



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización de la geología y
del geopatrimonio de la zona
residencial Jardines en la
Montaña y el Bosque de Tlalpan,
Ciudad de México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Eduardo Rodríguez Osnaya

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Marie-Noëlle Guilbaud



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

Con la culminación de este proyecto, cierro un ciclo importante en mi formación académica y personal. Estos estudios se realizaron en el marco de los proyectos (1) SEP-CONAHCYT-ANUIES-ECOS Francia no. 321145 (2022-2025). "Construcción del sentido a través del patrimonio natural", (2) UNESCO IGCP 692 (2019-2024). "Geoheritage for geohazards and sustainable development through capacity building for local communities in developing countries", y (3) CONAHCYT CBF2023-2024-1049 (2024-2026). "Proyecto Geocity: Geopatrimonio del sur de la Ciudad de México y su relación con aspectos biológicos y socioculturales." Además, recibí una beca y los análisis se pagaron por parte del proyecto DGAPA-PAPIIT IN111424 (2024-2026). "Volcanismo monogenético y sociedad: estudio de la actividad pasada, evaluación del peligro y geopatrimonio"

Por otra parte, quiero agradecer a la Dra. Marie-Noëlle Guilbaud por la paciencia, conocimientos, y apoyo en todo momento en la realización de la tesis. Por enseñarme a valorar y conservar la geodiversidad y difundir siempre el conocimiento a las personas. A siempre mostrar una actitud positiva ante las adversidades personales que pueden afectar nuestra investigación o el día a día. Por los consejos, y las nuevas habilidades que desarrollé en la realización de la tesis. Le estaré profundamente agradecido por siempre.

Agradezco también a las Dras. Pilar y Silke, por invitarme, y participar en excursiones geológicas que tuvieron el propósito de enseñar sobre nuestro bio-geopatrimonio. Aprendí bastante, además de contagiarme del cariño y aprecio que muestran al enseñar sobre la riqueza natural de los pedregales.

De igual forma, externo agradecimiento a Herminia Torres y Korina Calderón por su apoyo y disposición en todo momento para la realización del trabajo de campo. Por compartirme todos sus logros en la rehabilitación del parque Viaje a la Naturaleza y considerarme parte de su comunidad al invitarme a los eventos organizados por el "Comité de Ecología" de Jardines en la Montaña.

Agradezco al personal del "Bosque de Tlalpan" en el proceso administrativo y logístico para la obtención de muestras, así como su apoyo en todo momento para las excursiones geológicas.

Agradezco mucho a mis amigos César y Erick "los vatos" por su compañía y amistad. Por su apoyo durante las clases, por desvelarnos haciendo series, trabajos, o proyectos. Por compartir los mejores momentos de la universidad con ustedes. También por los consejos, y palabras sabias que me ayudaron a superar las adversidades ¡¡¡Muchas gracias vatos!!!

Estaré siempre agradecido con mi mamá Gloria Osnaya por apoyarme incondicionalmente durante toda la carrera. Por haber logrado con mucho esfuerzo y cariño que pudiera estudiar una carrera universitaria. Por siempre guiarme, aconsejarme, y llenarme de cariño. Te quiero mucho mamá. También agradezco a mi hermana Cruz Yael, por darme consejos en la realización de los mapas y figuras. Por decirme que se ven bonitos. Por siempre tener un apoyo incondicional cuando me sentía estresado. Por otra parte, a mi abuelita Andrea Sandoval, por siempre recibirme con un plato de comida al llegar de la universidad, o cuando regresaba de prácticas de campo. También por sus consejos, y motivación que me transmitía para que terminara la tesis.

Por último, agradezco a todas aquellas personas que participaron en la realización de mi tesis. Amigos y familiares que estuvieron pendientes de mi avance y preguntaban mucho ¿cómo va tu tesis? También, un agradecimiento en memoria de mi padre Abelardo Rodríguez, que, en la culminación de mi tesis, partió al cielo. Me enseñó que somos dueños de nuestra vida y como decidimos vivirla, y que muchas veces no podremos cambiar a las personas, pero no por ello dejaremos de quererlas. Gracias papá.

Índice

Índice	1
Resumen	5
Abstract	6
I.- Introducción.....	7
1.1 Geopatrimonio y comunidades.....	7
1.2 Geopatrimonio urbano.....	8
1.3 Caracterización y evaluación de un geositio	8
1.4 Importancia de la geoconservación para la sociedad	9
1.5 Participación de la comunidad en la valoración y conservación del geopatrimonio.....	10
2.1 Área de estudio	12
II.- Contexto geológico.....	13
2.1 La Faja Volcánica Transmexicana	13
2.2 La cuenca de México y sierras circundantes.....	14
2.2.1 Sierra de las Cruces	15
2.2.2 Sierra Nevada.....	15
2.2.3 Sierra Chichinautzin	16
2.3 Estudios previos sobre el área de estudio.....	17
2.3.1 Mapas existentes.....	17
2.3.2 La erupción del volcán Xitle.....	21
2.3.3 El geopatrimonio del Xitle.....	22
III.- Objetivo del estudio y metodología	24
3.1 Metodología.....	24
3.1.1 Recopilación bibliográfica.....	24
3.1.2 Observación de fotografías históricas	24
3.1.3 Elaboración de cartografía mediante software.....	26
3.1.4 Geología de campo	28
3.1.5 Análisis petrográfico de láminas delgadas y análisis geoquímico.....	29
IV.- Resultados.....	31
4.1 Cartografía del área.....	31
4.2 Descripciones de formaciones	33
4.2.1 Kipukas.....	33
4.2.2 Lavas del Xitle	35
4.3 Petrografía.....	36
5.3.1 Lava Xitle.....	36
4.3.2 Kipuka Viaje a la Naturaleza	37
4.3.3 Kipuka Zacayuca	37

4.4 Geoquímica	42
4.4.1 Elementos mayores.....	42
4.4.2 Tierras raras	43
V.- Interpretación y discusión	45
5.1 Reconstrucción vulcanológica	45
5.3 Valor del área para el geopatrimonio	48
5.3.1 Valor científico	48
5.3.2 Valor arqueológico.....	50
5.4 Valor educativo y propuesta de difusión del valor del área	51
VI.-Conclusiones	56
VII.-Referencias.....	57
VIII.-Anexo.....	62

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa conceptual de los diferentes términos que se relacionan con el geopatrimonio..	8
Figura 2 Mapa de la zona de estudio	12
Figura 3 Mapa de la Faja Volcánica Trans-mexicana (FVTM) con la ubicación de la Sierra Chichinautzin.....	13
Figura 4 Mapa de la geología de la Cuenca de México. y Faja Volcánica Trans-mexicana (FVTM).	14
Figura 5 Cartografía morfológica del área de Cuicuilco y alrededores antes y después de la erupción del Xitle elaborada por Córdova y cols (1994).	18
Figura 6 Mapa de los flujos y unidades volcánicas del Xitle y área alrededor (Cervantes y Molinero, 1995).....	19
Figura 7 Cartografía de las diferentes unidades lávicas del Volcán Xitle y distribución de productos volcánicos de la Sierra Chichinautzin	20
Figura 8 Mapa de simulación de coladas lávicas del Xitle, presentado por Sandoval (2021).	21
Figura 9 Observación y análisis de fotografías aéreas históricas	26
Figura 10 Fotografía aérea en proceso de georreferenciación.	27
Figura 11 Mapa base del área de estudio. Construido a partir de un mosaico de imágenes aéreas de los años 1941 y 1973.	28
Figura 12 Mapa geológico del área de estudio, con la ubicación de los sitios de observación y muestreo.....	31
Figura 13 Representación gráfica de un Kipuka..	32
Figura 14 Fotografías de campo de productos volcánicos del parque Viaje a la Naturaleza (V.N).	34
Figura 15 Fotografías de campo de flujos de lava del volcán Xitle en el área de estudio. cuevas	36
Figura 16 Fotografías representativas de láminas delgadas de la formación Lava Xitle..	38
Figura 17 Fotografías de láminas delgadas de formaciones de Kipuka de Viaje a la Naturaleza y Zacayuca.	39
Figura 18 Diagrama de SiO ₂ vs Alkalies total (TAS; Le Bas y cols., 1986).	43
Figura 19 Diagrama de Tierras raras.	44
Figura 20 Representación gráfica de la sucesión de eventos volcánicos involucrados en la zona de estudio.	47

Figura 21 Propuesta de Geosenderos en la residencial Jardines en la Montaña (JM) y el Bosque de Tlalpan (BT)..... 53

Índice de tablas

Tabla 1. Criterios de evaluación para geositos potenciales	9
Tabla 2. Datos de identificación de geositos	9
Tabla 3. Conceptos que considerar para la geoconservación..	10
Tabla 4 . Error porcentual calculado a partir de los datos proporcionados por el laboratorio Actlabs en el certificado de análisis.....	30
Tabla 5 Análisis petrográfico de láminas delgadas de de varias unidades de la formación Lava Xitle.....	40
Tabla 6 Análisis petrográfico de láminas delgadas de muestras de las formaciones de Kipuka de Viaje a la Naturaleza (V.N.) y Zacayuca, además de la pirámide Tenantongo	41
Tabla 7 Elementos del geopatrimonio volcánico planteados por Németh (2023) aplicados en la zona de estudio	49
Tabla 8 Descripción resumida de las paradas del Geosendero propuesto para la residencial Jardines en la Montaña	54
Tabla 9 Descripción resumida de las paradas del Geosendero propuesto para el ANP “Bosque de Tlalpan”	55

Anexos

Anexo 1. Elementos mayores analizados de la formación Lava Xitle (normalizados).....	62
Anexo 2. Elementos mayores analizados de la formación kipuka Viaje a la Naturaleza (normalizados)	62
Anexo 3. Elementos mayores analizados de la formación kipuka Zacayuca (normalizados).....	62
Anexo 4. Elementos traza (Tierras Raras) analizados de la formación Lava Xitle	63
Anexo 5. Elementos traza (Tierras Raras) analizados de la formación kipuka Viaje a la Naturaleza..	63
Anexo 6. Elementos traza (Tierras Raras) analizados de la formación kipuka Zacayuca	63

Resumen

El sur de la Ciudad de México se extiende sobre el campo volcánico de la Sierra Chichinautzin que es notable por su relevancia geológica. Contiene más de 200 aparatos volcánicos de tipo monogenético, datados en el Pleistoceno y Holoceno. El volcán Xitle, que significa "ombbligo" en náhuatl, es el volcán fechado más joven del campo (1700 años antes del presente). Los flujos de lava del Xitle están mayormente cubiertos por la mancha urbana, sin embargo, todavía es posible encontrar sitios donde las coladas de lava son visibles, los cuales representan los últimos espacios naturales en la ciudad y geositios potenciales.

El objetivo de este estudio es caracterizar los afloramientos de roca y otros materiales volcánicos en un área de estudio que incluye la zona residencial Jardines en la Montaña y el Área Natural Protegida Bosque de Tlalpan ubicados en el norte de la Alcaldía Tlalpan en la Ciudad de México, con el fin de identificar el valor que presentan estos afloramientos para la conservación del geopatrimonio de la población local. En estas zonas, se identificaron varios flujos de lava del Volcán Xitle que rodean formaciones geológicas más antiguas. Estos afloramientos son conocidos como "kipuka", un término hawaiano que se utiliza en vulcanología para nombrar áreas de terreno rodeadas por coladas de lava más jóvenes. En este contexto, se han identificado dos tipos de kipuka que se distribuyen en cinco "islas". El primer tipo, nombrado como Viaje a la Naturaleza, principalmente aflora en la colonia Jardines en la Montaña en un parque con este nombre. Está compuesto por grandes bloques de andesita densa de color gris oscuro, con un nivel de alteración avanzado. Estos bloques contienen fenocristales de olivino, plagioclasa y piroxeno inmersos en una matriz microcristalina. El kipuka Zacayuca se ubica en el Área Natural Protegida Bosque de Tlalpan y representa un antiguo domo compuesto por una roca cristalina silícica con minerales de plagioclasa y anfíbol. Se encuentra cubierto por un depósito de pómez blanco, con un espeso suelo en medio, conocido como pómez Bosque de Tlalpan. Por último, el cerro Zacatépetl en la colonia Jardines del Pedregal representa también un kipuka, compuesto posiblemente por un depósito de avalancha vinculado al volcán Ajusco. Por otra parte, el área de estudio contiene una notable geodiversidad, asociada con biodiversidad, y elementos culturales destacables como vestigios arqueológicos y actividades al aire libre. A pesar del alto valor de esta área, hacen falta más estudios sobre los elementos geológicos, en particular las formaciones más antiguas. Cabe notar que existen algunas medidas de conservación de los sitios, sin embargo, estos merecen incrementarse ante la creciente presión urbana.

