060		ED y CC	Pleistoceno	Radial centrifugo	NE-SO	Mirador de escenario volcánico	Si	PRM	Morelia y Lagunillas	El Águila (3060)
a. Quinceo-Tetillas	185	1880-2760		ED, CC, DM y SP	Pleistoceno	Radial centrifugo	NE-SO y E-O	Mirador de escenario volcánico	Si	-	Morelia y Tarímbaro	Quinceo (2740) y Tetillas (2760)
10. Conos La Providencia	34	2060-2360	NE-SO	CC	Pleistoceno (?)	Radial centrifugo	NE-SO	-	No	Erosión; PRM	Huiramba, Lagunillas y Pátzcuaro	Loma El Molcajete (2340)
9. Domos y conos Sierra del Tzirate	174	2000-3320	NO-SE y NE-SO	DM, CC y SP	Pleistoceno	Dendrítico y subdendrítico	NO-SE, NE-SO y ENE-OSO	Mirador de escenario lacustre y volcánico	No	PRM	Quiroga, Coeneo, Huaniqueo y Morelia	El Tzirate (3320)
8. Escudos Picacho-La Trampa	146		NNO-SSE									
b. La Trampa	104	2020-2520		SD y DM	Pleistoceno (?)	Radial centrifugo	NE-SO	Mirador de escenario volcánico	No	-	Acuitzio, Morelia y Madero	La Trampa (2520) y C. El Zopilote (2500)
a. Picacho	42	2090-2550		SD	Pleistoceno	Radial centrifugo	ENE-OSO	Mirador de escenario volcánico	No	-	Morelia, Chucándiro y Huaniqueo	El Picacho (2560)
7. Domos, conos y <i>spatter</i> La Taza-La Nieve	197	2020-3420	-	DM, CC y SP	Plioceno-Pleistoceno	Dendrítico	NE-SO	Mirador de escenario volcánico	Si	PRM	Acuitzio, Morelia, Huiramba, Lagunillas y Pátzcuaro	La Nieve (3420)
6. Lavas La Leonera-Tendeparacua	30	1900-2290	ENE-OSO	DE y SP	Plioceno y Holoceno	Subparalelo	NE-SO y ENE-OSO	Mirador de escenario lacustre y volcánico	No	Fuerte fallamiento geológico; PRM	Chucándiro y Huaniqueo	Loma El Zapote (2300)
5. Área urbana Morelia	37	1900-1960	NE-SO	-	Mioceno-Plioceno y Pleistoceno	No definido	NE-SO y E-O	Cantera rosa (patrimonio geológico-cultural)	No	Inundaciones; subsidencia; fuerte fallamiento geológico	Morelia	-

4. Subcuenca lacustre Morelia-Charo	196	1860-2320	E-O	DE	Mioceno-Plioceno y Pleistoceno	Subparalelo y subdendrítico	N-S, NE-SO y E-O	Mirador de escenario volcánico	Si	Fuerte fallamiento geológico; PRM; subsidencia	Morelia, Charo, Tarímbaro y Álvaro Obregón	Punhuato (2320) y C. Colorado (2220)
3. Sucesión volcánica de Cuitzeo	340		E-O									
c. Mesas El Porvenir	153	1840-2440		DE	Mioceno y Pleistoceno	Subparalelo	NO-SE, NE-SO y E-O	Los Piloncillos	No	Muy fuerte fallamiento geológico; PRM	Morelia, Tarímbaro, Chucándiro y Copándaro Piedra de Lumbre (2440)	
b. Volcán Zapata	41	1840-2160		DE y ED	Mioceno y Pleistoceno	Subparalelo	NE-SO y E-O	Mirador de escenario lacustre y volcánico	No	Fuerte fallamiento geológico; PRM	Tarímbaro, Álvaro Obregón y Cuitzeo	V. Zapata (2160)
a. Mesas de Tarímbaro-Copándaro	146	1840-2420		DE, CC y SP	Mioceno y Pleistoceno	Subdendrítico	NO-SE, NE-SO y E-O	Hidrotermalismo y cascadas	No	Fuerte fallamiento geológico; PRM	Tarímbaro y Copándaro	C. Largo (2420)
2. Caldera de Atécuaro	282	1900-2640	-	DE y C	Mioceno	Radial centrífugo	NO-SE, NE-SO y E-O	Escenario, cascadas y cantera rosa (patrimonio geológico-cultural)	Si	Fuerte fallamiento geológico; PRM	Morelia	Las Animas, El Venado (2540) y C. Verde (2600)
1. Sierra y caldera La Escalera	390	1200-2600	NE-SO	DE y C	Oligoceno-Mioceno	Dendrítico y subdendrítico	NO-SE, NE-SO y E-O	Escenario (sierra), hidrotermalismo y cascadas	Si	Muy fuerte fallamiento geológico; PRM	Morelia, Madero y Tzitzio	El Zarzal (2580) y Pico Azul (2600)

Tabla 5: Síntesis de unidades geológicas. Tipologías volcánicas: cono cinerítico= CC; *maar*= M; escudo pequeño= E; *spatter*= SP; domo de lava= D; domo erosionado= DE; caldera= C. / Table 5: Synthesis of geological units. Volcanic typologies: cinder cone= CC; *maar*= M; small shield= E; *spatter*= SP; lava dome= D; eroded dome= DE; caldera= C. Referencias principales / Main references: 1 (Mauvois, 1977); 2 (Pasquarè *et al.*, 1991); 3 (Israde-Alcántara, 1995); 4 (Garduño-Monroy *et al.*, 1999a); 5 (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999); 6 (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015); 7 (Trujillo-Hernández, 2017); 8 (Kshirsagar *et al.*, 2015); 9 (Cardona-Melchor, 2015); 10 (Hasenaka y Carmichael, 1985); 11 (Ban *et al.*, 1992); 12 (Hasenaka, 1994); 13 (Avellán *et al.*, 2020); 14 (Gómez-Arango, 2019); 15 (Pérez-Orozco *et al.*, 2018); 16 (Osorio-Ocampo *et al.*, 2018); 17 (Ramírez-Uribe *et al.*, 2019) y 18 (Avellán *et al.*, 2024).

Etapa	Grupo volcánico/Unidad litostratigráfica	Subunidad	Epoca	Edad	Tipología volcánica	Referencia
VI	20. Depósitos fluvio-lacustres y epiclásticos recientes	b. Depósitos superficiales	Reciente	-	-	2 y 6
		a. Depósitos epiclásticos				
V	19. Escudo El Frijol		Pleistoceno	3.2 ka	E	16
	18. Conos y <i>spatter</i> Melón-Tendeparacua	-	Superior-Holoceno	11.4-6.0 ka	CC y SP	8, 10, 16 y 17
	17. Conos y <i>maar</i> Rancho Seco-Alberca		Tardío	30.3-12.6 ka	CC, SP y M	8, 9, 10, 17 y 18
IV	16. Domos La Muela		Pleistoceno	0.14-0.011 Ma	D	9, 15, 16 y 18
	15. Conos y <i>spatters</i> Coro Grande	-	Medio-Holoceno	0.50-0.11 Ma	C y SP	9, 10, 3, 17 y 18
	14. Domos El Burro-La Taza		Temprano	0.70-0.37 Ma	D	9, 15 y 18
	13. Escudos El Águila-Tetillas			0.87-0.36 Ma	E	9, 12, 13 y 18
III	12. Domos El Tzirate-Huracán		Pleistoceno	1.93-1.3 Ma	D	9, 10, 15, 16 y 18
	11. Depósitos piroclásticos El Porvenir		Temprano	1.4 Ma		13 y 14
	10. Conos y derrames Pelón	-		1.5-0.84 Ma	CC	8, 10 y 12
	9. Escudos Quinceo-Picacho			1.5-1.4 Ma	E	11, 12 y 13
	8. Domos y derrames Santa Genoveva			1.9-1.5 Ma	D	9, 10 y 18
	7. Conos La Trampa			2.0 Ma	CC	9, 10 y 18
II	6. Domos y derrames Leonera-Divisadero	b. Domos y derrames Zoromuta-Divisadero	Mioceno Tardío-Plioceno Tardío	3.8-2.6 Ma	D y SP	8, 9, 13 y 18
		a. Derrames de lava La Leonera		4.4 Ma	E	
	5. Secuencia fluvio-lacustre Morelia-Charo			3.6 Ma		3 y 5
	4. Volcanes y derrames Zapata-La Cruz	b. Domos La Cruz		6.7 Ma	D	7 y 13
		a. Conos y derrames Zapata		8.1-6.7 Ma	SP, CC y E	
HIATUS MAGMÁTICO (VOLCÁNICO)						
I	3. Domos post-caldéricos Atécuaro Punhuato	b. Domos del Punhuato	Oligoceno-Mioceno Temprano	16.3 Ma	DE	2, 4 y 6
		a. Domos post-caldera de Atécuaro		16.3 Ma	DE	
	2. Sistemas caldéricos y secuencias ignimbríticas Morelia-Cuitzeo	c. Ignimbrita Atécuaro-Morelia		16.7-16.3 Ma	C	2, 4 y 6
		b. Ignimbrita Cuitzeo		17.4 Ma	C	
		a. Ignimbrita La Escalera-Puerto La Sosa		22.9-20.5 Ma	C	
	1. Sucesión Tafetán-Mil Cumbres	c. Derrames de lava Cuitzeo		18.3 Ma	DE	1, 2, 4 y 6
		b. Domos y derrames Mil Cumbres		23.1-21.5 Ma	DE	
		a. Sucesión Tafetán	Oligoceno-Mioceno		C y DE	

5.4.2. *Etapas II. Vulcanismo y Secuencias fluvio-lacustres del Mioceno tardío*

En el ocaso del Mioceno temprano, la actividad volcánica fue interrumpida por completo en la RM durante al menos 8 Ma, en lo que representa un hiatus magmático y sedimentario. Es a partir del Mioceno tardío, donde la actividad volcánica resurge con la erupción del volcán Zapata de 8.1-6.7 Ma (Trujillo-Hernández, 2017) y otros domos y derrames Leonera-Divisadero (Kshirsagar *et al.*, 2015; Cardona-Melchor, 2015), que se distribuyen de manera limitada al norte y centro de la región. Sin embargo, el rasgo distintivo de esta etapa consiste en que el vulcanismo tardo-miocénico se muestra asociado con intercalaciones de sedimentos fluvio-lacustres, cuyos depósitos se distribuyen entre los municipios de Morelia y Charo (Israde-Alcántara, 1995; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Esta etapa geológica culmina con el vulcanismo de composición félsica representado por el C. El Zoromuta y otros domos que presentan edades entre 3.8-2.6 Ma (Cardona-Melchor, 2015; Avellán *et al.*, 2024).

5.4.3. *Etapas III-V. Vulcanismo del Campo Volcánico Michoacán – Guanajuato*

La cartografía nos señala que el vulcanismo más joven del Pleistoceno al Holoceno constituye más del 50% de las unidades de la RM y se concentran principalmente en el sector occidental. Se estima que, desde el inicio de la actividad magmática del CVMG en la RM, han ocurrido al menos 163 erupciones con edificios de tipo escudo pequeño, conos de escoria, *spatter*, domos de lava y explosiones freatomagmáticas tipo *maar*.

Con base en el registro de las edades de los diferentes edificios eruptivos, pero sobre todo en relación con su distribución espacial, se han identificado al menos tres etapas de magmatismo del CVMG en la RM: Etapa III) Pleistoceno temprano; Etapa IV) Pleistoceno medio-Holoceno temprano; Etapa V) Pleistoceno tardío-Holoceno.

La etapa geológica III señala el inicio de la actividad del CVMG entre 2 y 1.3 Ma (Hasenaka y Carmichael, 1985; Ban *et al.*, 1992; Hasenaka, 1994). Esta etapa está caracterizada por una diversidad tipológica de centros eruptivos, así como por un vulcanismo de tipo bimodal. De hecho, aunque habitualmente el CVMG había sido considerado de tipo monogenético y de composición relativamente máfico-andesítica (Hasenaka y Carmichael, 1985; Hasenaka, 1994), con base en trabajos recientes (Kshirsagar *et al.*, 2015; Cardona-Melchor, 2015; Trujillo-Hernández, 2017; Gómez-Arango, 2019; Pérez-Orozco *et al.*, 2018; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018; Ramírez-Urbe *et al.*, 2019; Avellán *et al.*, 2020 y 2024), se ha reconocido por un lado, el registro de numerosos domos riolíticos con edades del Pleistoceno temprano, entre 2 y 1.5 Ma (e.g. Sierra Tzirate; Cardona-Melchor, 2015; Pérez-Orozco *et al.*, 2018; Avellán *et al.*, 2020), así como de los extensos depósitos piroclásticos riolíticos (e.g. Tiristarán-El Porvenir; Gómez-Arango, 2019), que se exponen con formas colinares en la región occidental

de la RM y que constituyen las secuencias basales para el emplazamiento de edificios en escudo pequeño como los volcanes Picacho y Quinceo con edades entre 1.55-1.35 Ma (Kshirsagar *et al.*, 2015; Cisneros-Máximo, 2016; Avellán *et al.*, 2020).

La etapa geológica IV se refiere al vulcanismo del Pleistoceno medio-Holoceno temprano del CVMG. En esta etapa se mantiene una relativa variación composicional bimodal pero es también menos voluminosa que la etapa III. Se identifica por el emplazamiento de edificios volcánicos aislados de tipo poligenético (El Estribo, La Muela) asociados con un vulcanismo de pequeño volumen como el c. Coro Grande, c. Hueco y edificios de tipo freatomagmático (e.g. Alberca; Kshirsagar *et al.*, 2015; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018). En esta etapa se emplazan también volcanes en escudo pequeño asociados con un vulcanismo monogenético (El Águila-Tetillas) con edades entre 0.72-0.34 Ma (Cardona-Melchor, 2015; Cisneros-Máximo, 2016; Avellán *et al.*, 2020).

La etapa geológica V registra el vulcanismo del Pleistoceno tardío-Holoceno y representa el último evento constructivo de paisaje en la RM y del CVMG. Este evento vulcanotectónico modificó considerablemente el paisaje con el emplazamiento de numerosos edificios volcánicos bien reconocidos como conos cineríticos (e.g. El Malacate, El Frijol y El Melón; ver figura 2 y figura 3). Por otro lado, es oportuno mencionar que la actividad volcánica del Pleistoceno tardío-Holoceno estuvo asociada a una serie de cuencas fluvio-lacustres de poca profundidad que presentan sedimentos deleznable con el registro de mastofauna en Atapaneo y en la misma Ciudad de Morelia (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Estas secuencias sedimentarias jóvenes se encuentran dislocadas por el sistema de fallas Morelia-Acambay, expuestas bajo forma de bloques tectónicos asociados con la evolución de sistemas fluviales activos.

6. Estructura regional y sistemas vulcano-tectónicos de la región de Morelia

El paisaje de la RM se distingue por estar constituido esencialmente por volcanes y lagos. Sin embargo, otro rasgo distintivo se refiere a ser un elocuente ejemplo de actividad vulcano-tectónica, donde los sistemas de deformación discontinua con fallas y fracturas han dislocado el paisaje y están asociados a la formación y emplazamiento de los centros eruptivos, así como con los procesos de apertura y generación de cuencas y sub-cuencas lacustres (ver secciones transversales de la figura 3). En este sentido, destaca el alto estructural tectónico orientado NE-SO que está asociado con la dislocación de las unidades volcánicas del Oligoceno-Mioceno inferior de la Sierra de Mil Cumbres. Este sistema controla grandes bloques y unidades morfoestructurales o de paisaje de la región y está relacionado a la deformación intra-arco de la Faja Volcánica Transmexicana (Garduño-Monroy *et al.*, 1999; Ferrari *et al.*, 2012). Este sistema se relaciona también con la formación de

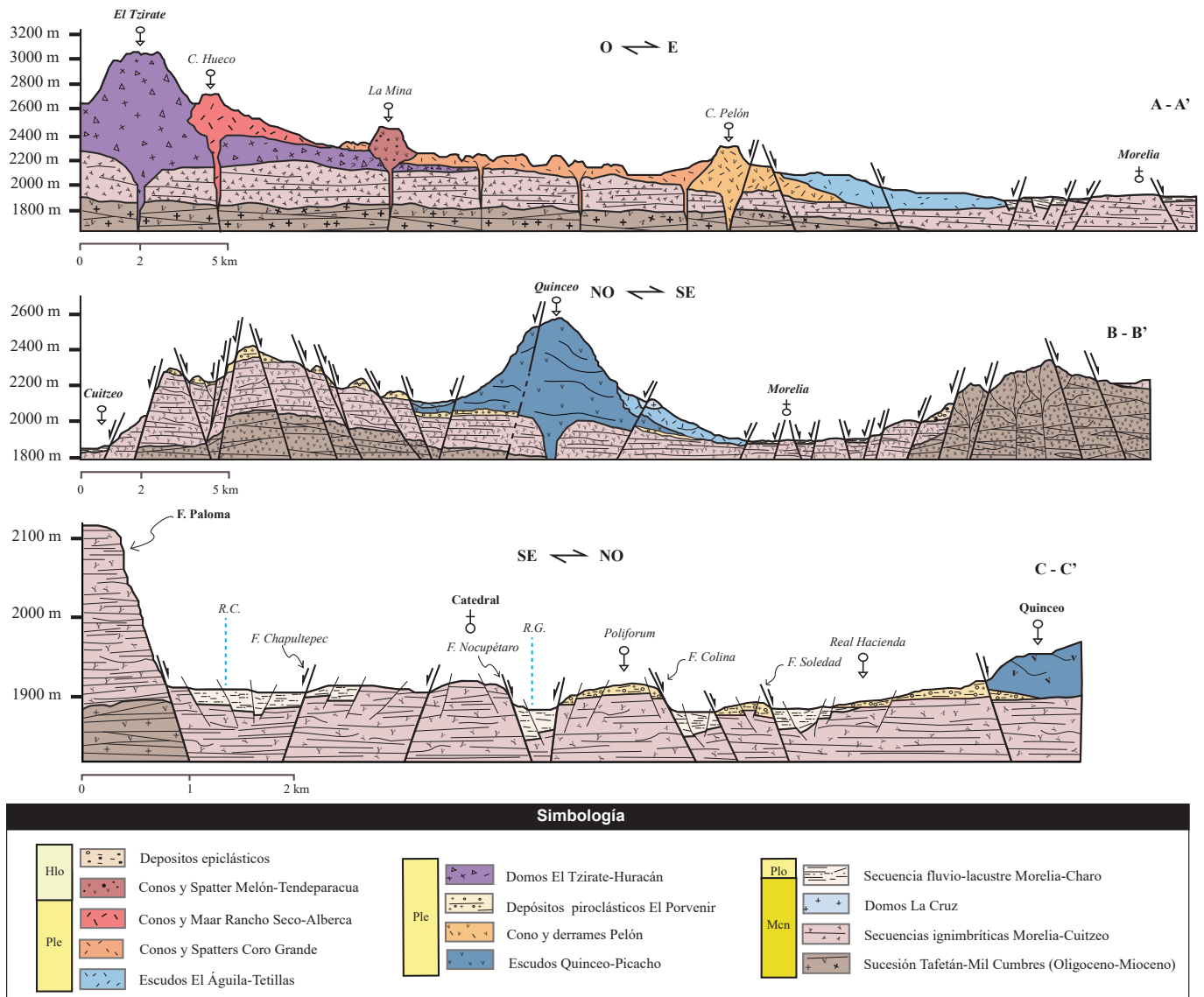


Figura 3. Secciones transversales geológicas de la región de Morelia (RM). Notar que las secciones A y B son de tipo regional: Tzirate-Morelia y Cuitzeo-Atécuaro, respectivamente. En cambio, la sección C es un perfil local de la ciudad de Morelia. Notar la simbología temporal: Mcn= Mioceno, Plo= Plioceno, Ple= Pleistoceno y Hlo= Holoceno. / Figure 3: Geological cross-sections of the Morelia region (RM). Note geological region sections A and B: Tzirate-Morelia and Cuitzeo-Atécuaro, respectively. On the other hand, section C is a local profile of the city of Morelia. Note the temporal symbology: Mcn = Miocene, Plo = Pliocene, Ple = Pleistocene and H = Holocene.

la subcuenca miocénica fluvio-lacustre de Morelia y Charo (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999).

Aunque se reconocen otros sistemas estructurales con orientación NO-SE y NNO-SSE, como se puede observar en la sección B-B', las estructuras con orientación NE-SO y E-O representan los sistemas predominantes y, se considera que están asociadas con la cinemática del fallamiento y basculamiento regional del Sistema de Fallas Morelia-Acambay (Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Suter, 2016; Soria-Caballero *et al.*, 2019 y 2021; Menella *et al.*, 2022). Este sistema propició, durante el Pleistoceno tardío, la migración de las zonas lacustres hacia el norte de Morelia (Israde-Acántara y Garduño-Monroy, 1999) y se relaciona estrechamente con la distribución del vulcanismo

del Pleistoceno-Holoceno de pequeño volumen al occidente de la región.

Finalmente, en la sección C-C' de la Figura 3 se ilustra el comportamiento estructural local donde se asentó la Ciudad de Morelia. En este perfil se observa un paisaje típico de bloques y lomeríos (e.g Loma de Guayangareo, Loma El Zapote), asociados con los sistemas de fallas que caracterizan el paisaje de la Ciudad de Morelia. Sin embargo, la estructura y el paisaje han quedado relativamente obliterados por la urbanización, generando en sus habitantes una falsa percepción de un paisaje llano. En la sección C-C' destaca hacia el sur, una gran estructura reconocida popularmente como "Falla La Paloma", orientada relativamente E-O, que delimita la zona de lomeríos

de la ciudad de Morelia con un alto estructural de la Sierra de Mil Cumbres, disectada por el río Chiquito, que contiene las principales Áreas Naturales Protegidas de la RM.

7. Geodiversidad, Áreas Naturales Protegidas y Geoconservación

La RM puede ser bien identificada por la diversidad de paisajes y de tipología volcánica que representa per se un alto valor geológico y científico. Por su naturaleza, existen numerosos sitios de interés geológico educativo y recreativo, como cascadas y pozas termales enclavadas en la Sierra de Mil Cumbres (Jácome-Paz, 2019) o tubos de lava (C. Hueco y Tiristarán) y afloramientos con valor educativo, que podrían conducir al establecimiento de una red de sitios de geodiversidad (Figura 4; Robles-Pereznegrón, 2023). No es casual que la RM cuente con el registro del decreto de 16 Áreas Naturales Protegidas. Por otro lado, la geodiversidad de la RM se traslapa con una gran cantidad de sitios que contienen un patrimonio histórico y arqueológico (Figura 4; Robles-Pereznegrón, 2023). Desde la misma ciudad de Morelia, patrimonio de la humanidad, hasta una serie de sitios arqueológicos, como es el caso del sitio de Angamuco que coincide con el malpaís del volcán Rancho Seco (Ramírez-Uribe *et al.*, 2019), o el sitio arqueológico de Tiristarán que coincide con los depósitos piroclásticos El Porvenir (Mapa geológico y Tabla 4) o las yácatas en la colonia Santiaguito, al norte de la Ciudad de Morelia (Cárdenas y Fernández, 2013; Hernández, 2019).

Desafortunadamente, la expansión urbana y constante cambio de uso de suelo forestal por uso urbano o frutícola han rebasado cualquier plan de manejo territorial.