Abstract

The south of Mexico City extends over the Sierra Chichinautzin volcanic field which is remarkable for its geological relevance. It contains about 200 volcanic devices of monogenetic type, dated to the Pleistocene and Holocene. The Xitle volcano, which means "ombbligo" in Nahuatl, is the youngest dated volcano in the field (1700 years before present). The Xitle lava flows are mostly covered by the urban sprawl, however, it is still possible to find sites where lava flows are visible, which represent the last natural spaces in the city and potential geosites.

The objective of this study is to characterize the rock outcrops and other volcanic materials in two a study area that includes the residential area Jardines en la Montaña and the Natural Protected Area Bosque de Tlalpan located in the northern part of the Tlalpan borough in Mexico City, in order to identify the value of these outcrops for the conservation of the geoh heritage of the local population. We identified several lava flows from the Xitle Volcano which surround older geological formations known as "kipuka", a Hawaiian term that is used in volcanology to name areas of land surrounded by younger lava flows. In this context, two types of kipuka have been identified and are distributed in five "islands". The first type, named Viaje a la Naturaleza, mainly outcrops in the Jardines en la Montaña in a park of the same name. It is composed of large blocks of dense, dark gray andesite with an advanced level of alteration. These blocks contain phenocrysts of olivine, plagioclase and pyroxene immersed in a microcrystalline matrix. The Zacayuca kipuka is located in the Bosque de Tlalpan Protected Natural Area and represents an ancient dome composed of a silicic crystalline silicic rock with plagioclase and amphibole minerals. It is covered by a white pumice deposit named as the Bosque de Tlalpan pumice, with a thick soil in between. Finally, the Zacatepetl hill in the Jardines del Pedregal neighborhood also represents a kipuka possibly composed of an avalanche deposit linked to the Ajusco volcano. On the other hand, the study area contains a remarkable geodiversity, associated with biodiversity, and remarkable cultural elements such as archaeological remains and outdoor activities. Despite its high value, more studies on geological elements, in particular older formations, are needed. It should be noted that some protection measures are in place, however, these deserve to be increased in the face of increasing urban pressure.

I.- Introducción

1.1 Geopatrimonio y comunidades

La diversidad natural incluye elementos bióticos y abióticos que forman respectivamente la biodiversidad y la geodiversidad (Brilha, 2016). De acuerdo con Gray (2018), la palabra y el significado de **geodiversidad** se establecieron en 1993, un año después de que se llevara a cabo la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro. El concepto de geodiversidad se define como la gama natural de características geológicas (rocas, minerales, y fósiles), geomorfológicas (formas del terreno y topografía), edáficas (suelos) e hidrológicas (lagos y ríos) (Brilha, 2018). A su vez, los elementos de la geodiversidad pueden tener distintos tipos de valores, por ejemplo, económicos, científicos, culturales, y estéticos (Brilha, 2018).

El patrimonio geológico, o **geopatrimonio**, se refiere a la presencia *in situ* de elementos de la geodiversidad con alto valor científico (Brilha, 2016). Sin embargo, cabe resaltar que el término geodiversidad es de valor neutro que describe la variedad de fenómenos abióticos de la Tierra (Brilha, 2018). A comparación, geopatrimonio es un término que se utiliza para identificar aquellos elementos específicos de la geodiversidad que se seleccionan para la **geoconservación** cuyo objetivo es la conservación de los procesos geomorfológicos y geológicos, así como suelos y rocas (Brilha, 2018; Gray, 2018). Por otra parte, el Diccionario del Español de México (2023) define **patrimonio** como “el conjunto de bienes que posee una persona, una institución, un país, etc, o que alguien recibe o hereda de sus antepasados”. Por lo que, el término geopatrimonio puede ser apropiado para definir a estos rasgos modernos, así como a otros mucho más antiguos que han sobrevivido hasta nuestros días, aunque no se ajuste estrictamente al uso tradicional del significado de patrimonio (Gray, 2018).

Como se ha mencionado anteriormente, el geopatrimonio puede ser caracterizado mediante el valor científico que poseen los elementos que constituyen a la geodiversidad, y estos pueden diferenciarse mediante su ubicación, ya sea *in situ* (**geositio**), o *ex situ* (minerales, fósiles y rocas desplazados de su lugar natural de ocurrencia disponibles en colecciones de museos para la investigación) (Brilha, 2016).

Palacio (2014) definió a los **geositios** como lugares que presentan un interés geológico y geomorfológico y pueden ser un medio para identificar el geopatrimonio y promover su apreciación basándose en su valor científico, ejemplaridad, rareza y potencial tanto educativo como turístico.

La figura 1 representa un mapa conceptual elaborado por Brilha (2016) sobre la clasificación de elementos bióticos (biodiversidad) y abióticos (geodiversidad) que constituyen a la diversidad natural y cómo éstos se dividen y subdividen de acuerdo con su valor (científico, cultural, educativo, etc.), ubicación en el espacio (*in situ/ex situ*), y sitios que son finalmente seleccionados para su geoconservación.

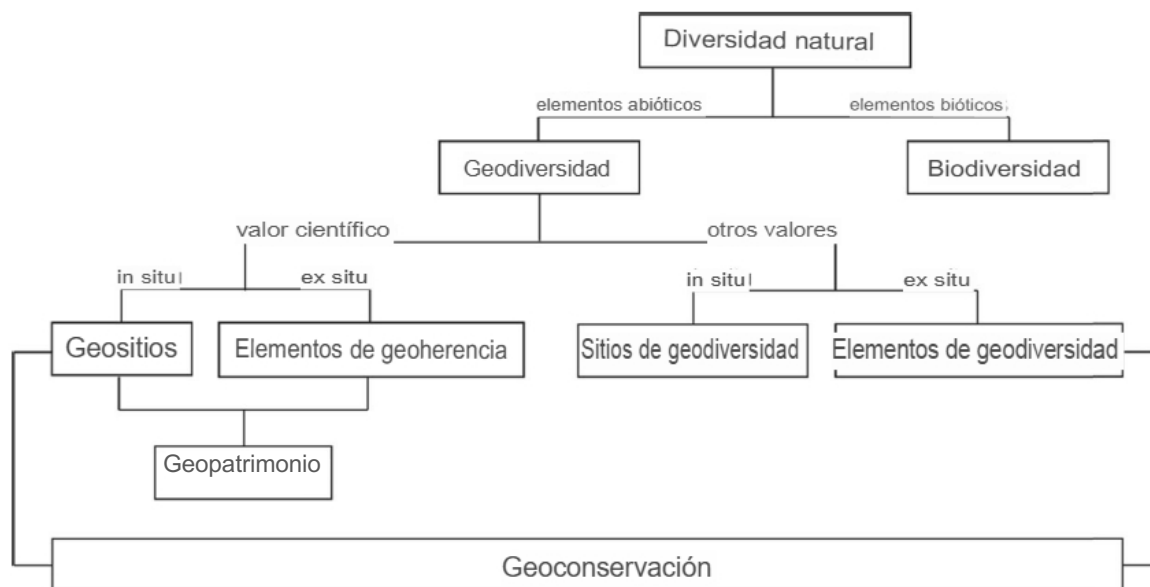


Figura 1. Mapa conceptual de los diferentes términos que se relacionan con el geopatrimonio. Modificado de Brilha (2016).

1.2 Geopatrimonio urbano

Los geositios se han identificado principalmente en zonas rurales, abiertas o al aire libre (Palacio, 2014). Sin embargo, también pueden encontrarse sitios de interés geológico en zonas urbanas (Palacio, 2014; Vereb y cols., 2020; Guilbaud y cols., 2021). Los geositios urbanos abarcan zonas que todavía conservan características geológicas y geomorfológicas originales dentro de la ciudad, así como edificios, complejos arqueológicos, arquitectónicos, escultóricos, canteras, calles y centros culturales construidos a partir de rocas (cantera) o desarrollados en condiciones geológicas y geomorfológicas particulares (Palacio, 2014).

De acuerdo con Palacio (2014) un geositio urbano puede definirse como simplemente un lugar de interés geológico o geomorfológico situado en una zona urbana o un geositio fundamentado en procesos geológicos y geomorfológicos representativos relacionados con el desarrollo de la propia ciudad. Por ejemplo, los edificios, monumentos y otros elementos construidos por el hombre, aunque no formen parte estrictamente del patrimonio geológico, también pueden utilizarse para la promoción de los valores geológicos, contribuyendo a la divulgación de los conocimientos de las Ciencias de la Tierra y así obtener el aprecio del público. Por ejemplo, Guilbaud y cols. (2021) describieron geositios al sur de la ciudad de México tal como la Cantera Oriente en el campus de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyo valor científico es exponer los flujos de lava correspondientes al Volcán Xitle.

1.3 Caracterización y evaluación de un geositio

De acuerdo con Prosser y cols. (2018), el criterio y el enfoque que son utilizados para evaluar el valor de un geositio variarán en función de una serie de factores, incluidos los objetivos y el alcance del ejercicio de selección del tamaño de la zona de estudio. En primer lugar, está el criterio científico que puede incluir elementos de la petrología, estratigrafía, paleontología, geomorfología, mineralogía, y geología estructural. En segundo lugar, está el nivel de importancia que tiene el potencial geositio, ya sea local, nacional o internacional. Por último, está el tamaño e idoneidad del sitio para usos particulares, por ejemplo, investigación científica, educación, y geoturismo.

Brilha (2016) propuso la siguiente metodología para la evaluación e inventario de geositios:

1. La primera etapa consiste en delimitar la zona de estudio y la creación de una lista de geositios potenciales generada por diversos especialistas en Ciencias de la Tierra.
2. La segunda etapa se fundamenta en trabajo geológico de campo donde se identificará y caracterizará a los sitios establecidos en esta lista, así como la identificación de nuevos sitios que no han sido registrados, o en su defecto, remover de la lista los sitios que no cumplen con los requerimientos para establecerse como geositios considerando la **representatividad, integridad, rareza, y conocimiento científico**, cuya definición se presenta en la Tabla 1.
3. La tercera etapa consiste en generar la lista definitiva de geositios establecidos y reconocidos para la zona de estudio planteada en la primera etapa. Es importante remarcar que cada geositio requiere de datos de identificación que se recopilan en la Tabla 2.

Tabla 1. Criterios de evaluación para geositios potenciales. Elaborado a partir de Brilha (2016)

Representatividad	Se refiere a la idoneidad del geositio para ilustrar un proceso o rasgo geológico que aporte una contribución significativa a la comprensión del tema geológico, proceso, rasgo o marco geológico.
Integridad	Se relacionada con el estado de conservación actual del geositio, teniendo en cuenta tanto los procesos naturales como antrópicos
Rareza	Número de geositios en la zona de estudio que presentan características geológicas similares.
Conocimiento científico	Basado en la existencia de datos ya publicados sobre el geositio.

Tabla 2. Datos de identificación de geositios. Elaborada a partir de Brilha (2016)

1.	Nombre del geositio (para facilitar una identificación rápida y fácil de todos los geositios, el nombre de un geositio debe incluir la característica geológica principal y una referencia geográfica)
2.	Localización geográfica (coordenadas GPS)
3.	Propietario (público o privado)
4.	Protección jurídica (si existe)
5.	Accesibilidad
6.	Vulnerabilidad
7.	Descripción geológica
8.	Las características geológicas más notables que justifican la necesidad de considerar la ocurrencia como un geositio
9.	Marco geológico (si es necesario)
10.	Limitaciones eventuales a su uso científico (necesidad de permiso para el muestreo, restricciones de acceso o dificultades por el clima)

1.4 Importancia de la geoconservación para la sociedad

De acuerdo con Prosser y cols. (2018), una vez determinado el valor de un geositio, es posible realizar un análisis de las necesidades de conservación, esto implica la evaluación del **uso, carácter** y la **amenaza/sensibilidad** (Tabla 3). Esta evaluación puede realizarse en el orden que mejor se adapte a las prioridades y circunstancias locales (Prosser y cols., 2018)

Tabla 3. Conceptos que considerar para la geoconservación. Elaborado a partir de Prosser (2018).

Uso	Investigación científica, educación, geoturismo, actividades culturales etc.
Carácter	El carácter de un geositio está relacionado con su naturaleza física o forma, su situación en el paisaje, la extensión del recurso geológico/geomorfológico que contiene y la facilidad con la que se puede renovar el recurso si se recoge o se retira.
Amenaza/sensibilidad	Las amenazas más comunes para la conservación de los geositios surgen tanto de la actividad antropogénica como de los procesos naturales. La sensibilidad de un geositio a estas amenazas dependerá en gran medida del uso del lugar y de su carácter , siendo probable que lugares de características similares sean sensibles a amenazas similares.

La importancia de conservar el geopatrimonio para la ciencia es el registrar los acontecimientos más importantes de la historia de la Tierra, incluida la evolución de los climas y la vida, por lo que la existencia de geositios accesibles que presenten características y procesos bien expuestos, relativamente intactos, o que funcionen de forma natural, es esencial para el estudio científico (Prosser y cols., 2018). Por otra parte, la sociedad se ve beneficiada mediante la promoción del geoturismo apoyando la formación educativa de la población nacional, e internacional, así como un incremento en el desarrollo económico de comunidades involucradas en los geositios (Mata-Perelló y cols., 2018). Además, la conservación de éstos tiene una gran causa y es la prestación, por parte de la geodiversidad y biodiversidad, de una serie de servicios ecosistémicos indispensables para el ser humano (Mata-Perelló y cols., 2018).

Habida cuenta de la importancia del patrimonio geológico en la sociedad, es evidente la necesidad de actuar para conservar los geositios para que las generaciones actuales, y futuras, puedan seguir admirando (Prosser y cols., 2018).

1.5 Participación de la comunidad en la valoración y conservación del geopatrimonio

La necesidad de establecer vínculos entre las comunidades y su patrimonio geológico tiene el fin de generar aprecio y apoyo a su geoconservación, donde esta relación puede establecerse de muchas maneras, pero su objetivo principal es unir cultura y naturaleza, destacando los vínculos culturales que existen entre las personas, a menudo locales, la geología, y los paisajes con los que interactúan diariamente (Prosser, 2019). También, el patrimonio geológico puede aportar beneficios sociales, medioambientales y económicos a las comunidades contribuyendo a la mejora de la calidad de vida de los habitantes y el fortalecimiento del sentimiento de pertenencia al territorio (Mata-Perelló y cols., 2018).

Mata-Perelló y cols. (2018) afirmaron que la participación de la comunidad es mayormente activa y está inmersa en la toma de decisiones respecto a la geoconservación dado que las comunidades se consideran guardianes **de su patrimonio**, y que es considerado un importante capital territorial donde forma parte de la historia y la cultura tradicional de la misma comunidad. Para lograr dicho propósito, se desarrollan proyectos tales como la creación de **geoparques de la UNESCO**, los cuales pretenden salvaguardar y gestionar de forma sostenible los paisajes y las formaciones geológicas que son testigos clave de la historia de la vida en la Tierra, estimulando así el desarrollo económico y cultural regional de una manera sostenible (Avelar, 2015).

Para la UNESCO (2023) un **geoparque** “utiliza el patrimonio geológico, en conexión con todos los demás aspectos del patrimonio natural y cultural de la zona, para mejorar la concientización y la comprensión de cuestiones clave a las que se enfrenta la sociedad, como el uso sostenible de los recursos naturales, la mitigación de los efectos del cambio climático y la reducción de los riesgos relacionados con los desastres naturales”.

Las comunidades, además de ser protectores de su geopatrimonio, también tienen participación en la construcción de metodologías de conservación, sirviendo como el primer acercamiento en el conocimiento de identificar cuáles son sus amenazas naturales y antropogénicas, así como las actividades económicas y culturales que se realizan (Avelar, 2015).

Otros beneficios importantes que tienen los geoparques para la comunidad es conservar un medio ambiente sano, educar a residentes y visitantes sobre las Ciencias de la Tierra, y fomentar un desarrollo económico local sostenible mediante el geoturismo (Avelar, 2015).

2.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra al sur de la Ciudad de México, entre las alcaldías Tlalpan y Coyoacán (Figura 2). Representa un área aproximada de 10 km² ubicado principalmente en las colonias de Jardines del Pedregal, Miguel Hidalgo, y Jardines en la Montaña. A su vez, el área está atravesado por avenidas principales como el Boulevard Adolfo Ruíz Cortines (Periférico Sur), Carretera Picacho-Ajusco, e Insurgentes Sur. En el sur del área, se encuentra el Área Natural Protegida (ANP) "Bosque de Tlalpan".

El trabajo de campo se realizó en la colonia "Jardines en la Montaña" y el "Bosque de Tlalpan", es por esto, que en las secciones consecutivas se abordará el contexto geológico y antecedentes con respecto a estas dos áreas.

De acuerdo con el Programa Integrado Territorial para el Desarrollo Social 2001-2003 (recuperado de <http://www.sideso.cdmx.gob.mx/> el 10 de agosto de 2023) la colonia Jardines en la Montaña contempla un área aproximada de 240 hectáreas, donde habitan cerca de 4,131 personas en 943 unidades habitacionales. A su vez, el "Bosque de Tlalpan" es un ANP con una extensión de 252 hectáreas (bosquetlalpan.org.mx, visitado el 10 de agosto del 2023), que se sitúa directamente al sur de la colonia Jardines de la Montaña. Originalmente, el Bosque de Tlalpan pertenecía a los dueños de la antigua fábrica de papel Loreto y Peña Pobre que usaron este espacio para plantar árboles de interés para la fabricación de celulosa (Lenz, 2010). En 1968, el gobierno de la Ciudad de México adquirió el sitio para establecer un parque con la implementación de un zoológico que funcionó hasta 1988. Posteriormente, el bosque fue reacondicionado para la recreación y las actividades deportivas (bosquetlalpan.org.mx, visitado el 10 de agosto del 2023).



Figura 2. Mapa de la zona de estudio. Construido a partir de mapa base Esri Standar sobre modelo digital de elevación clave e14a39e3 INEGI

II.- Contexto geológico

2.1 La Faja Volcánica Transmexicana

La Ciudad de México se encuentra dentro de la **Faja volcánica Transmexicana (FVTM)** o **Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM)** es un arco volcánico de edad perteneciente al neógeno y se considera el más grande de Norteamérica (Ferrari y cols., 2012) (figura 3). Su orientación va de este-oeste en el centro de México, tiene una longitud aproximada de 1000 km y cubre un área de 160,000 km² (Chesley y cols., 2002; Ferrari y cols., 2012)

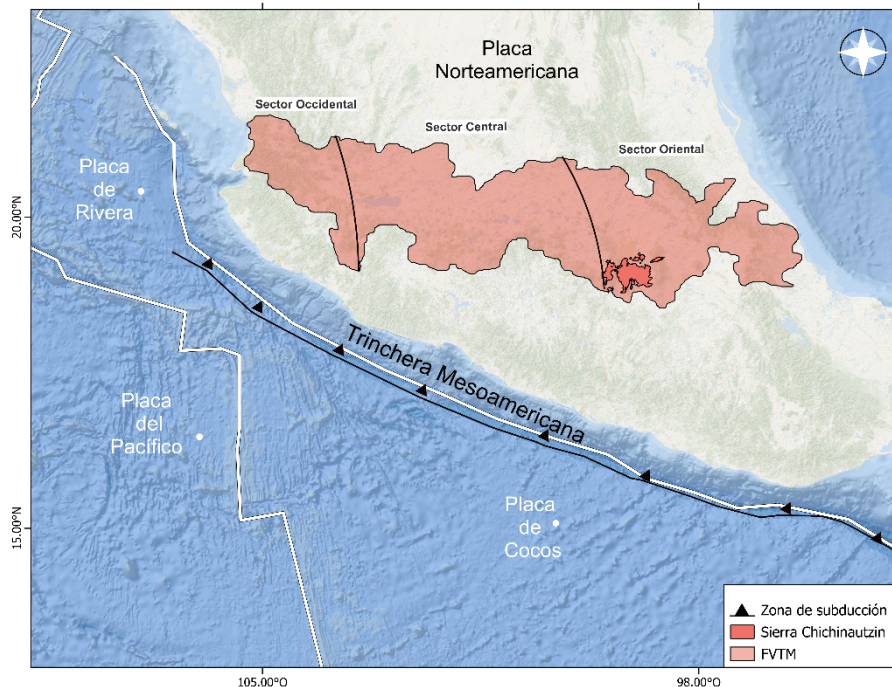


Figura 3. Mapa de la Faja Volcánica Trans-mexicana (FVTM) con la ubicación de la Sierra Chichinautzin. Polígono de la FVTM fue elaborado a partir de Gómez-Tuena y cols. (2006). Sectores a partir de Ferrari (2000).

La FVTM se desarrolló debido a la subducción de las Placas Rivera y Cocos debajo de la Placa Norteamericana a lo largo de la trinchera de Acapulco (figura 3, Demant, 1978; Ferrari, 2000). Se encuentra sobre un basamento heterogéneo formado de diferentes terrenos tectonoestratigráficos que varían en cuanto a edad y litología (Ferrari y cols., 2012).

De acuerdo con Ferrari (2000), la FVTM se divide en tres principales sectores, tomando en cuenta el tipo de vulcanismo y composición química:

1. Occidental: parte norte del bloque Jalisco y límite meridional de la Sierra Madre Occidental
2. Central: entre el rift de Colima y el sistema de fallas Taxco-Querétaro
3. Oriental: al oriente del sistema Taxco-Querétaro; incluye la Sierra Chichinautzin donde se ubica el área de estudio.

Conforme a Gómez-Tuena y cols. (2006), la historia geológica de la FVTM se puede seccionar en 4 eventos geológicos:

1. Instauración de un arco volcánico de composición intermedia en el Mioceno
2. Un evento máfico del Mioceno tardío
3. Evento silíceo a finales del Mioceno
4. La reinstauración de un arco volcánico de composición variable a partir del Plioceno tardío

2.2 La cuenca de México y sierras circundantes

La cuenca de México es una depresión volcanotectónica que se encuentra en el sector oriental de la FVTM (Enciso-De la Vega, 1992; Arce y cols., 2017; Arce y cols., 2019) (Figura 4). Se caracteriza por ser una cuenca de tipo endorreica que presenta dos elementos geomorfológicos principales: la parte de mayor elevación como sierras, lomeríos y cerros y la de menor elevación como son valles y planicies (Enciso-De la Vega, 1992). La cuenca de México se sitúa a una altura aproximada de 2,230 msnm (Orozco y cols., 2002). Se encuentra rodeada de sierras volcánicas: al oeste está delimitada por la Sierra de las Cruces, al oriente por la Sierra Nevada, y al sur por la Sierra Chichinautzin (Enciso-De la Vega, 1992; Arce y cols., 2017). La principal litología que aflora sobre la cuenca son rocas volcánicas de edades del Plioceno y Cuaternario provenientes de estas diferentes sierras (Orozco y cols., 2002).

De acuerdo con Enciso-de la Vega (1992) la estratigrafía de la cuenca de México está constituida, de abajo hacia arriba, por un basamento de rocas calizas mesozoicas pertenecientes a las formaciones Morelos, Cuautla, y Mezcala, seguido por secuencias de rocas volcánicas y emplazamientos lávicos fisurales hasta llegar a la zona más superficial constituida por depósitos vulcanoclásticos y lacustres.

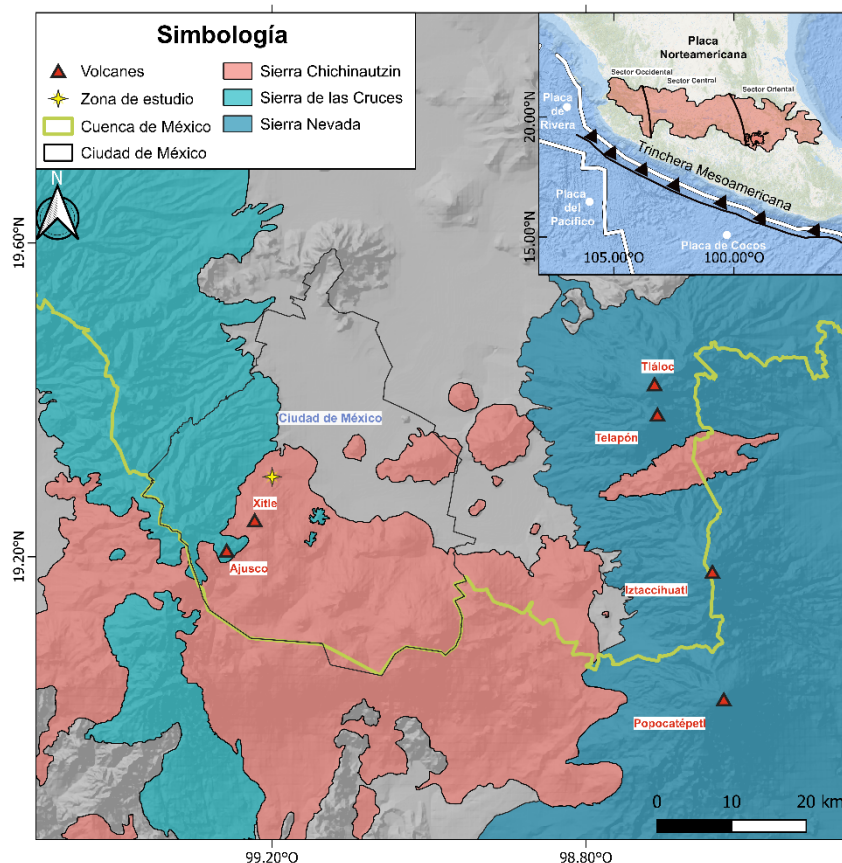


Figura 4. Mapa de la geología de la Cuenca de México, y Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Sierra Chichinautzin de acuerdo con Arce y cols. (2013). Límites de la Sierra de las Cruces de acuerdo con García-Palomo y cols. (2008) y de la Sierra Nevada de acuerdo con Cadoux y cols. 2011

2.2.1 Sierra de las Cruces

La Sierra de las Cruces está constituida por una cadena de volcanes que tiene una longitud aproximada de 110 km con una orientación NNW-SSE y se localiza entre las coordenadas 18°59'–19°43'N y 99°00'–99°40'W (García-Palomo y cols., 2008; Arce y cols., 2019). La cadena volcánica presenta una anchura que varía entre 47 km al norte y 27 km al sur (Velasco Tapia y cols., 2013). Constituye el límite oeste de la cuenca de México y el límite este de la cuenca de Lerma, dónde la Sierra de las Cruces representa la división entre ambas cuencas en una configuración geológica de graben y horst (Osete y cols., 2000; García-Palomo y cols., 2008; Velasco Tapia y cols., 2013).