Consideramos que los mapas geológico, morfoestructural y de tipología volcánica, constituyen una base cartográfica que permitiría desarrollar estrategias de geoconservación, las cuales proponen el desarrollo territorial por medio de una visión holística en el manejo de recursos naturales, a partir de la valoración de su patrimonio geológico (abiótico), biótico y cultural (INE, 2004; Brilha, 2018).

8. Peligros geológicos de la región de Morelia: Atlas de riesgos vs. Geoconservación

La diversidad de los peligros geológicos en la región de Morelia, ha sido bien documentada desde hace varias décadas. En paralelo se ha tenido registro de diversos intentos de elaboración de un Atlas de Riesgos, como un documento guía para el manejo del riesgo y la aplicación de medidas de contingencia (e. g. Hernández-Madrugal *et al.* 2011). A pesar de los intentos del manejo de material cartográfico, nunca se han hecho verdaderos trabajos de investigación que ponderen espacialmente las zonas con problemáticas geológico-ambientales y su traslape con la cartografía geológica.

En este trabajo se presenta por primera vez un mapa geológico que cubre el municipio de Morelia y su entorno

natural, incluyendo la traza urbana desbordada que, de manera recurrente, ha derivado en frágiles políticas de ordenamiento territorial y preservación ambiental en la RM. Aprovechar el análisis y cartografía geológica permitiría sin duda alguna partir del conocimiento del origen y entender la distribución de los peligros geológicos y proponer estrategias de mitigación de sus efectos con una adecuada socialización. La estrategia de geoconservación no solo representa una potente herramienta para la apreciación y divulgación de su geodiversidad, además representa la valoración implícita de su territorio y una alternativa de desarrollo, gestión del riesgo geológico y sustentable de la RM.

9. Conclusiones

Los mapas geológico, morfoestructural y de tipología volcánica de la RM permiten identificar y clasificar 216 centros volcánicos, distribuidos en 18 dominios morfoestructurales en la RM que representan per se la geodiversidad del paisaje.

El mapa geológico de la RM permite conceptualizar su historia y evolución geológica, en al menos 6 etapas de evolución geológica, la cual ha sido configurada esencialmente por procesos volcánicos asociados con secuencias fluvio-lacustres desde el Mioceno tardío al Holoceno.

La cartografía geológica y morfoestructural podría ser incorporada en un análisis futuro de estrategias de geoconservación que represente una alternativa para los planes de manejo territorial de la región de Morelia.

10. Agradecimientos

A M. C. Alberto Gómez Calderón y Dr. Antonio Pola Villaseñor, por su especial apoyo durante el desarrollo de este trabajo. A los editores Dr. Gerardo Carrasco Núñez y Dra. Penélope López Quiroz, y a los revisores Dr. Jaime Cavazos Álvarez y anónimo, por sus valiosas evaluaciones. Dedicado a la población migrante de Morelia.

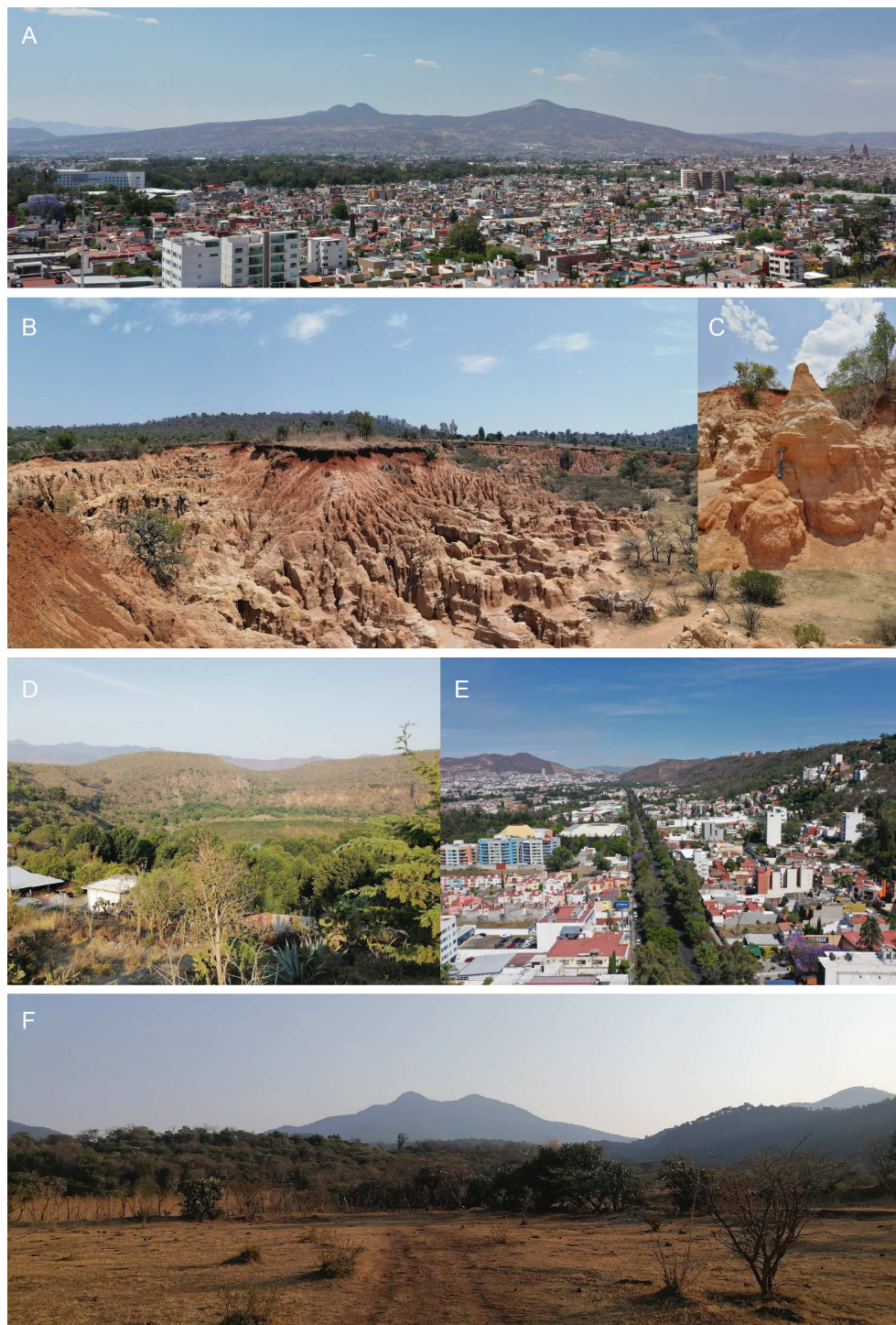
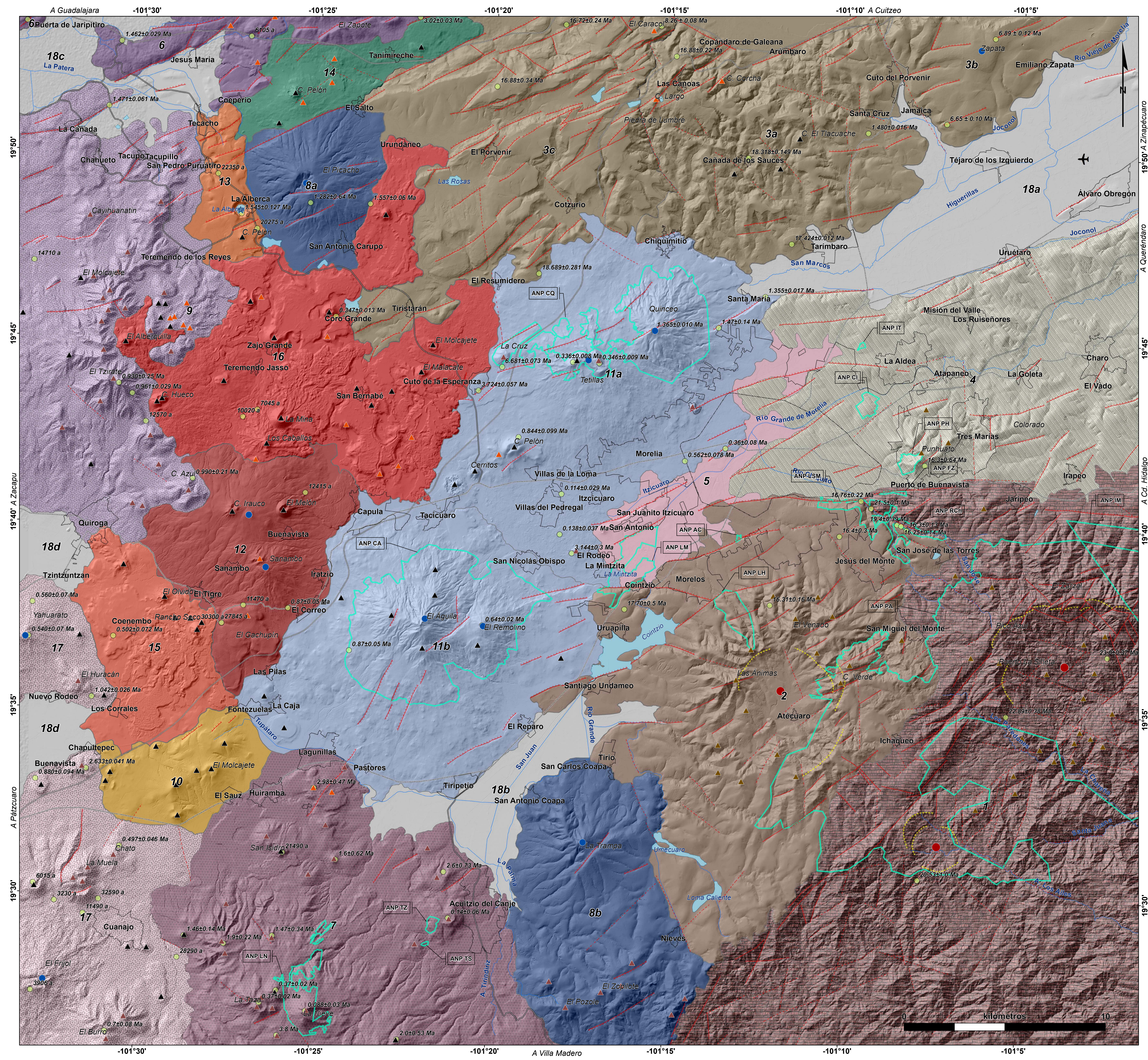


Figura 4: Lámina fotográfica de geodiversidad de la región de Morelia y de algunos sitios con potencial de geoconservación. A) Fotografía aérea de los volcanes Quinceo (derecha) y Tetillas (izquierda), al noroeste de la ciudad de Morelia. B) Sitio Los Piloncillos, al sur de la localidad El Porvenir. C) Acercamiento a geofoma erosiva de Los Piloncillos. D) *Maar* La Alberca de Teremendo. E) Fotografía aérea del sureste de la ciudad de Morelia (Sierra de Mil Cumbres). Se observa el característico escarpe de falla E-O (derecha) que divide la zona alta-baja de Morelia y El Punhuato (fondo-izquierda). Además, en esta zona se concentran las Áreas Naturales Protegidas más antiguas. F) Sierra del Tzirate, al norte de Quiroga. / Figure 4: Photographic plate of geodiversity of the Morelia region and some sites with geoconservation potential. A) Aerial view of the Quinceo (right) and Tetillas (left) volcanoes, northwest of the Morelia city. B) Los Piloncillos site, southern El Porvenir. C) Inset of the erosive geomorphs of Los Piloncillos. D) Maar La Alberca de Teremendo. E) Aerial view of the southeast of the Morelia city and Sierra de Mil Cumbres. Note the known E-W fault scarp (right), which divides the urban zones of Morelia City and is delimited by El Punhuato volcano (background-left). Main protected areas are concentrated in this area. F) Sierra del Tzirate, northern Quiroga.