La Sierra de las Cruces se compone principalmente de ocho grandes volcanes (de norte a sur: La Catedral, La Bufa, Iturbide, Chimalpa, Salazar, San Miguel, La Corona, y Zempoala) que se alinean de norte a sur, así mismo, existen otros volcanes de menor tamaño como el caso del volcán Ajusco. El periodo eruptivo de estos volcanes varió desde el Plioceno tardío al Pleistoceno (García-Palomo y cols., 2013). Por otra parte, García-Palomo y cols. (2008) dividen a la Sierra de las Cruces en tres principales bloques (norte, sur y centro) con base en criterios morfotectónicos (patrón de drenaje, vulcanismo, edad, deformación, y fallamiento).

De acuerdo con García-Palomo y cols. (2008) y Arce y cols. (2019) la actividad volcánica en la Sierra de las Cruces estuvo representada por flujos de lava, construcción de domos, flujos piroclásticos, lahares, y depósitos de avalancha. Estos productos volcánicos muestran una afinidad calci-alkalina con rocas de composición dacítica, andesítica y en menor medida basalto (Osete y cols., 2000).

Delgado Granados y Martín Del Pozzo (1993) reportan una intersección entre la Sierra de las Cruces y la Sierra Chichinautzin por medio del registro estratigráfico de tres formaciones geológicas dando como resultado la siguiente historia eruptiva:

1. La Formación Las Cruces (productos volcánicos pertenecientes a la Sierra de las Cruces) se formó durante Plioceno tardío y Pleistoceno temprano (2.87-1.79 Ma). Está representado por erupción de flujos de bloques y cenizas de composición dacítica, actividad lahárica (Formación Cantimplora) y emisión de coladas de lava dacítica (Formación Apilulco).
2. La Formación Ajusco (productos volcánicos pertenecientes a la Sierra de las Cruces) fue generada por rocas de lavas andesíticas durante el Pleistoceno medio (0.73 Ma).
3. El Grupo Chichinautzin son principalmente rocas andesíticas, aunque las rocas más recientes (Formación Jumento) son de composición más básica. La actividad volcánica en la conjunción (Chichinautzin-Sierra de las Cruces) abarcó desde el Pleistoceno tardío hasta el Holoceno.

2.2.2 Sierra Nevada

La Sierra Nevada es una cadena volcánica constituida de estratovolcanes que se encuentran alineados en dirección N-S (Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl, y Popocatepetl) (Nixon y cols., 1987; Cadoux y cols., 2011; Macías y cols., 2012; Arce y cols., 2019). Tiene una longitud de 45 km (Macías y cols., 2012) y divide el drenaje entre la cuenca de México al oeste y la cuenca de Puebla al este (Nixon y cols., 1987; Cadoux y cols., 2011, Macías y cols., 2012).

De acuerdo con Cadoux y cols. (2011) los volcanes Tlaloc y Telapón son los volcanes de menor elevación de la Sierra Nevada (4120 y 4080 msnm, respectivamente). Tienden a orientarse en dirección NE-SW a través de la falla regional Tlaloc-Apan. Ambos edificios se

componen principalmente de coladas y domos de lava andesítica y dacítica y están rodeados de depósitos piroclásticos (flujos piroclásticos, depósitos de caída) de composición dacítica y hasta riolítica, así como depósitos de lahar (Macías y cols., 2012).

Macías y cols. (2012) resumieron al Complejo Volcánico Iztaccíhuatl de la siguiente manera:

- Se localiza en la parte media de la Sierra Nevada aproximadamente a 60 km al sureste de la Ciudad de México y a 45 km al noroeste de la Ciudad de Puebla.
- El complejo volcánico consta de dos formaciones principales: Llano Grande e Iztaccíhuatl con edades que van desde el Pleistoceno temprano hasta el Holoceno.
- La Formación Llano Grande está conformada por la superposición de tres unidades volcánicas principales: Pulpito del Diablo, Caldera Llano Grande y Volcán Los Pies Ancestrales, y por domos periféricos, así como coladas fisurales de lava.
- La composición de las rocas de la Formación Llano Grande varía entre andesita, dacita y riolita.

Macías y cols. (2012) realizaron un resumen de la historia eruptiva del volcán Popocatepetl ejemplificada de la siguiente manera:

1. La actividad comenzó con la formación del volcán Nexpayantla a través de la emisión de flujos de lava andesítica a dacítica.
2. Posteriormente, ocurrió una erupción hace 200,000 años que promovió el colapso del volcán Nexpayantla y la formación de una caldera. Dentro de esta caldera comenzó la construcción del volcán El Fraile mediante el emplazamiento de coladas de lava andesítica y dacítica.
3. El volcán El Fraile colapsó debido a una erupción de tipo Bezymiany que destruyó el flanco sur del cono. La erupción generó una avalancha de escombros que se desplazó hacia el S-SW desde el cráter y fue seguida por la formación de una erupción de tipo Pliniana que depositó una capa de caída de pómez blanca hacia el sur del volcán, y flujos piroclásticos.
4. Después del colapso del volcán El Fraile, comenzó la formación del cono moderno hace 23,000 años conocido como Popocatepetl.

2.2.3 Sierra Chichinautzin

La Sierra Chichinautzin se extiende en dirección este-oeste, desde los flancos del estratovolcán Popocatepetl en el este, hasta el borde del valle de Toluca al oeste (Siebe, 2000; Siebe y Macías, 2004). Representa la división del drenaje entre la Cuenca de México, Cuernavaca y Cuautla (Siebe y Macías, 2004).

La Sierra Chichinautzin comprende más de 220 aparatos volcánicos cuaternarios de tipo monogenético que cubren un área de aproximadamente 2400 km² (Márquez y cols., 1999; Siebe, 2009). Arce y cols. (2013) propusieron mediante fechamiento ⁴⁰Ar/³⁹Ar que el inicio de la actividad volcánica fue durante el Pleistoceno temprano hace 1.2 Ma y se desarrolló de manera episódica.

De acuerdo con Martín Del Pozzo (1982) la actividad volcánica de la Sierra Chichinautzin se ve reflejada por volcanes de vida corta e índice explosivo intermedio. Por otra parte, existen depósitos piroclásticos que demuestran un carácter de actividad estromboliana (Martín Del Pozzo, 1982). Respecto a los derrames de lava varían considerablemente en su morfología, ya que la mayoría son flujos de tipo aa y raramente flujos de tipo pahoehoe (Siebe y cols., 2005).

Márquez y cols. (1999) proponen mediante observación de imágenes satelitales, trabajo de campo, y alineamiento de volcanes, que el origen del campo volcánico Chichinautzin fue consecuencia de un evento extensional de tipo rift asociado con la dinámica extensional (N-S y NNW-SSE) que presenta la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana. Sin embargo, existen una cantidad más importante de trabajos que asocian la Sierra Chichinautzin al proceso de subducción que está actuando a lo largo de la costa del Pacífico (Wallace y Carmichael, 1999; Siebe y cols., 2004b; Schaaf y cols., 2005).

2.3 Estudios previos sobre el área de estudio

Los trabajos geológicos previos que tienen relación con la zona de estudio de esta investigación son muy limitados. Principalmente, son estudios cartográficos que representan de manera gráfica, y parcial, el área aquí estudiada. No obstante, se presentan las siguientes investigaciones científicas que tienen relevancia para este estudio. Cabe mencionar, que cada artículo presentado tiene un objetivo de investigación diferente con el tema de investigación desarrollado en la presente tesis de licenciatura.

2.3.1 Mapas existentes

El área de estudio se ubica en mapas publicados en trabajos de Córdova y cols. (1994), Cervantes y Molinero (1995), Delgado-Granados y cols. (1998) y Sandoval (2021), los cuales se presentan a continuación.

Córdova y cols. (1994) realizaron una investigación cuyo objetivo principal consistió en reconstruir el paleorelieve de los pedregales que existen en las colindancias entre las alcaldías Tlalpan y Coyoacán, así como del sitio arqueológico de Cuicuilco, antes de la erupción del Volcán Xitle. La metodología empleada, consistió en observaciones de campo y de imágenes aéreas (años 40's y 50's, 1:10000). Dichas inspecciones, estuvieron acompañadas por relaciones estratigráficas de lavas, paleosuelos, y superficies del terreno que no fueron cubiertos por los derrames de lava. Los descubrimientos fueron representados por medio de un mapa que traza la "paleo-distribución" de las unidades geológicas anteriores a la erupción y cómo se superponen con los flujos del volcán Xitle. De acuerdo con este mapa (figura 5A), Córdova y cols (1994) proponen que los flujos de lava del volcán Xitle escurrieron sobre los paleoríos "El Rosal", "Magdalena", "Cuicuilco", y "Peña Pobre", donde desembocaron en planicies cubriendo sedimentos pertenecientes a la Sierra de Las Cruces. Cabe resaltar que esta configuración, también muestra altos topográficos (cerro Zacatépetl y el monte "Tenantongo") que fueron rodeados por los flujos del Xitle. Esto tiene relevancia para la zona de estudio, de la presente tesis, debido a que se plantea que la dirección de los flujos de lava estuvo controlada por el cauce de ríos dando así una primera configuración geológica y cartográfica de la distribución de flujos de lava del volcán Xitle.

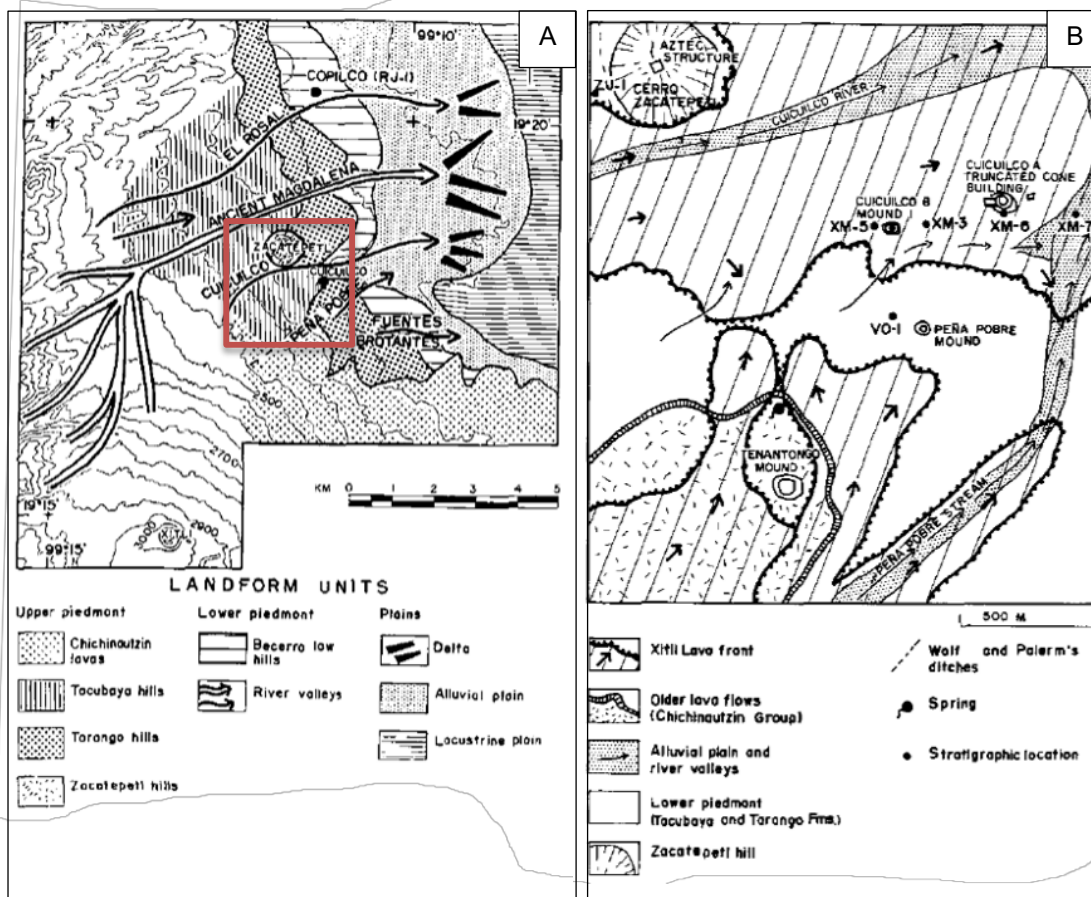


Figura 5. Cartografía morfológica del área de Cuicuilco y alrededores antes y después de la erupción del Xitle elaborada por Córdova y cols. (1994). A. Representación del "paleo relieve" y el patrón de drenaje de los ríos Magdalena, Cuicuilco, y Peña Pobre. El recuadro rojo representa el área de estudio de la presente tesis. B. Configuración de escurrimientos de lava del volcán Xitle. Modificado de Córdova y cols. (1994).

Cervantes y Molinero (1995) realizaron una tesis de licenciatura cuyo objetivo fue caracterizar los eventos volcánicos al sur de la Ciudad de México. Dentro de los que destacan la erupción del volcán Xitle y la avalancha de escombros del volcán Ajusco. Su trabajo consistió, en primer lugar, por la caracterización geológica de los productos volcánicos del volcán Xitle donde reconocieron la distribución de siete flujos de lava, basándose principalmente en descripciones de campo, relaciones estratigráficas y análisis petrográfico. Por otra parte, mediante mapas de isopacas e isopleas, determinaron la distribución de dos depósitos piroclásticos provenientes del Xitle, la cual contrastaron con el estudio de la dirección de vientos actuales en la zona. En segundo lugar, llevaron a cabo por primera vez la caracterización geológica del cerro Zacatepetl y la interpretación de su origen, concluyendo que se trata de una avalancha de escombros proveniente del volcán Ajusco. En tercer lugar, presentan un mapa de escala 1:40,000 que mostró la configuración geológica de las unidades mencionadas anteriormente (Figura 6). Por último, efectuaron fechamientos radiométricos de carbono (^{14}C) en paleosuelos debajo de los depósitos de tefra provenientes del Volcán Xitle (2025 ± 55 años). También, realizaron fechamientos K/Ar en hornblendas para determinar la edad aproximada del depósito de avalancha (3.37 ± 0.27 Ma).

La cartografía de Cervantes y Molinero (1995) representó, principalmente, la configuración de los flujos que emanó el volcán Xitle, así como la delimitación de unidades geológicas de

origen volcánico que pertenecen al campo volcánico de la Sierra Chichinautzin y a la Sierra de Las Cruces, y un ordenamiento de la geología correspondiente al SSW de la cuenca de México. Por lo anterior, la cartografía de Cervantes y Molinero (1995) sirvió como un panorama geológico general de los productos volcánicos asociados al volcán Xitle y sus alrededores para la presente tesis, resaltando que el área que representa la zona de estudio es poco precisa en el mapa que producen (Figura 6) ya que la escala del mapa elaborado por Cervantes y Molinero (1995) no representa de manera clara las unidades llamadas por ellos "Tefras Viveros y Basalto Tenantongo". Estas últimas son objeto de estudio de la presente tesis.

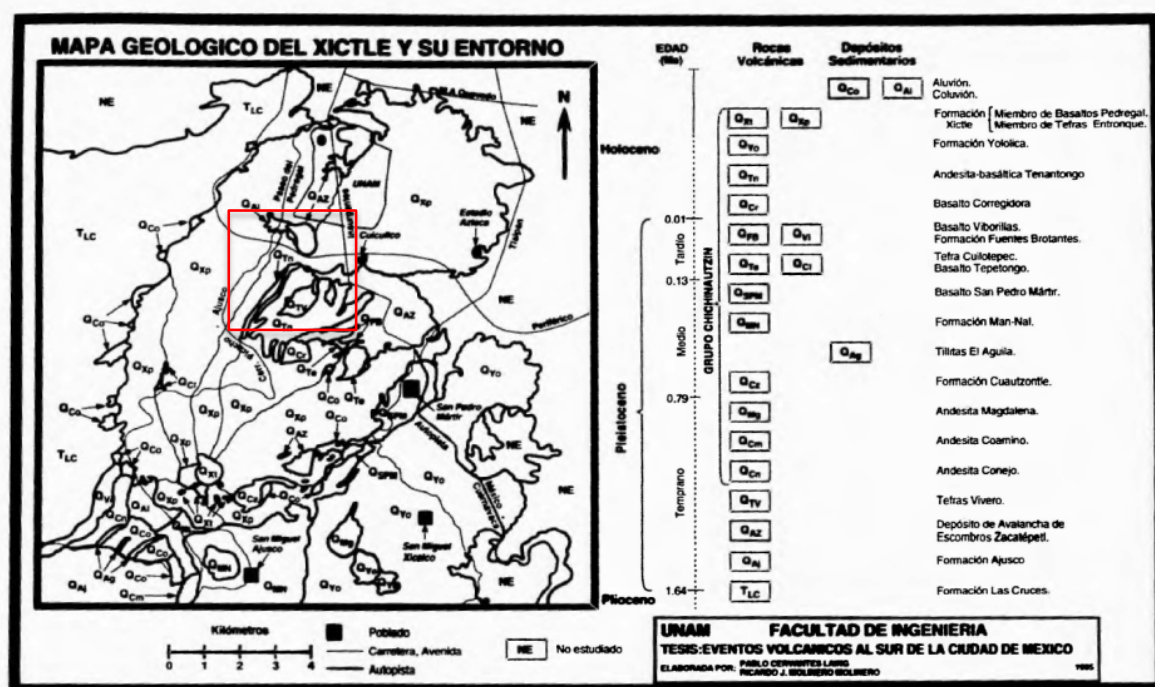


Figura 6. Mapa de los flujos y unidades volcánicas del Xitle y área alrededor (Cervantes y Molinero, 1995). El recuadro rojo representa el área de la zona de estudio de la presente investigación. Modificado de Cervantes y Molinero (1995)

Delgado-Granados y cols. (1998) principalmente publicaron los datos contenidos en la tesis de Cervantes y Molinero (1995). Presentaron la estratigrafía y la cartografía geológica (Figura 7) del volcán Xitle, así como sus productos volcánicos, y discutieron de manera breve el origen y la evolución de la erupción utilizando datos radiométricos y geoquímicos. En su estudio, llegaron a las siguientes conclusiones:

- El volcán Xitle, situado al sur de la ciudad de México, es un volcán de corta edad geológica.
- A través de detallados análisis estratigráficos, lograron definir con precisión nueve unidades distintas relacionadas con el volcán Xitle.
- Utilizando mediciones radiométricas, determinaron que la edad del volcán Xitle es de aproximadamente 2000 años antes del presente. Además, afirmaron que la erupción no pudo haber ocurrido hace más de 3000 años ni menos de 1800 años (antes del presente).
- Los materiales magmáticos expulsados por el volcán Xitle consistieron en basaltos calci-alcalinos y andesitas basálticas. El proceso principal que influyó en estos magmas fue la cristalización fraccionada.

La cartografía de Delgado-Granados y cols (1998) representa un panorama específico para el desarrollo de la presente tesis, primordialmente porque muestra un primer estudio detallado

Sandoval (2021) realizó su tesis de licenciatura enfocada en la reconstrucción del antiguo relieve de la región cercana al volcán Xitle mediante el uso de software especializado. El propósito principal consistió en mejorar la comprensión de cómo se encontraba distribuido el sistema de drenaje, el relieve en el pasado, y cómo se desarrollaron las erupciones volcánicas previas al Xitle (conocidas como pre-Xitle), y propiamente del Xitle. Representó, mediante cartografía digital, los productos volcánicos de los volcanes pre-Xitle, como el Complejo Volcánico San Miguel, Ajusco, Cuilotepec, Coatzontle, Yololica y Malinalte. Para generar los paleo relieves, utilizó simulaciones de los flujos de lava de los volcanes monogenéticos pre-Xitle, específicamente para los volcanes Cuilotepec y Coatzontle, utilizando el programa de modelado probabilístico Q-LavHA. Se destaca que, para el área de estudio considerada aquí, pudieron haber llegado varias unidades de lava sucesivas que habrían interactuado con relieves pre-existentes (figura 8).

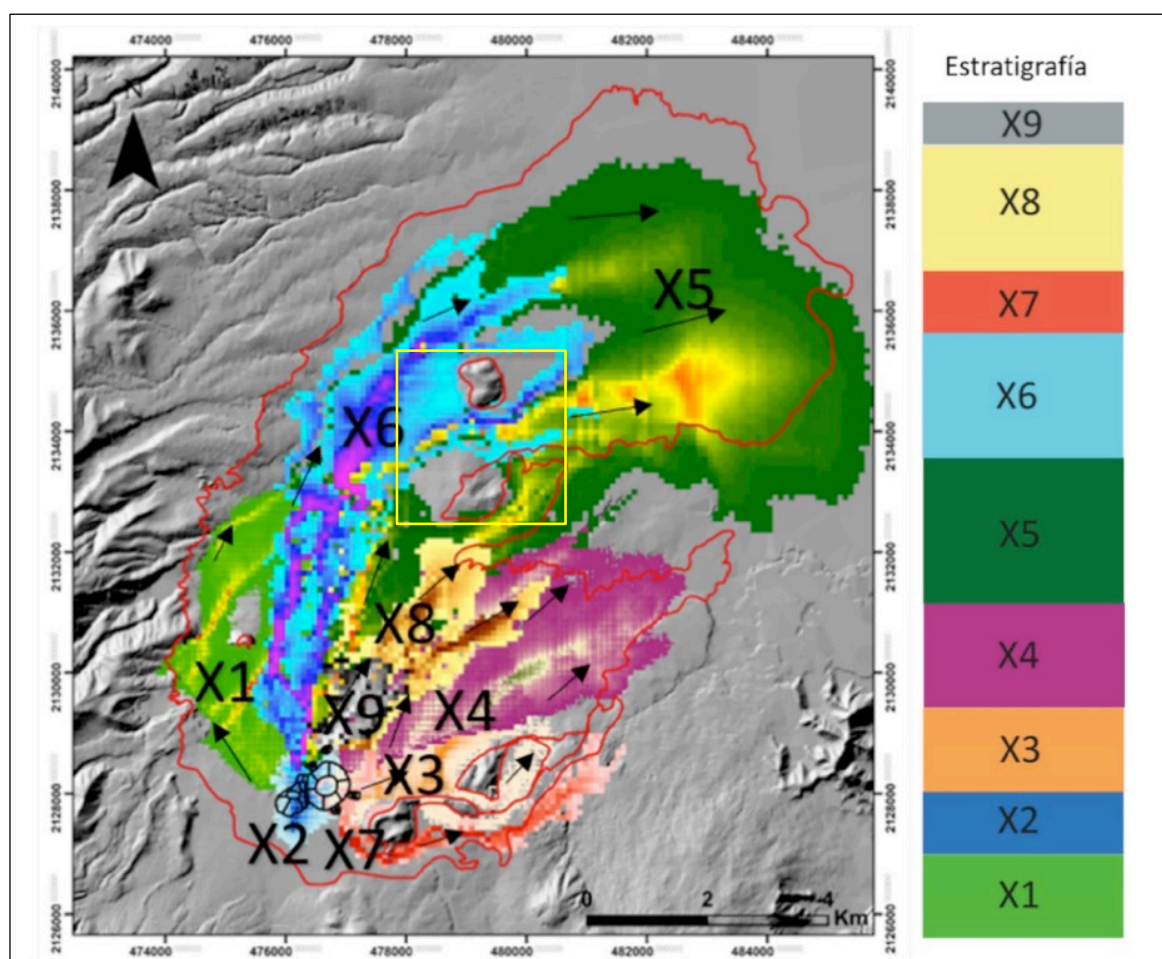


Figura 8. Mapa de simulación de coladas lávicas del Xitle, presentado por Sandoval (2021). El recuadro amarillo representa el área de la zona de estudio de la presente investigación. Modificado de Sandoval (2021).