Mapa de dominios morfoestructurales y tipología volcánica de la región de Morelia

Miranda Robles Pereznegrón¹, Pedro Corona Chávez²

¹ Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, UNAM, ² Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UMSNH



LEYENDA

DOMINIOS MORFOESTRUCTURALES

- 18. Planicies de la región de Morelia
- 18d. Ribera del Lago de Pátzcuaro
- 18c. Zacapu
- 18b. Tiripetío-Santiago Undameo
- 18a. Tarímbaro-Álvoro Obregón
- 17. Escudos, domos y conos Pátzcuaro-Tzintzuntzan
- 16. Conos y spatter Morelia
- 15. Conos Rancho Seco
- 14. Conos y spatter de Tanimireche
- 13. Maar La Alberca
- 12. Escudos, conos y spatter Sanambo
- 11. Escudos de Morelia
- 11b. El Águila- El Remolino
- 11a. Quinceo-Tetillas
- 10. Conos La Providencia
- 9. Domos y conos Sierra del Tzirate
- 8. Escudos Picacho-La Trampa
- 8b. La Trampa
- 8a. Picacho
- 7. Domos, conos y spatter La Taza-La Nieve
- 6. Lavas La Leonera-Tendeparacua
- 5. Área urbana Morelia
- 4. Subcuenca lacustre Morelia-Charo
- 3. Sucesión volcánica de Cuitzeo
- 3c. Mesas El Porvenir
- 3b. Volcán Zapata
- 3a. Mesas de Tarímbaro-Copándaro
- 2. Caldera de Atécuaro
- 1. Sierra y caldera La Escalera

- Edades isotópicas
- Área Natural Protegida
- Polígono de localidad urbana/rural

El listado de todas las edades isotópicas puede ser consultado en el material suplementario, donde se especifican las coordenadas, el método, precisión y la referencia bibliográfica. Las edades han sido proyectadas directamente en el mapa.

Estructuras tectónicas

- Falta
- Falta normal
- Falta inferida
- Estructura de colapso

Hidrografía y vialidades

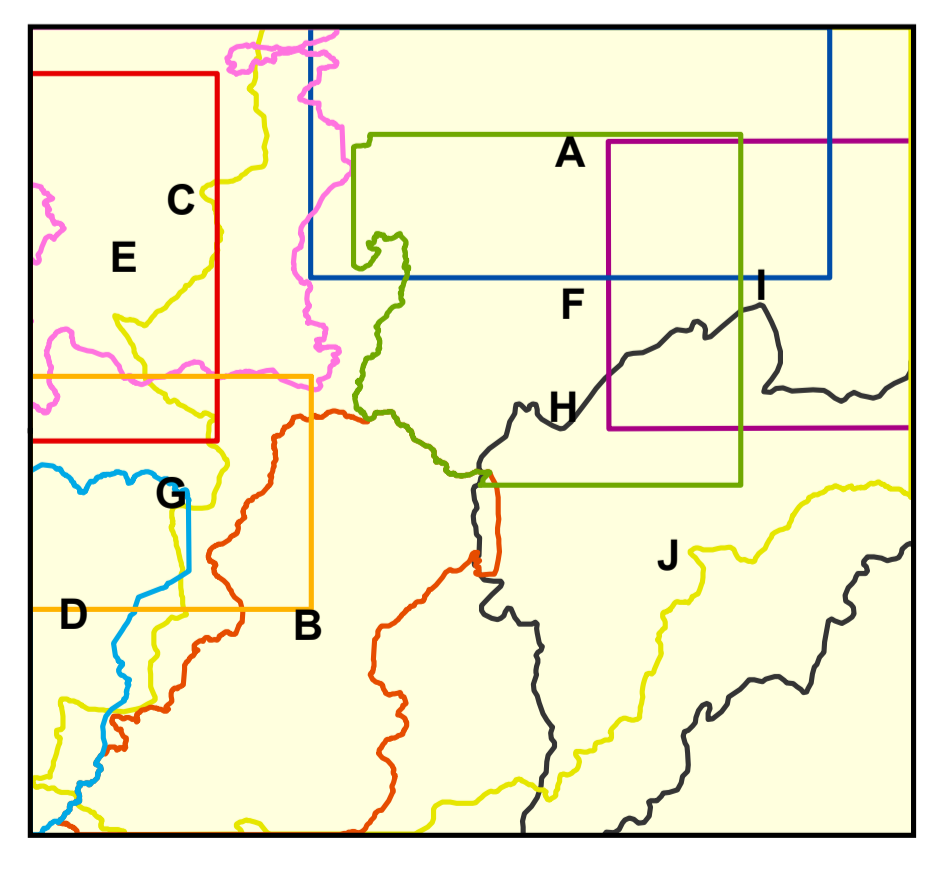
- Ríos y canales
- Cuerpos de agua
- Carretera de peaje
- Carretera federal
- Carretera estatal
- Periférico de Morelia
- ✈ Aeropuerto

Tipología volcánica

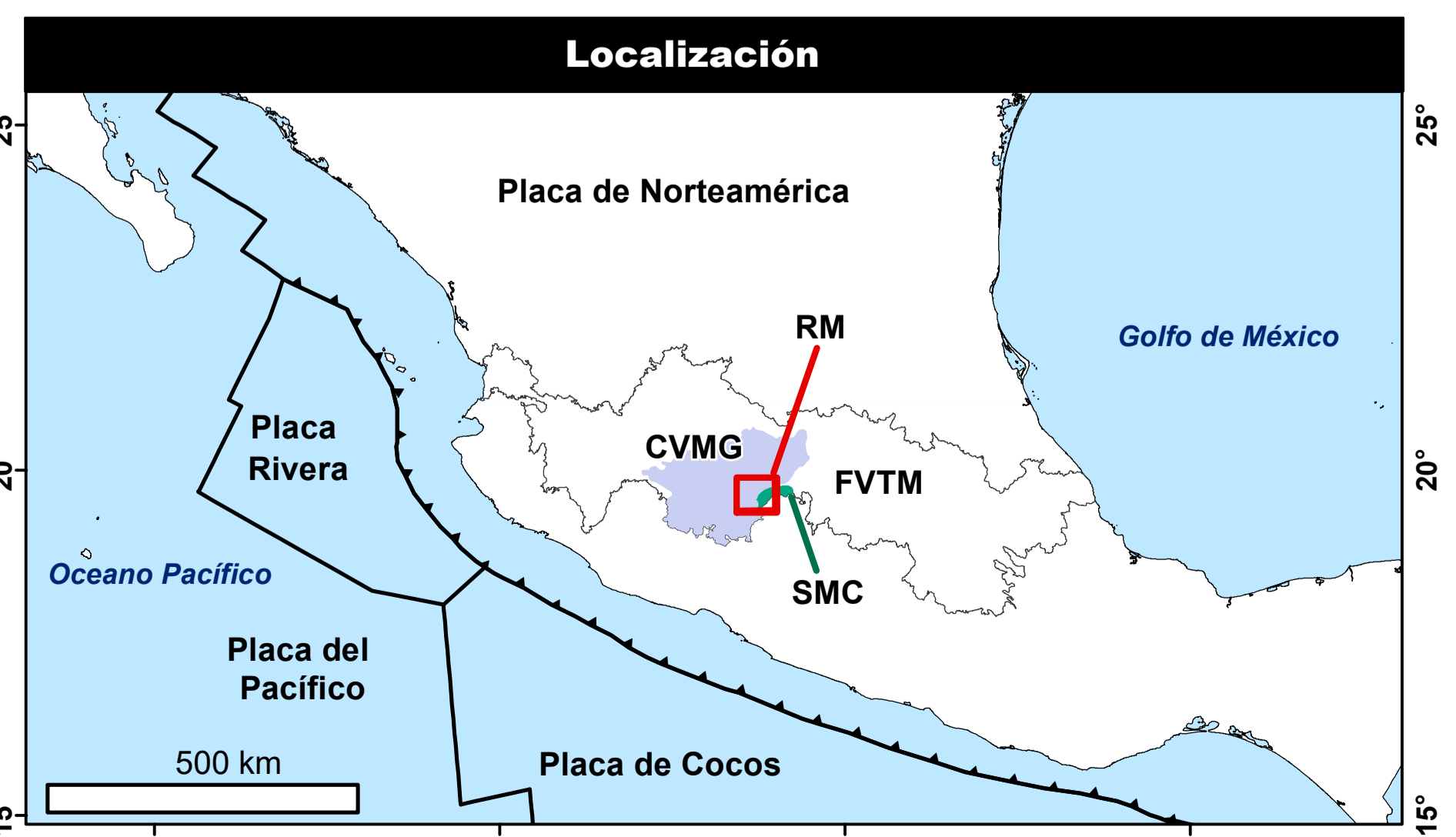
- ▲ Cono cinerítico
- ▲ Spatter
- ★ Maar
- ▲ Domo de lava
- ▲ Domo erosionado
- Escudo pequeño
- Caldera

Nombre oficial y clave de Áreas Naturales Protegidas para su identificación en el mapa.

Clave	Nombre
ANP AC	Arcos de la cascada
ANP CA	Cerro del Águila
ANP CI	Fideicomiso de la ciudad industrial de Morelia
ANP CQ	Cerro Quinceo
ANP FZ	Parque Francisco Zarco
ANP IM	Insurgente José María Morelos
ANP IT	Instituto Tecnológico Agropecuario No. 7
ANP LH	Ex escuela agrícola La Huerta (Piedra del Indio)
ANP LM	Manantial La Mintzita
ANP LN	La Nieve
ANP LSM	Loma de Santa María y depresiones aledañas
ANP PH	Cerro Punhuato
ANP PA	Pico Azul-La Escalera
ANP RCh	Cañadas del Río Chiquito
ANP TS	Tzintzani
ANP TZ	El Tocuz

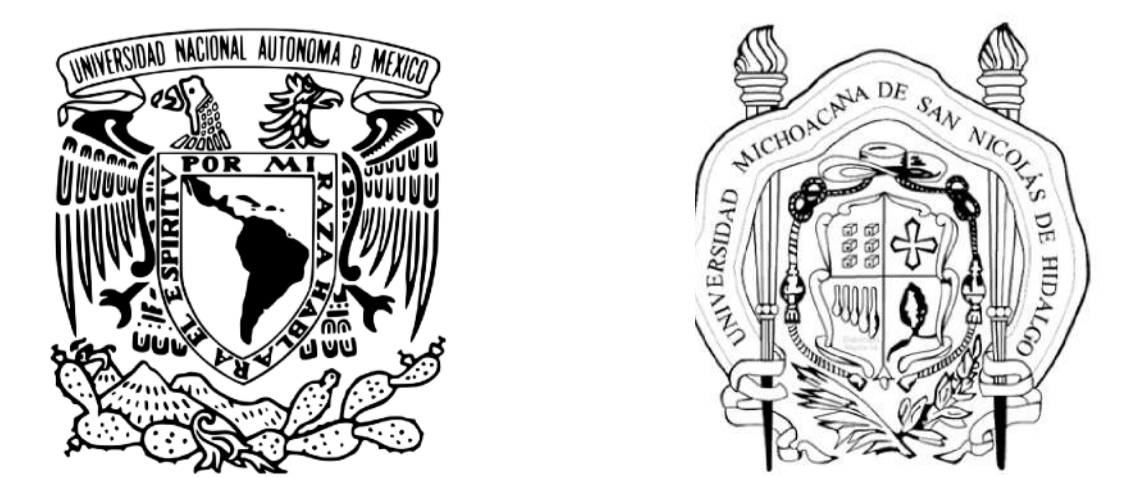


Mapa índice de antecedentes cartográficos. Las referencias A-J cubren el área de estudio de manera parcial, las referencias K y L lo cubren por completo.