2.3.2 La erupción del volcán Xitle

El volcán Xitle tiene una gran relevancia debido a su ubicación geográfica: se formó en la ladera norte de la Sierra Chichinautzin (figura 4), sobre las faldas del Ajusco, y por lo tanto sus flujos de lava se extendieron hasta las planicies de la Cuenca de México, hoy en día cubierta por la mancha urbana. Este hecho, refleja el potencial de peligro volcánico al que se ve expuesta la ciudad en el futuro, por este motivo, resulta importante el estudio del volcán, ya que puede servir de ejemplo para generar planes de gestión de riesgo volcánico, y ordenamiento territorial. También, puede ser una guía para resaltar la dinámica de los

ecosistemas, la importancia de la biodiversidad y cómo podemos conservar espacios naturales a través de sitios de recreación y turismo en el volcán, logrando así la educación y concientización de la población respecto a su geopatrimonio (Guilbaud y cols., 2021).

Siebe (2000) propone una edad de la erupción de 1600 años AP con base al fechamiento por radiocarbono de fragmentos de carbón encontrados en depósitos de ceniza de caída relacionados directamente con la erupción. El Xitle es un cono de escoria que tiene una altura de 140 m respecto al terreno y un diámetro basal de 500 m. Junto al volcán Xitle, se encuentra un cono parásito de escoria llamado Xicontle (Siebe, 2000). Ambos, presentan una alineación aparente (NW-SE) con los volcanes Cuatzontle, Magdalena, y Yololica, sin embargo, los flujos de lava de los volcanes, Xitle y Xicontle, se asocian con una fisura de orientación NNE (Delgado-Granados y cols., 1998).

Cervantes y Wallace (2003) indicaron que la actividad del volcán Xitle comenzó con una fase estromboliana con el crecimiento del cono de escoria. Por otro lado, argumentan que la actividad fue en gran medida efusiva, interrumpida brevemente por una fase explosiva que se ve representada por depósitos de **tefra**. Siebe (2000) propuso que el índice de explosividad volcánica (VEI por sus siglas en inglés) fue entre 2 y 3.

Respecto a los productos volcánicos del Xitle se caracterizan por lavas basálticas con morfologías en su mayoría **pahoehoe** (Cañón-Tapia y cols., 1995). Sin embargo, Delgado-Granados y cols. (1998) reportan morfologías de tipo **'a'a** en las partes más proximales a la fuente de emisión. De igual forma, afirmaron que las lavas presentan numerosas estructuras diferentes como **levées, crestas de presión, túmulos, hornitos, tubos de explosión, tubos de lava, y lavas almohadilladas**.

De acuerdo con Siebe (2009) los flujos de lava alcanzaron una distancia máxima de 12 km desde la fuente de emisión, esto debido a su baja viscosidad y temperaturas mayores a los 1000 C°. La velocidad de flujo estuvo controlada principalmente por la topografía y la inclinación de la pendiente, dando una dirección preferencial NNE (Siebe, 2009). El área que abarcaron los distintos flujos de lava ronda los 70 km² (Delgado-Granados y cols., 1998; Siebe, 2000).

2.3.3 El geopatrimonio del Xitle

Existen algunos estudios de geopatrimonio con relación al Volcán Xitle, los cuales se presentan a continuación. A pesar de encontrarse casi en su totalidad cubiertos por la mancha urbana, existen remanentes de los productos del volcán que han sido estudiados y evaluados con una perspectiva encaminada a la caracterización del geopatrimonio (Palacio-Prieto, 2014; Palacio-Prieto y Guilbaud, 2015; Guilbaud y cols., 2021; Nieto-Torres y cols., 2022). Los artículos presentados, muestran una recopilación del trabajo realizado por investigadores correspondientes a las Ciencias de la Tierra. Cabe resaltar, que cada investigación evalúa zonas de estudio distintas entre sí, no obstante, todas se fundamentan a partir de la erupción del volcán Xitle.

Palacio-Prieto (2015) destacó el valor del patrimonio geológico y geomorfológico urbano en la ciudad de México. En este artículo, se resaltaron las características geológicas, geomorfológicas, científicas y culturales más importantes de tres geositos principales. Se discute sobre cómo los geositos urbanos ejemplifican claramente la manera en que la sociedad interactúa con su geopatrimonio. Dentro de éstos, la Reserva del Pedregal de San Ángel (REPSA) es el que tiene relación con la zona de estudio de la presente investigación. Cabe mencionar que la REPSA constituye una zona de conservación establecida en 1983 en el campus de la Universidad Nacional Autónoma de México, ubicado al sur de la Ciudad de México y el propósito de esta reserva es preservar un área de diversidad biológica y cultural

que alberga los últimos vestigios de ecosistemas naturales en el sur de la Cuenca de México (Lot y Camarena, 2009).

Palacio-Prieto y Guilbaud (2015) identificaron y describieron nueve geositos ubicados en el interior y en los alrededores de la REPSA. Estos sitios seleccionados, de acuerdo con ellos, poseen un valor geológico notable especialmente en vulcanología, así mismo resaltan el valor educativo que contribuye a la promoción de las Ciencias de la Tierra. Incluyeron un geosito llamado "Parque Nacional Bosque del Pedregal" o "Bosque de Tlalpan", el cual tiene relevancia para la presente tesis. Esto se debe a que representa una primera caracterización del geopatrimonio en el "Bosque de Tlalpan", mediante una descripción del sitio, identificando algunos aspectos de valor geológico, histórico, recreativo, entre otros.

Guilbaud y cols. (2021) plantearon un panorama general del geopatrimonio del volcán Xitle describiendo con detalle cuatro geositos principales (Volcán Xitle, Cuicuilco, Cantera Oriente de la UNAM, y Geopedregal) con base a un extenso trabajo científico multidisciplinario y colaborativo de especialistas en Ciencias de la Tierra y otras disciplinas (descripciones geológicas, edafológicas, biodiversidad, riesgo y vulnerabilidad, y arqueología). Los autores resaltaron la importancia de estos sitios por su valor científico, ambiental, arqueológico, y artístico.

Nieto-Torres y cols. (2022) realizaron la evaluación y caracterización del geopatrimonio del Área Natural Protegida "Los Encinos", donde se encuentra un sistema de cavernas que son tubos de lava dentro de diversos flujos de lava del volcán Xitle. El estudio contempló aspectos biológicos, ecológicos y medioambientales, así como el cambio de uso de suelo que este espacio ha tenido a lo largo de 20 años. También presentan propuestas para preservar este potencial geosito pues concluyen que el sistema de cavernas tiene relevancia ecológica para la cuenca de México, debido a que es un importante hábitat de flora y fauna, así como un sitio primordial que proporciona servicios ecosistémicos como la infiltración de agua de lluvia a los mantos acuíferos de la ciudad.

III.- Objetivo del estudio y metodología

El objetivo principal del presente estudio es caracterizar y determinar el valor de los afloramientos de lavas presentes en la zona residencial “Jardines en la Montaña” y áreas directamente aledañas como geopatrimonio, además de realizar un primer acercamiento con la población local con el fin de que conozcan la geología de su entorno.

Objetivos particulares:

- Elaboración de un mapa geológico a escala 1:12,000
- Análisis petrográfico en láminas delgadas
- Análisis geoquímico de roca total
- Propuesta de geosenderos para la residencial Jardines en la Montaña y ANP “Bosque de Tlalpan.”

Justificación:

Los afloramientos rocosos en la zona residencial “Jardines en la Montaña” conservan información importante sobre la historia geológica del suroeste de la cuenca de México, además de presentar un valor para la geodiversidad, biodiversidad y la conservación de espacios naturales, por lo cual representan un geopatrimonio que debe ser estudiado y cuyo interés debe ser divulgado para permitir su preservación en el futuro.

Hipótesis:

Los afloramientos rocosos que se encuentran en la zona residencial “Jardines en la Montaña” son lavas más antiguas y distintas a la erupción del volcán Xitle, ubicado al sur de la alcaldía Tlalpan. Esta condición, permitiría que las rocas presenten un importante valor científico y social dado que se encuentran dentro de un espacio altamente urbano.

3.1 Metodología

3.1.1 Recopilación bibliográfica.

La búsqueda bibliográfica consistió en revisar artículos científicos que tuvieran relación con la zona de estudio y dieran pauta para delimitar el alcance y desarrollo de la investigación. Así mismo, se realizó la búsqueda de insumos cartográficos (Ortofotos, mapas, datos de campo) que tuvieran vínculo con la investigación. Para ello, se utilizó la Biblioteca Digital UNAM y el metabuscador Google Scholar.

3.1.2 Observación de fotografías históricas

Posterior a la búsqueda bibliográfica se llevó a cabo la observación de las fotografías áreas del año 1941 adquiridas por la fundación ICA (Figura 9 A y B) y del año 1973 por el INEGI (Figura 9 C). Se usó un estereoscopio (Figura 9 D) con el objetivo de visualizar el relieve, y hacer un reconocimiento de la zona de estudio, con el propósito de comprender la distribución espacial y la morfología de las coladas del volcán Xitle. Se llevó a cabo la elección de fotos que tuvieran la mejor resolución y abarcaran la mayor parte de la zona de estudio, o en otro caso, para la construcción de un mosaico de imágenes que permitieran visualizar un área de terreno más amplia a la zona de estudio.

Los criterios utilizados para delimitar unidades geológicas se basaron en identificar tonos y escalas de grises que correspondían en la textura de superficie de un tipo de unidad geológica. Por ejemplo, para identificar lavas provenientes del Xitle se tomaron en cuenta la intensidad de grises más alta o la más oscura, así como formas más fluidas o con una geometría irregular. Mientras que unidades geológicas con un tono de gris más claro, y geometría más definida, se determinaron como productos geológicos diferentes a los del volcán Xitle que fue verificado con trabajo de campo. Por otra parte, se utilizaron imágenes aéreas que incluían los principales cerros que se encuentran en la zona de estudio (Zacayuca y Zacatépetl) para observar con detalle sus rasgos y características como la deposición de material de retrabajo en el pie del cerro, así como, la morfología y límites entre lavas del Xitle.

Para tener un punto de partida, se realizó sobre fotocopias de las fotos aéreas un esbozo sobre la configuración de unidades geológicas identificadas con el uso de colores (Figura 9E). De manera simultánea, se digitalizó cada unidad al software Qgis para realizar cambios y modificaciones.

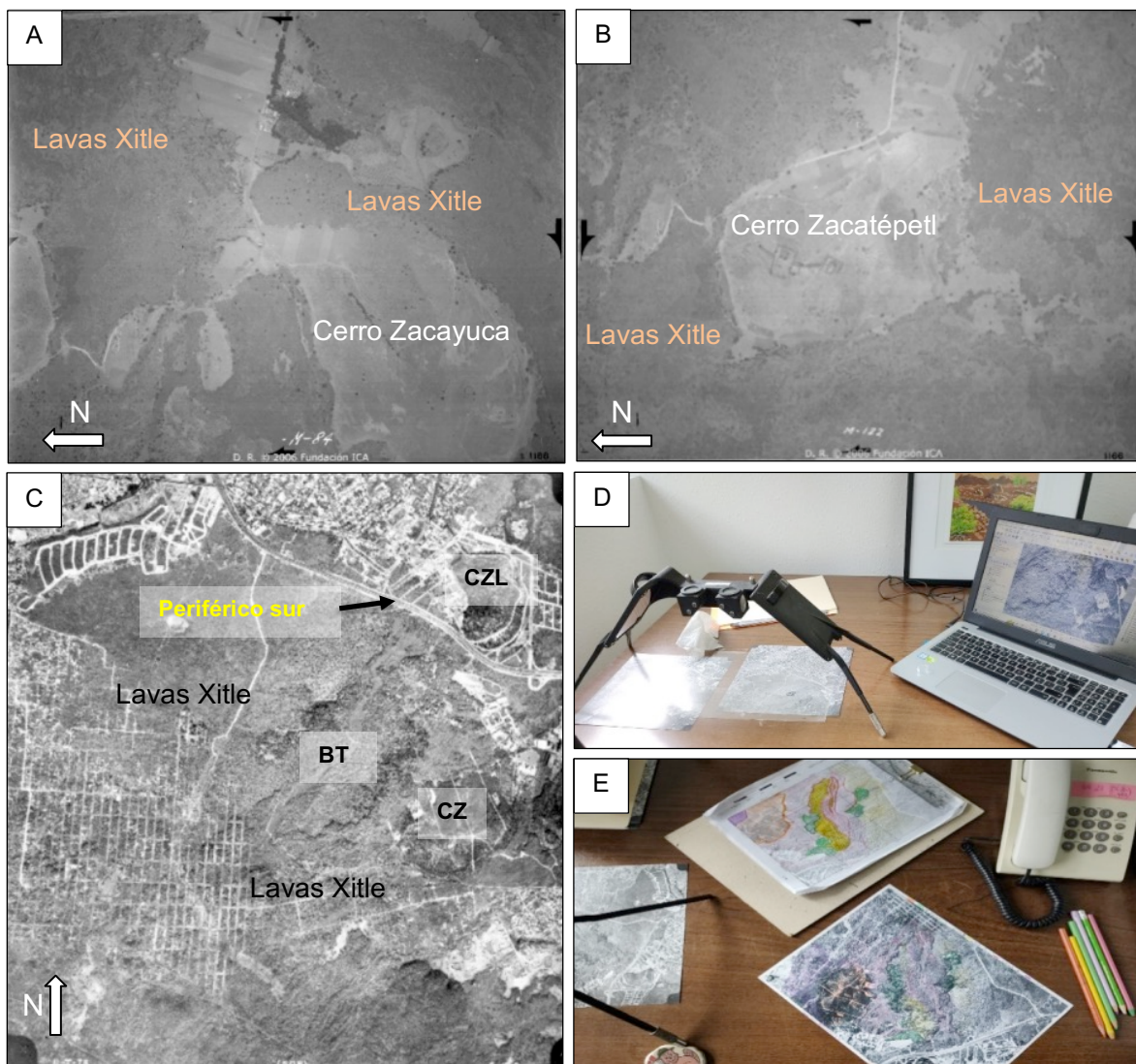


Figura 9. Observación y análisis de fotografías aéreas históricas. A. Foto aérea del ANP Bosque de Tlalpan, escala 1:7000. B. Foto aérea correspondiente a la colonia Jardines del Pedregal, escala 1:7000. C. Fotografía aérea del área de estudio, escala 1:15000. BT= Bosque de Tlalpan, CZ= Cerro Zacayuca, CZL= Cerro Zacatépétl. D. Observación de fotos con el uso de un estereoscopio. E. Delimitación de unidades sobre fotocopias de imágenes aéreas.