FVTM: Faja Volcánica Transmexicana SMC: Sierra de Mil Cumbres CVMG: Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato RM: Región de Morelia

Información técnica	
Escala	1:60000
Esferoide	WGS 84
Proyección	UTM
Zona geográfica	14N
Datum horizontal	WGS 84
Fuentes de mapa base	
Modelo digital de elevación	LIDAR
Datos geográficos vectoriales	INEGI

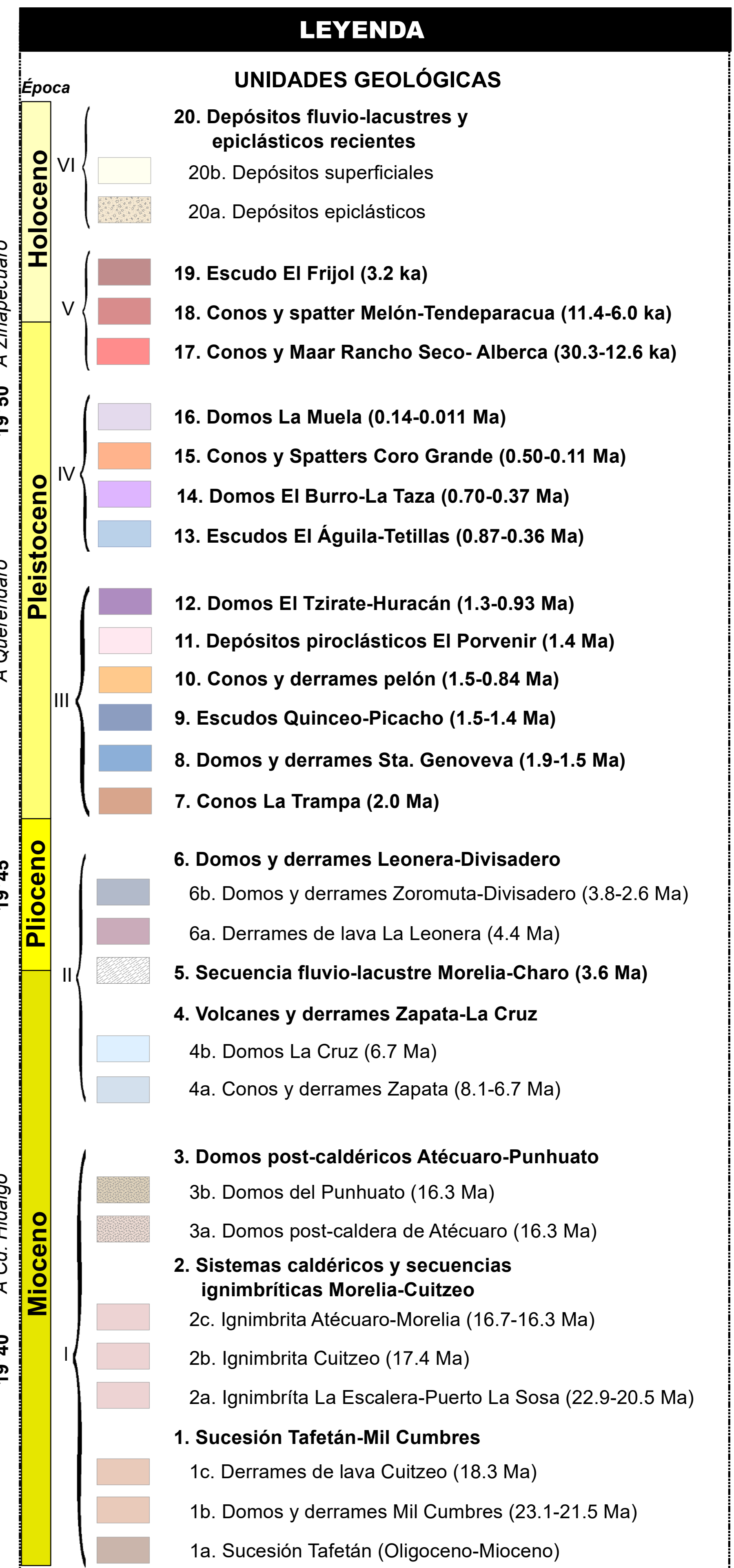
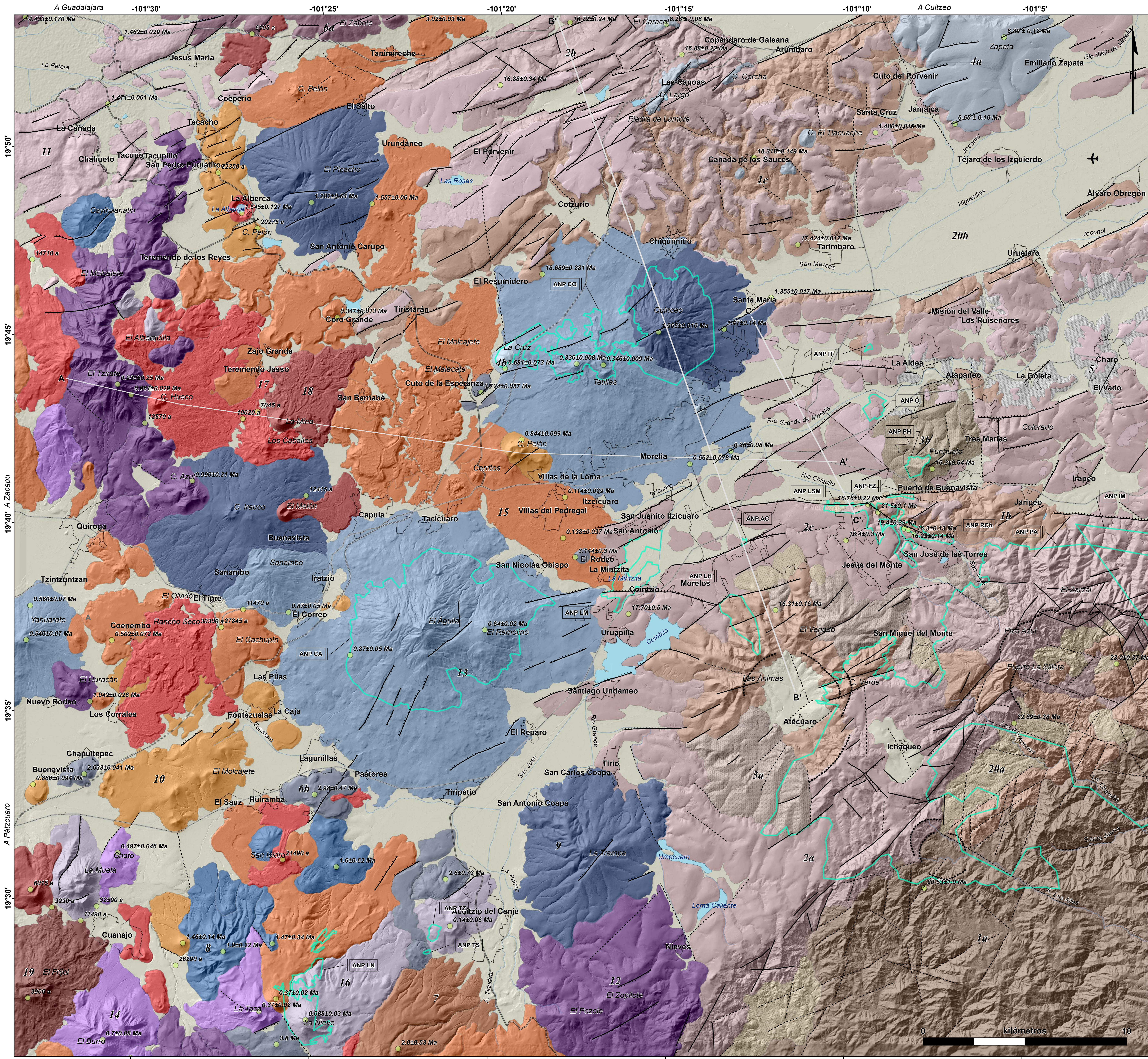


A. Hernández-Bernal et al. (2021)
 A. Trujillo-Hernández et al. (2022)
 B. Cardona-Melchor (2015)
 B. Avellán et al. (2024)
 C. Kshirsagar et al. (2015)
 D. Osorio-Ocampo et al. (2018)
 E. Pérez-Croazzo et al. (2018)
 F. Ramírez-Urbe et al. (2019)
 G. Cisneros-Máximo (2016)
 G. Avellán et al. (2020)
 H. Gómez-Vasconcelos et al. (2021)
 I. Israde-Alcántara (1995)
 I. Israde-Alcántara y Garduño-Monroy (1999)
 J. Gómez-Vasconcelos et al. (2015)
 K. Garduño-Monroy et al. (1999)
 L. Pasquaré et al. (1991)

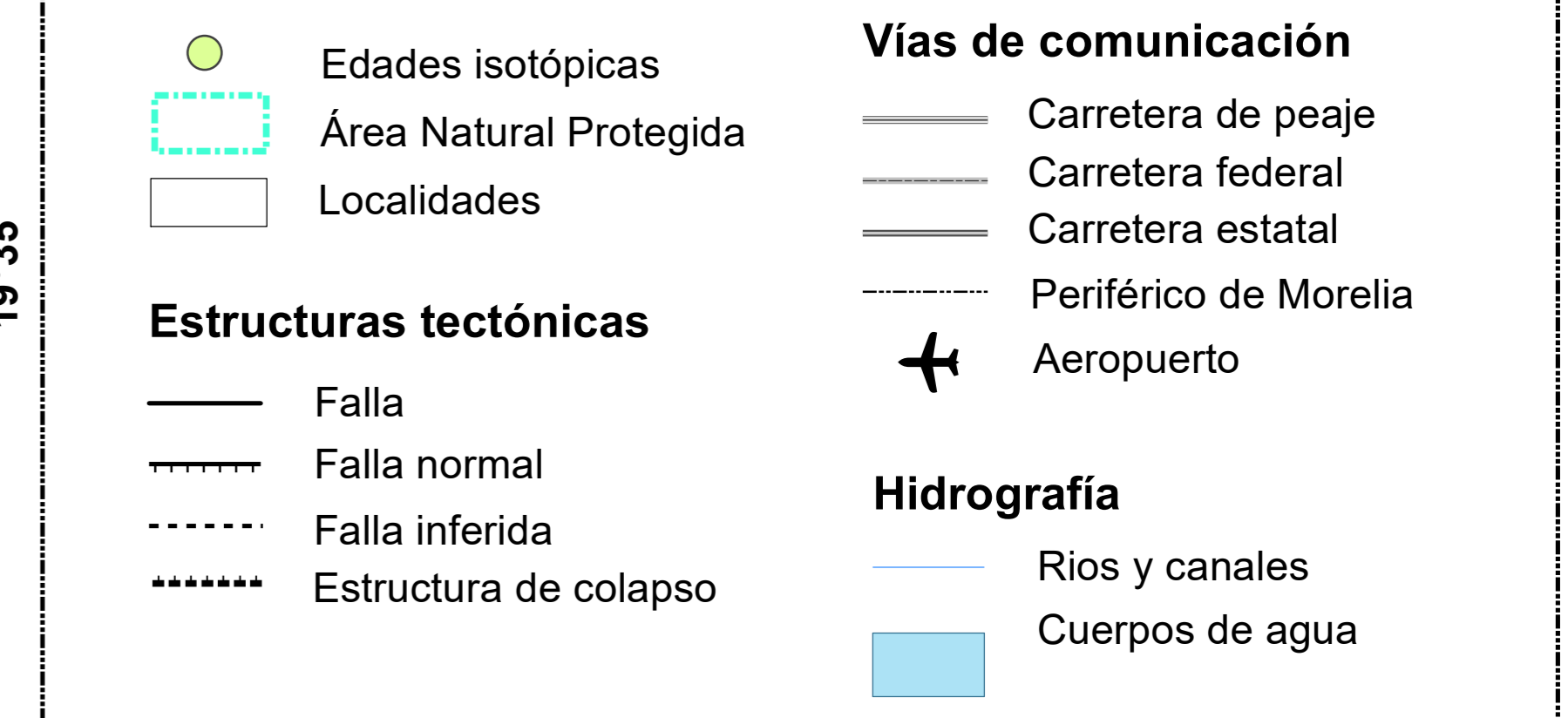
Mapa geológico de la región de Morelia

Miranda Robles Pereznegrón¹, Pedro Corona Chávez²

¹ Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, UNAM, ² Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UMSNH

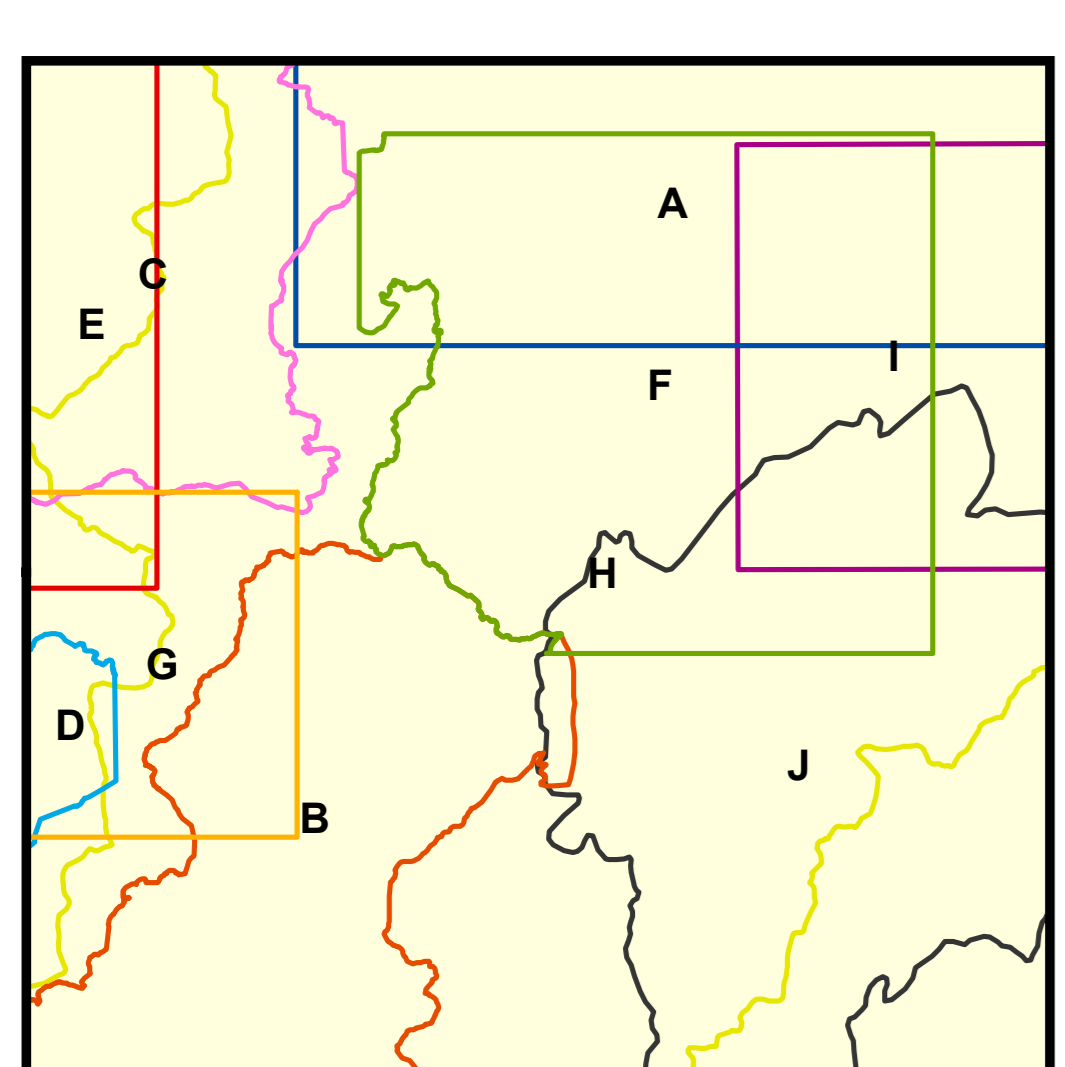


El listado de todas las edades isotópicas puede ser consultado en el material suplementario, donde se especifican las coordenadas, el método, precisión y la referencia bibliográfica. Las edades han sido simplificadas y proyectadas directamente en el mapa. Los corchetes indican la etapa geológica, para su descripción ver texto y tabla 5.



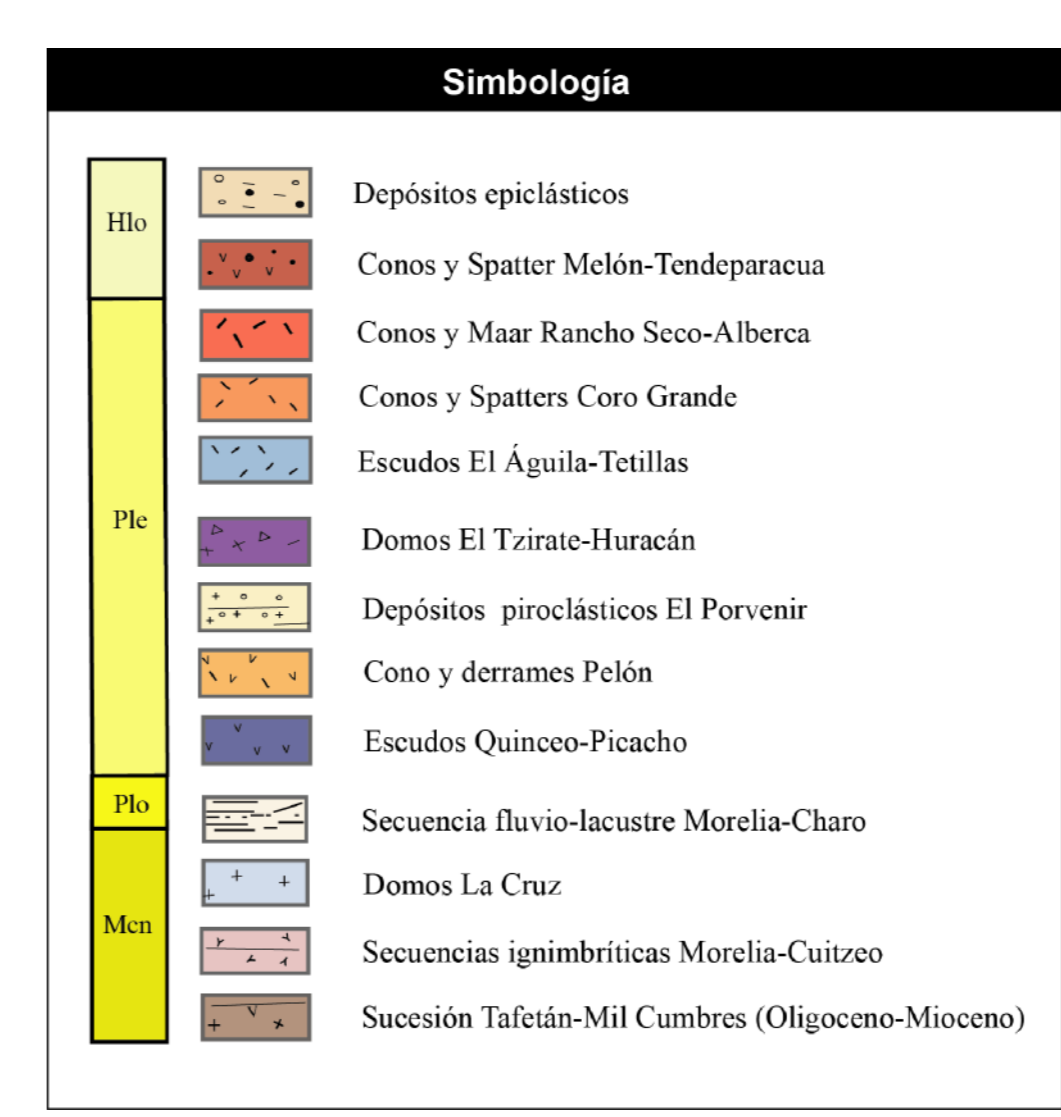
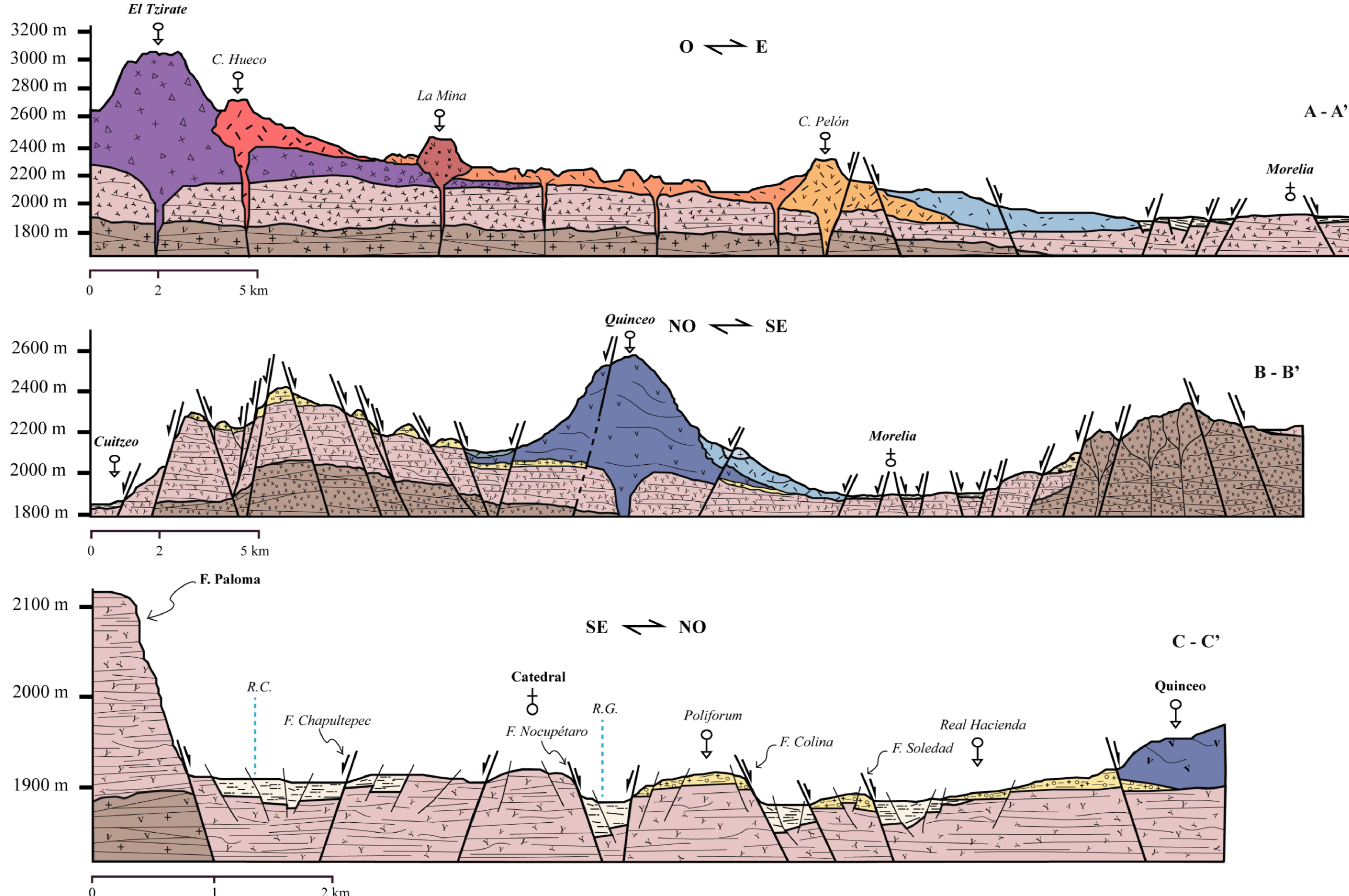
Nombre oficial y clave para identificar Áreas Naturales Protegidas.