3.1.3 Elaboración de cartografía mediante software.

Para la elaboración del mapa en formato digital, se utilizó el software SIG Qgis versión 3.30.3 donde se georreferenciaron las fotos previamente seleccionadas con la mejor resolución y las que proporcionaron más información sobre las unidades geológicas. No obstante, existieron complicaciones para georreferenciar las fotos aéreas debido a que no se encontraban ortorectificadas. Esto se ve reflejado por dimensiones con un margen de error (Figura 10). Para resolver este problema se tuvo que realizar la georreferenciación manual, sin el uso de puntos de referencia utilizando el complemento de Qgis "Freehand raster georeferencer".

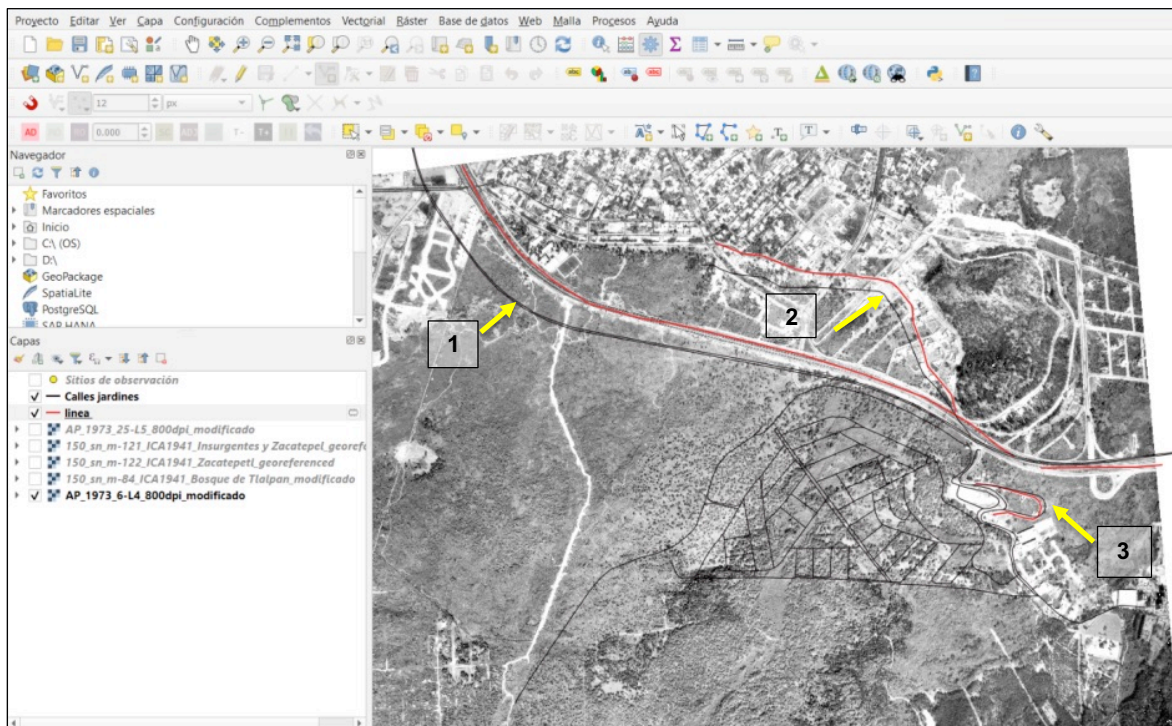


Figura 10. Fotografía aérea en proceso de georreferenciación. Foto del año 1973 que muestra el desfase en la avenida Boulevard Anillo periférico (1) la Calle Camino Sta. Teresa (2), y la cerrada Sta. Teresa (3). Las líneas rojas, representan el sitio correcto donde debe coincidir la imagen y las calles representadas en líneas de color negro. Imagen recuperada en marzo del 2023 en interfaz del software Qgis.

Una vez que se tuvieron las imágenes georreferenciadas, se elaboró un mapa base (Figura11) que fue adaptado y mejorado de acuerdo con los trabajos de campo y el análisis de fotografías históricas que permitieron afinar la delimitación de las diferentes unidades geológicas en el mapa. Sobre el mapa base, se agregó la retícula de calles y avenidas cuya finalidad fue identificar pedregales remanentes en la zona residencial de Jardines en la Montaña (afloramientos de roca dentro de la residencial), que tiempo después fueron visitados durante el trabajo de campo. Este proceso ayudó a corregir y dar veracidad a la construcción de polígonos correspondientes a unidades geológicas.

Construido el mapa base, se elaboraron los polígonos que representan a las unidades geológicas, con el objetivo de construir la configuración geológica tomando en cuenta también los sitios de observación recopilados en campo, así como nuevas observaciones directamente en el software.

En la construcción del mapa geológico, en su versión final, se utilizó el Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR (clave e14a39e3) del 2011, y la carta topográfica E14A39e del año 2009. Ambos, recuperados de la Biblioteca digital de Mapas-INEGI.

Por otra parte, se obtuvo la cuadrícula de calles y avenidas correspondientes a la zona de estudio mediante el portal de datos abiertos OpenStreetMap recuperados en octubre de 2022.

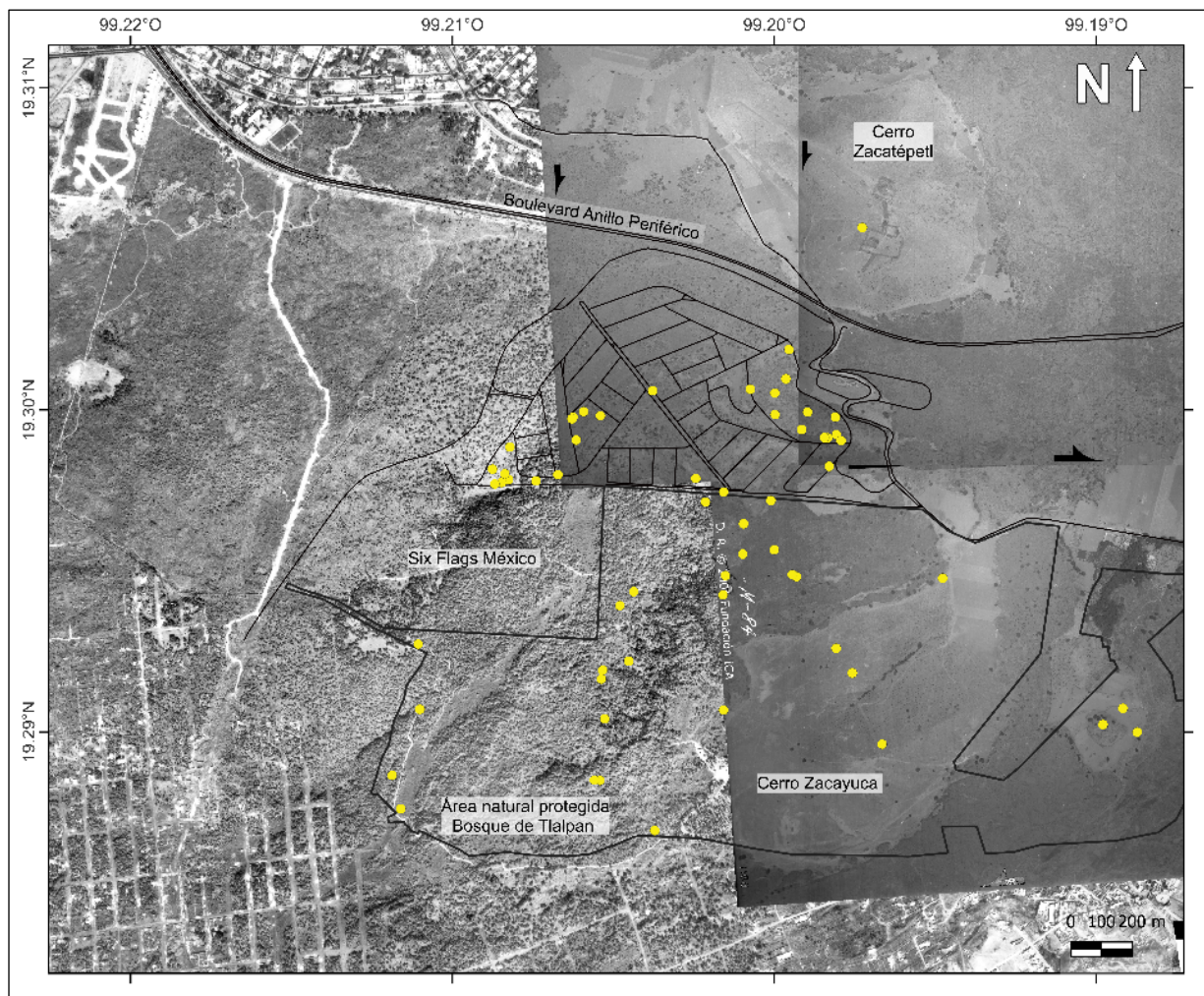


Figura 11. Mapa base del área de estudio. Construido a partir de un mosaico de imágenes aéreas de los años 1941 y 1973. Líneas negras representan calles y avenidas principales, así como el área perteneciente al ANP "Bosque de Tlalpan". Puntos amarillos representan los sitios de observación del trabajo de campo.

3.1.4 Geología de campo

El trabajo de campo se dividió en dos etapas.

Durante la primera, se llevaron a cabo diversas jornadas de trabajo de campo en los meses de septiembre a diciembre del 2022 donde se realizaron descripciones de roca que resultaron en la identificación de estructuras, tipo de roca, mineralogía en muestra de mano, y relación estratigráfica. Además, se realizaron visitas a sitios identificados durante la observación de fotografías aéreas para corroborar el análisis realizado en el estereoscopio, para lo cual resultó en un total de 64 sitios de observación (Figura 11) registrados en una hoja de cálculo de Microsoft "Excel" con el Identificador JM, coordenada y altura en msnm.

La segunda etapa contempló el trabajo de muestreo que dio pie a la elaboración de láminas delgadas y el análisis químico de roca total. Se llevó a cabo, un muestreo de acuerdo con el grado de alteración de la roca, procurando obtener una o dos muestras frescas, con el menor grado de oxidación posible, por cada unidad geológica previamente cartografiada. Además, se sacó una muestra de la pirámide Tenantongo para comprobar su proveniencia geológica. Cada muestra fue retirada directamente del afloramiento utilizando un marro de 8 lb, donde fue empaquetada y rotulada siguiendo la misma nomenclatura usada en la primera etapa de

trabajo de campo (JM). Se obtuvieron un total de 16 muestras para la elaboración de láminas delgadas, y 9 para análisis químico de roca total. A cada muestra, se le retiró la mayor cantidad de costra de alteración, aunque en su mayoría no presentaron un área considerable debido al proceso anterior de selección en el campo. Posterior al trabajo de campo, se realizó un muestrario que incluyó: Identificador, unidad geológica, coordenada geográfica, descripción en muestra de mano, y recomendaciones para el personal encargado de realizar la elaboración de láminas delgadas. Este muestrario, sirvió para tener un control y respaldo de información, debido a que las muestras fueron laminadas y pulverizadas para producir láminas delgadas y los análisis químicos de roca total.