Clave	Nombre
ANP AC	Arcos de la cascada
ANP CA	Cerro del Águila
ANP CI	Fideicomiso de la ciudad industrial de Morelia
ANP CQ	Cerro Quinceo
ANP FZ	Parque Francisco Zarco
ANP IM	Insurgente José María Morelos
ANP IT	Instituto Tecnológico Agropecuario No. 7
ANP LH	Ex escuela agrícola La Huerta (Piedra del Indio)
ANP LM	Manantial La Mintzita
ANP LN	La Nieve
ANP LSM	Loma de Santa María y depresiones aledañas
ANP PH	Cerro Punhuato
ANP PA	Pico Azul-La Escalera
ANP RCh	Cañadas del Río Chiquito
ANP TS	Tsintsani
ANP TZ	El Tocuz

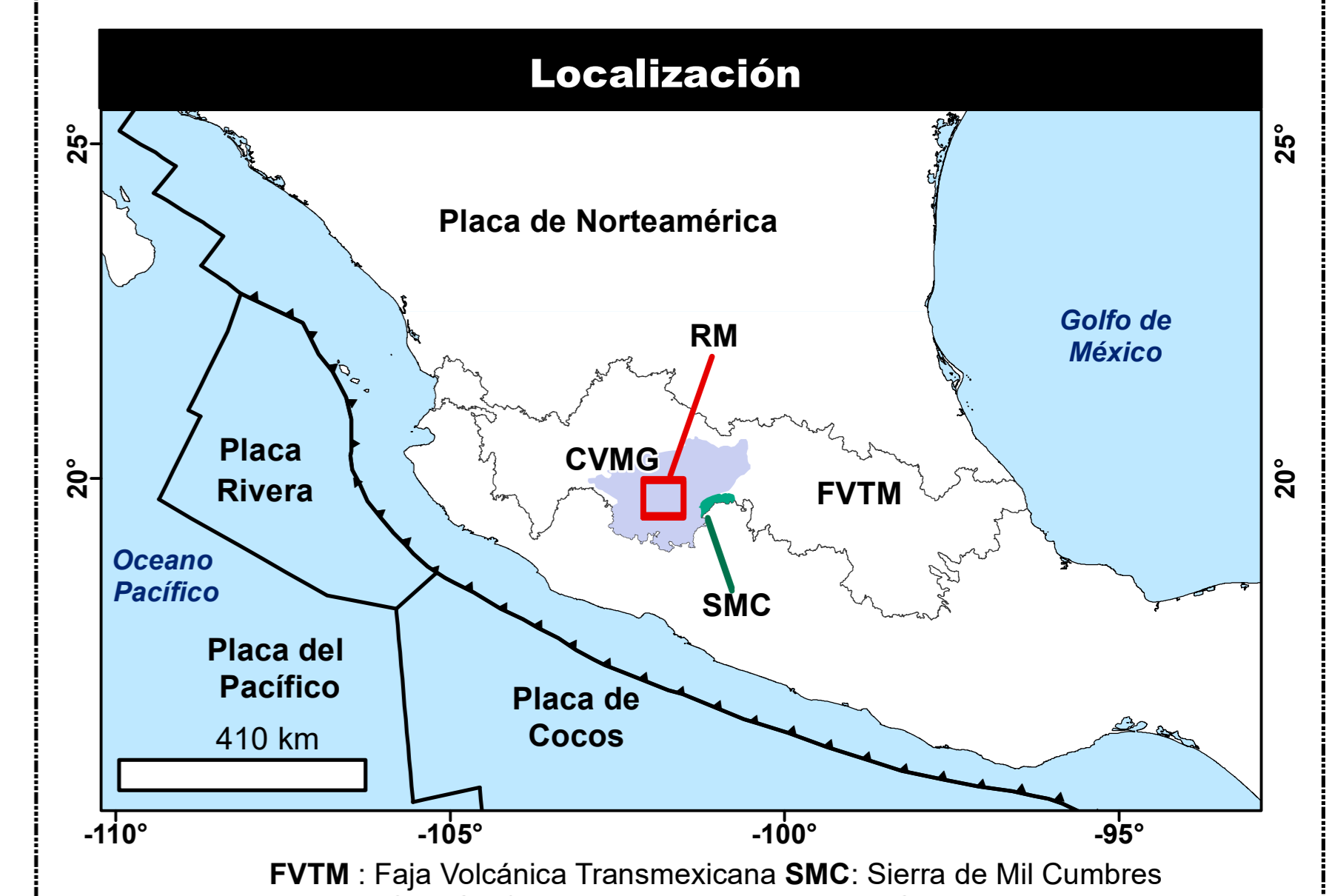


Mapa índice de antecedentes cartográficos. Las referencias A-J cubren el área de estudio de manera parcial, las referencias K y L lo cubren por completo.

- A. Hernández-Bernal et al. (2021)
- B. Trujillo-Hernández et al. (2022)
- C. Cardona-Melcher (2015)
- D. Avellán et al. (2024)
- E. Kshirsagar et al. (2015)
- F. Osorio-Ocampo et al. (2018)
- G. Pérez-Orozco et al. (2018)
- H. Ramírez-Uribe et al. (2019)
- I. Cisneros-Máximo (2016)
- J. Avellán et al. (2020)
- K. Gómez-Vasconcelos et al. (2021)
- L. Israelde-Alcántara (1995)
- M. Israelde-Alcántara y Garduño-Monroy (1999)
- N. Gómez-Vasconcelos et al. (2015)
- O. Garduño-Monroy et al. (1999)
- P. Pasquaré et al. (1991)



Mic= Mioceno, Pli= Plioceno, Ple= Pleistoceno y Hlo= Holoceno.



Información técnica

Escala: 1:60000

Esférico: WGS 84

Proyección: UTM

Zona geográfica: 14N

Datum horizontal: WGS84

Fuentes de mapa base

Modelo digital de elevación: LIDAR

Datos geográficos vectoriales: INEGI

Referencias

- Arreygue Rocha, E., Garduño Monroy, V. H., Canuti, P., Casagli, N., Iotti, A., 2005. Riesgos geomorfológicos e hidrológicos en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Geothermia* 18 (1), 26–36.
- Arreygue Rocha, E., Garduño Monroy, V. H., Canuti, P., Casagli, N., Iotti, A., Chiesa, S., 2002. Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 19 (2), 91–106.
- Avellán, D.-R., Cardona-Melchor, S., Gómez-Vasconcelos, M. G., Macías, J. L., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G., Ruíz, M.-C., Benowitz, J., Cisneros-Máximo, G., Murcia, H., Pertón, M., Reyes-Agustín, G., García-Tenorio, F., 2024. The Nieve volcanic cluster: A Pliocene - Pleistocene lava dome cluster in the Michoacán-Guanajuato volcanic field (México). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 450, 108091, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108091>.
- Avellán, D.-R., Cisneros-Máximo, G., Macías, J. L., Gómez-Vasconcelos, M. G., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G., Robles-Camacho, J., 2020. Eruptive chronology of monogenetic volcanoes northwestern of Morelia – Insights into volcano-tectonic interactions in the central-eastern Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, México. *Journal of South American Earth Sciences* 100, 102554, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102554>.
- Avila-García, P., 2014. Urbanización, poder local y conflictos ambientales en Morelia. En: Vieyra, A., Larrazábal, A. (Eds.), *Urbanización, sociedad y ambiente. Experiencias en ciudades medias*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, pp. 121–149, <https://doi.org/10.22201/ciga.9786070244032p.2014>.
- Avila-Olivera, J. A., 2006. Hundimientos ocasionados por Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF) en la ciudad de Morelia, Mich., México. *Geothermia* 19 (2).
- Avila-Olivera, J. A., 2008. Evolución de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla, casos: Morelia, Michoacán y Celaya, Guanajuato: México. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, 232 pp.
- Ban, M., Hasenaka, T., Delgado Granados, H., Takaoka, N., 1992. K-Ar ages of lavas from shield volcanoes in the Michoacan-Guanajuato volcanic field, Mexico. *Geofísica Internacional* 31 (4), 467–473, <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1992.31.4.1367>.
- Bigoggero, B., Corona-Chávez, P., Garduño-Monroy, V. H., Carrara, E., Lanza, L., 2004. La “piedra de cantera” de Morelia desarrollo entre la tradición y la cultura: un acercamiento geológico y una alternativa. En: Garduño-Monroy, V.H. (Ed.), *Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental de la Región de Morelia*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 14–42.
- Bishop, M. A., 2009. A generic classification for the morphological and spatial complexity of volcanic (and other) landforms. *Geomorphology* 111 (1), 104–109, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.10.020>.
- Brilha, J., 2018. Geoheritage and Geoparks. En: Reynard, E., Brilha, J. (Eds.), *Geoheritage*. Elsevier, pp. 223–335.
- Broggi, A., Liotta, D., Giner Robles, J. L., Garduño-Monroy, V. H., Mennella, L., 2022. Definición del campo de esfuerzos-deformación y sismotectónica del sistema de fallas Morelia-Acambay, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2022.1.1688>.
- Buenrostro, O., Israde, I., 2003. La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del lago de Cuitzeo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 19 (4), 161–169.
- Cardona Melchor, S., 2015. Estudio vulcanológico del Complejo Volcánico El Águila y los domos La Taza-La Nieve-El Burro, centro-norte de Michoacán. Morelia, México. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 121 pp.
- Cisneros-Máximo, G., 2016. Estudio geológico-geomorfológico de los volcanes Tetillas- Quinceo, Morelia, Michoacán. Propuesta de cartografía Jerárquica. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 150 pp.
- CONANP, sf. Áreas Naturales Protegidas. Comisión Nacional de Areas Naturales Protegidas, <https://www.gob.mx/conanp>.
- Cárdenas, E., Fernández, V. E., 2013. Zonas arqueológicas de Michoacán. *Arqueología Mexicana* (123), 61–67.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics* 522-523, 122–149, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2006. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 57 (3), 343–378.
- Garduño-Monroy, V. H. (Ed.), 2004. *Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental de Morelia*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., 2001. Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
- Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., Chiesa, S., Israde, A. I., Rodríguez, T. G. M., Ayala, G. M., 1998. Las fallas geológicas y sísmicas de la Ciudad de Morelia y su influencia en la planificación del territorio.
- Garduño-Monroy, V. H., Corona-Chávez, P., Israde, A. I., Mennella, L., Arreygue-Rocha, E., Bigoggero, B., Chiesa, S., 1999. Carta geológica de Michoacán, 1:250,000. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Garduño-Monroy, V. H., Pérez-Lopez, R., Israde-Alcantara, I., Rodríguez-Pascua, M. A., Szykaruk, E., Hernández-Madrigal, V. M., García-Zepeda, M. L., Corona-Chávez, P., Ostroumov, M., Medina-Vega, V. H., García-Estrada, G., Carranza, O., Lopez-Granados, E., Chaparro, J. C. M., 2009. Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico. *Geofísica Internacional* 48 (3), 319–335, <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2009.48.3.29>.
- Grosse, P., Euillades, P. A., Euillades, L. D., van Wyk de Vries, B., 2013. A global database of composite volcano morphometry. *Bulletin of Volcanology* 76 (1), 784, <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0784-4>.
- Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Euillades, P. A., Kervyn, M., Petrinovic, I. A., 2012. Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models. *Geomorphology* 136 (1), 114–131, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.001>.
- Gómez-Arango, J., 2019. Estratigrafía y dinámica eruptiva de la secuencia de erupciones plinianas al noroeste de Morelia, Michoacán. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 120 pp.
- Gómez-Vasconcelos, M. G., Avellán, D. R., Soria-Caballero, D., Macías, J. L., Velázquez-Bucio, M. M., Jiménez-Haro, A., Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., Avila-Olivera, J. A., Figueroa-Soto, A. G., Cisneros-Máximo, G., Cardona-Melchor, S., 2021. Geomorphic characterization of faults as earthquake sources in the Cuitzeo Lake basin, central México. *Journal of South American Earth Sciences* 109, 103196, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103196>.
- Gómez-Vasconcelos, M. G., Garduño-Monroy, V. H., Macías, J. L., Layer, P. W., Benowitz, J. A., 2015. The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 301, 128–147, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.005>.
- Hasenaka, T., 1994. Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 63 (1), 13–31, [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90016-7).
- Hasenaka, T., Carmichael, I. S. E., 1985. The cinder cones of Michoacán—Guanajuato, central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 25 (1), 105–124, [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(85\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(85)90007-1).
- Head, J. W., Wilson, L., 1989. Basaltic pyroclastic eruptions: Influence of gas-release patterns and volume fluxes on fountain structure, and the formation of cinder cones, spatter cones, rootless flows, lava ponds and lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 37 (3), 261–271, [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(89\)90083-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(89)90083-8).
- Hernández, J., Vieyra, A., 2010. Riesgo por inundaciones en asentamientos precarios del periurbano. Morelia, una ciudad media mexicana: ¿El desastre nace o se hace? *Revista de geografía Norte Grande* (47), 45–62, <https://doi.org/10.4067/S0718-34022010000300003>.

- Hernández, A., 2019. "El Barreno", la pirámide ignorada. El Sol de Morelia, <https://www.elsoldemorelia.com.mx/local/el-barreno-la-piramide-ignorada-3862863.html>.
- Hernández-Bernal, M. D. S., Corona-Chávez, P., Solís-Pichardo, G., Schaaf, P., Solé-Viñas, J., Molina, J. F., 2016. Miocene andesitic lavas of Sierra de Angangueo: a petrological, geochemical, and geochronological approach to arc magmatism in Central Mexico. *International Geology Review* 58 (5), 603–625, <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1101356>.
- Hernández-Bernal, M. D. S., Corona-Chávez, P., Trujillo-Hernández, N., Macías-Romo, C., Moran-Zenteno, D. J., Jiménez-Haro, A., Poli, S., 2021. The Cuitzeo granitic xenolith: evidence of an Early Miocene magma plumbing system in central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2021.1.1591>.
- Hernández-Madrigal, V. M., Garduño-Monroy, V. H., Avila-Olivera, J. A., 2011. Atlas de peligros geológicos de la ciudad de Morelia, Mich.: estandarización del documento, actualización cartográfica de fallas geológicas de la zona urbana, y evaluación de tasas de hundimiento. Morelia, Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, H. Ayuntamiento de Morelia.
- Hernández-Madrigal, V. M., Garduño-Monroy, V. H., Ostroumov, M., 2004. Caracterización del proceso de remoción en masa de San Miguel del Monte, Morelia, Mich. En: Garduño-Monroy, V.H. (Ed.), *Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental de la Región de Morelia*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 199–224.
- Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN), 2020. Programa Municipal de Desarrollo Urbano Morelia 2020-2040. H. Ayuntamiento de Morelia, Michoacán, México.
- Instituto Nacional de Ecología (INE), 2004. El establecimiento de Geoparques en México: un método de análisis geográfico para la conservación de la naturaleza en el contexto del manejo de cuencas hídricas. Instituto Nacional de Ecología (INE).
- Israde-Alcántara, I., Buenrostro-Delgado, O., Garduño-Monroy, V. H., Hernández-Madrigal, V. M., López Granados, E., 2008. Problemática geológico-ambiental de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, norte del estado de Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 60 (2), 203–211.
- Israde-Alcántara, I., 1995. Bacini lacustri del settore centrale dell'Arco Vulcanico Messicano: Stratigrafia ed evoluzione sedimentaria basara sulle diatomie. Tesis de doctorado. Università degli Studi di Milano, 254 pp.
- Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., 1999. Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: the evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (central-western Mexico, Michoacán). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 151 (1), 209–227, [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00024-3).
- Jones, T. J., Houghton, B. F., Llewellyn, E. W., Parcheta, C. E., Höltgen, L., 2018. Spatter matters – distinguishing primary (eruptive) and secondary (non-eruptive) spatter deposits. *Scientific Reports* 8 (1), 9179, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27065-1>.
- Jácume-Paz, M. P., Pérez-Zárate, D., Prol-Ledesma, R. M., Rodríguez-Díaz, A. A., Estrada-Murillo, A. M., González – Romo, I. A., Magaña-Torres, E., 2019. Two new geothermal prospects in the Mexican Volcanic Belt: La Escalera and Agua Caliente – Tzitzio geothermal springs, Michoacán, México. *Geothermics* 80, 44–55, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.02.004>.
- Kereszturi, G., Németh, K., 2012. Monogenetic Basaltic Volcanoes: Genetic Classification, Growth, Geomorphology and Degradation. En: Németh, K. (Ed.), *Updates in Volcanology - New Advances in Understanding Volcanic Systems*. IntechOpen.
- Kshirsagar, P., Siebe, C., Guilbaud, M. N., Salinas, S., Layer, P. W., 2015. Late Pleistocene Alberca de Guadalupe maar volcano (Zacapu basin, Michoacán): Stratigraphy, tectonic setting, and paleo-hydrogeological environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 304, 214–236, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.003>.
- Lopez Granados, E. M. L., Bocco, G., Mendoza Cantú, M., 2001. Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia. *Investigaciones Geográficas* 1 (45), 56–76, <https://doi.org/10.14350/riig.59145>.
- Marquina, J. J., Mogollón, A., 2018. Niveles y escalas de levantamiento de información geográfica en sensores remotos. *Revista Geográfica Venezolana* 59 (1), 42–52.
- Martínez Reyes, J., Nieto Samaniego, A. F., 1990. Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México. *Revista - Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México* 9 (1), 33–50.
- Mauvois, R., 1977. Cabalgamiento miocénico (?) en la parte centromeridional de México. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista* 1 (1), 48–63.
- Menella, L., Garduño-Monroy, V. H., Giner Robles, J. L., Liotta, D., Brogi, A., 2022. Definición del campo de esfuerzos-deformación y sismotectónica del sistema de fallas Morelia-Acambay, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 39 (1), 82–99, <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2022.1.1688>.
- Osorio-Ocampo, S., Macías, J. L., Pola, A., Cardona-Melchor, S., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H., Layer, P. W., García-Sánchez, L., Perton, M., Benowitz, J., 2018. The eruptive history of the Pátzcuaro Lake area in the Michoacán Guanajuato Volcanic Field, central México: Field mapping, C-14 and 40Ar/39Ar geochronology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 358, 307–328, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.06.003>.
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V. H., Tibaldi, A., Vezzoli, L., 1991. Geologic map of the central sector of the Mexican volcanic belt, states of Guanajuato and Michoacan, Mexico, 1:300,000, MCH072. Map and chart series (Geological Society of America). Geological Society of America.
- Pola Villaseñor, A., Garduño Monroy, V. H., Díaz Salgado, C., Hernández Madrígala, V. M., 2006. Estudio geotérmico asociado a procesos de remoción en masa del parque Francisco Zarco (Ocolusen), Morelia (Michoacán, México). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 58 (2), 183–193.
- Pérez-Orozco, J. D., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H., Avellán, D. R., 2018. Felsic-intermediate magmatism and brittle deformation in Sierra del Tzirate (Michoacán-Guanajuato Volcanic Field). *Journal of South American Earth Sciences* 85, 81–96, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.04.021>.
- Ramírez-Urbe, I., Siebe, C., Salinas, S., Guilbaud, M.-N., Layer, P., Benowitz, J., 2019. 14C and 40Ar/39Ar radiometric dating and geologic setting of young lavas of Rancho Seco and Mazcuata volcanoes hosting archaeological sites at the margins of the Pátzcuaro and Zacapu lake basins (central Michoacán, Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 388, 106674, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106674>.
- Robles-Pereznegrón, M., 2023. Geología de la región de Morelia y sus áreas naturales protegidas: una perspectiva de la geoconservación. Tesis de licenciatura. Escuela Nacional de Estudios Superiores, Campus Morelia, UNAM, 205 pp.
- SECMA, sf. Áreas Naturales Protegidas. Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno de Michoacán, <https://medioambiente.michoacan.gob.mx/>.
- Soria-Caballero, D. C., Garduño-Monroy, V. H., Alcalá, M., Velázquez-Bucio, M. M., Grassi, L., 2019. Evidence for quaternary seismic activity of the La Alberca-Teremendo fault, Morelia region, Trans-Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 36 (2), 242–258.
- Soria Caballero, D. C., Gómez Calderón, D. A., Garduño Monroy, V. H., 2021. Análisis paleosísmico de la falla El Malpaso - El Salto, norte de Michoacán, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 73 (2).
- Sumner, J. M., Blake, S., Matela, R. J., Wolff, J. A., 2005. Spatter. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 142 (1), 49–65, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.10.013>.
- Suter, M., 2016. Structure and Holocene Rupture of the Morelia Fault, Trans-Mexican Volcanic Belt, and Their Significance for Seismic-Hazard Assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America* 106 (5), 2376–2388, <https://doi.org/10.1785/0120160092>.
- Sánchez-Sepúlveda, H. U., Urquijo Torres, P. S., 2014. La Expansión urbana en el suroriente de Morelia. Una revisión histórico-ambiental, 1885-2010. En: Vieyra, A., Larrazábal, A. (Eds.), *Urbanización, sociedad y ambiente. Experiencias en ciudades medias*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, pp. 13–45, <https://doi.org/10.22201/ciga.9786070244032p.2014>.
- Trujillo-Hernández, N., Garduño-Monroy, V. H., Jiménez-Haro, A., Gómez-Álvarez, F., Nájera-Blas, S. M., Israde-Alcántara, I., Layer, P., 2022. Estratigrafía volcánica de la porción suroeste del Lago de Cuitzeo y su relación con la formación de la Caldera tipo Graben de Chucándiro. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 39 (1), 100–115, <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2022.1.1689>.

- Trujillo-Hernández, N., 2017. Estudio geológico, geoquímico y mineralógico de las secuencias volcánicas de la porción suroeste del Lago de Cuitzeo, Michoacán, ligadas a la zona geotérmica de San Agustín del Maíz. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, 110 pp.
- UNESCO, 2024. World Heritage List. UNESCO, <https://whc.unesco.org/en/list/>.
- Valentine, G., Connor, C., 2015. Basaltic Volcanic Fields. En: Sigurdsson, H. (Ed.), *The Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, pp. 423–439, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00023-7>.
- Vargas-Urbe, G., 2014. Del proyecto de ciudad a la ciudad sin proyecto: el desarrollo histórico territorial de la traza urbana de la ciudad de Valladolid-Morelia 1541-2009. En: Veyra, A., Larrazábal, A. (Eds.), *Urbanización, sociedad y ambiente. Experiencias en ciudades medias*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, pp. 47–85, <https://doi.org/10.22201/ciga.9786070244032p.2014>.

This article accompanies the following material:

- Static map: [10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.245](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.245)
- Interactive map: [10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.246](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.246)
- Suppl. material 1: [10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.248](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.248)
- Suppl. material 2: [10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.249](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.249)
- Suppl. material 3: [10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.250](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.250)
- Suppl. material 4: [10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.251](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.251)
- Suppl. material 5: [10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.252](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2024.1.111.252)