3.1.5 Análisis petrográfico de láminas delgadas y análisis geoquímico

El análisis petrográfico, se realizó utilizando un microscopio petrográfico de luz transmitida marca Olympus en el laboratorio de microscopios del departamento de Vulcanología del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Se identificaron texturas y mineralogía de 16 láminas delgadas, donde se contempló para la descripción que un fenocristal tiene un diámetro entre 0.3 y 3 milímetros. Por otra parte, cristales con un tamaño menor a 0.3 milímetros se contemplan como parte de la matriz.

El análisis químico de roca total contó con una selección de 9 muestras frescas que fueron enviadas a los laboratorios Activation Laboratories Ltd. (Actlabs). 41 Bittern Street, Ancaster, Ontario, Canada. (www.actlabs.com). Se les realizó, análisis de ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente).

El laboratorio Actlabs proporciona un documento PDF, denominado “Certificado de Análisis”. En este documento se especifica el tipo de análisis que se realizó, el total de muestras, la fecha en la que se realizó el análisis, sellos de acreditación y responsables del control de calidad. En las páginas posteriores, se encuentran los resultados desplegados en tablas, y de igual forma datos de control de calidad, donde se especifica el peso porcentual mínimo que se detectó en elementos mayores, y la pérdida por ignición, así como el valor mínimo detectado en ppm de cada elemento traza. También, se encuentra una tabulación que compara los valores obtenidos durante el análisis y los estándares y certificaciones mundiales que deben cumplir.

Con base en los datos proporcionados en el certificado de análisis, se elaboró una tabla para elementos mayores donde se calculó el error porcentual con la finalidad de observar el control de calidad de los resultados respecto a siete valores (estándares) (Tabla 7).

La siguiente ecuación, representa el cálculo del error porcentual, donde el valor obtenido es el que arrojó el análisis, el valor estándar es el estipulado por el control de calidad mundial.

$$EP\% = \frac{|Valor\ obtenido - Valor\ estandar|}{Valor\ estandar} \times 100$$

Tabla 4 . Error porcentual de medición para cada estandar, calculado a partir de los datos proporcionados por el laboratorio Actlabs en el certificado de análisis. Se puede observar que el mayor error detectado ronda el 7% mientras que el mínimo es 0%. Por otra parte, el promedio obtenido es 2.1 %.

Elemento/Certificación	NIST 694	GBW 07113	SY-4	BIR-1a	DNC-1a	BCR-2	W-2b
SiO ₂	6.5	4.9	0.2	0.6	0.5	1.1	1.4
Al ₂ O ₃	1.1	2.1	2.8	0.1	0.5	0.7	1.6
Fe ₂ O ₃ (T)	1.3	0.3	2.6	2.2	3.6	0.9	0.8
MnO	3.4	2.1	4.6	5.1	4.7	3.1	1.8
MgO	3.0	6.3	3.7	0.2	0.8	0.6	0.6
CaO	1.5	0.0	2.0	0.7	2.1	2.0	0.0
Na ₂ O	0.0	4.3	2.1	0.5	1.1	3.2	3.3
K ₂ O	3.9	1.7	0.0	0.0	6.0	0.0	1.0
TiO ₂	0.9	4.3	1.4	2.4	1.3	0.5	2.7
P ₂ O ₅	0.7	0.0	0.8	4.8	0.0	5.7	7.1

IV.- Resultados

4.1 Cartografía del área

La cartografía realizada cubre un área total de 10 km². Se compone de 4 formaciones geológicas que corresponden a coladas de lava del volcán Xitle (Lava Xitle), formaciones anteriores a estas lavas (kipuka Viaje a la Naturaleza y kipuka Zacayuca) y sedimentos recientes (Figura 12). La formación Lava Xitle se subdividió en 4 unidades, de acuerdo con la morfología de la lava y su posición estratigráfica. De esta forma, se dedujo que la unidad 1 fue la primera en emplazarse, seguida por la unidad 2, después por la unidad 3 y finalmente por la unidad 4 (Figura 12).

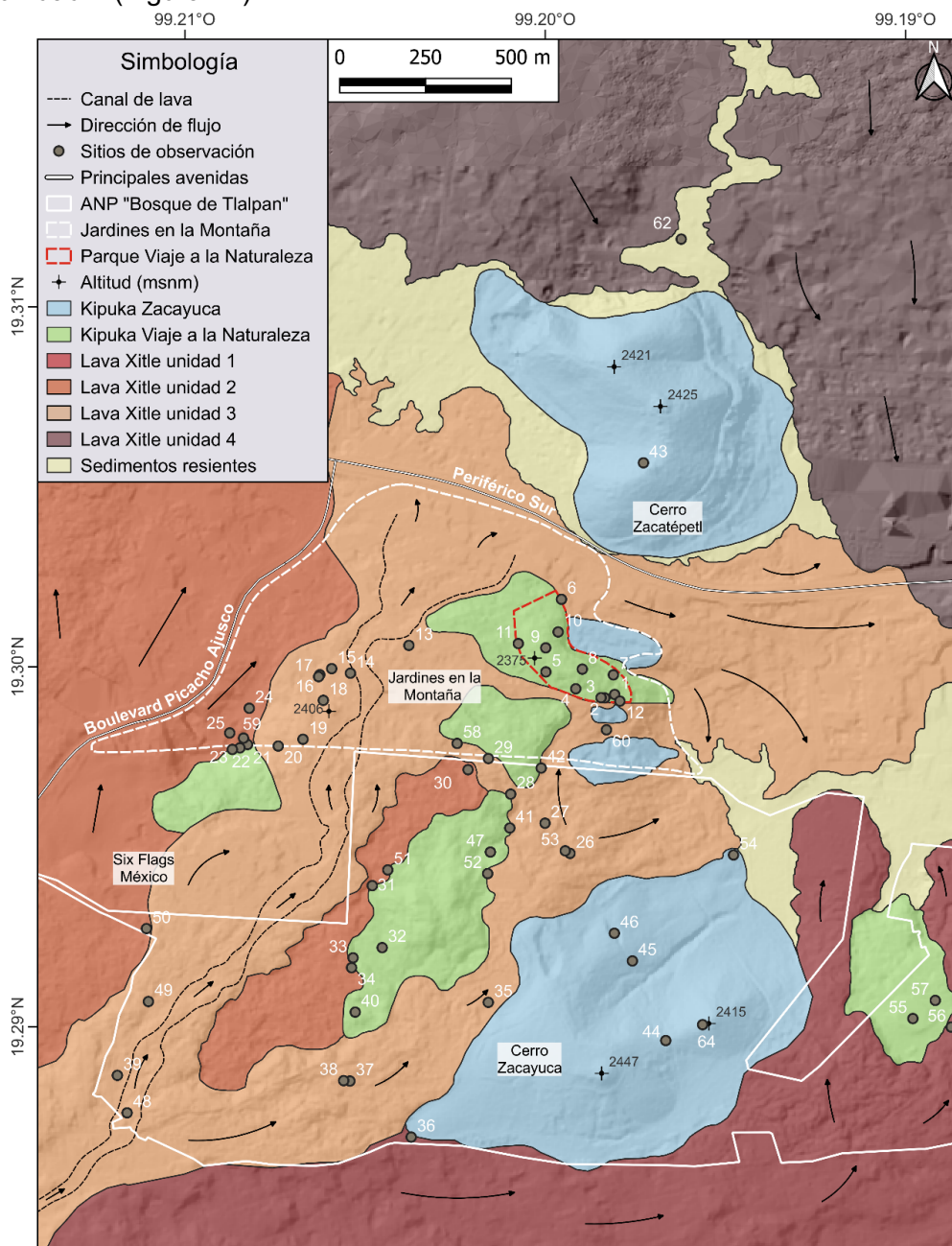


Figura 12. Mapa geológico del área de estudio, con la ubicación de los sitios de observación y muestreo. La nomenclatura propuesta para la presente tesis lleva por nombre "JM" y cada sitio de observación es nombrado de esta manera.

Cabe definir el origen y el significado del término de kipuka que se usa repetitivamente en este trabajo. De acuerdo con Muller-Dombois y Lamourex (1967), el término **kipuka** es una palabra proveniente del hawaiano que significa “apertura” o “cambio de forma” (Figura 13). Dicha palabra fue adoptada en la terminología científica para describir porciones del terreno que han quedado rodeadas por flujos de lava más recientes (Muller-Dombois y Lamourex, 1967). Bajo este contexto, Macdonald y Hubbard (1951) plantean que las coladas de lava de color negro tienden a ser más jóvenes, mientras que la de color gris, o incluso marrón, usualmente son más antiguas, donde éstas se ven rodeadas, o cubiertas parcialmente, por las de color negro en los flancos más altos del volcán, dando kipukas de lava, mientras que en las partes más bajas los kipukas muestran un desarrollo considerable de vegetación. La lava que rodea al kipuka, puede tener una altura desde el suelo a la cima, de entre 1 a 10 m (MacCaughy, 1917).

Los kipukas pueden variar en dimensión, desde metros a cientos de kilómetros cuadrados (Muller-Dombois y Lamourex, 1967). Tienen una gran importancia ecológica, ya que funcionan como un punto de partida para la colonización de nuevas áreas volcánicas por parte de la vegetación circundante (USGS National Park Service, 2021), debido a que los kipukas contienen una abundancia en flora y fauna, así como un desarrollo de suelos más profundo (mayor espesor) de color negro y rico en materia orgánica (MacCaughy, 1917).

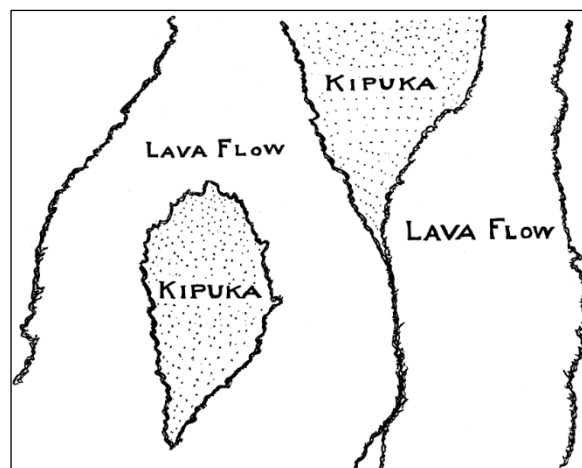


Figura 13. Representación gráfica de un Kipuka. Tomado de (MacCaughy, 1917).

De acuerdo con lo anterior, la configuración espacial de las kipukas mencionados en este estudio se ve representada por un total de 10 “islas” constituidas por las formaciones anteriores (compuestas por bloques de lava, posibles depósitos de avalancha, y depósitos de caída de pómez) que están rodeadas por 4 unidades de lava del volcán Xitle, superpuestas entre sí. Estas kipukas, mantienen una geometría irregular con bordes redondeados representan altos topográficos (Figura 12). El área que ocupan en la cartografía es de 1.82 km² aproximadamente el 18 % del área total.

A su vez, la formación Lava Xitle está constituida por 4 flujos o unidades de lava que cubren un área total de 7.48 km², es decir, aproximadamente el 75 % del área de estudio. Las coladas de las unidades 2 y 3 son alargadas en una dirección preferencial N-NE, lo que representa la dirección del flujo de una zona topográficamente alta a una zona más baja. De manera particular, la unidad 3 presenta un canal de lava en la parte central de una de sus coladas, con dimensiones de 125 m de ancho promedio y 2.5 km de longitud. Este canal presenta una dirección N-NE y se extiende desde el límite S-SW del “Bosque de Tlalpan”, hasta el flanco sur del cerro Zacatépetl. Allí, la colada, cambió su dirección de flujo de N-NE a dirección E donde se generó una geoforma similar a un delta.

La formación geológica más reciente corresponde a sedimentos que cubren un área total de 0.72 km², aproximadamente el 7% del área de estudio. Se encuentran principalmente en las faldas de los cerros Zacatépetl y Zacayuca, depositados como material de pie de monte, o de forma más particular, como un depósito de sedimento ubicado al norte del cerro Zacatépetl cuya geometría muestra curvas sinuosas y estrechamientos que siguen el contorno de las lavas.

4.2 Descripciones de formaciones

En esta sección se describirán los aspectos en campo de las formaciones geológicas encontradas en el área de estudio. Cabe notar, que los trabajos de campo y laboratorio sobre las formaciones en la parte norte del área (unidad 4 de la Lava Xitle y cerro Zacatépetl) fueron pocos y los resultados presentados por esta parte requieren profundizarse y confirmarse en el futuro.

4.2.1 Kipukas

Cómo se mencionó anteriormente, en el área de estudio, se identificaron dos principales kipukas distribuidos en forma de “islas” rodeadas por cuatro flujos de lava provenientes del volcán Xitle. Se describirán sucesivamente a continuación.

Kipuka Viaje a la Naturaleza (V.N.), fue llamado así informalmente para mantener el nombre asignado al parque restaurado por los habitantes de la colonia Jardines en la Montaña y lograr aumentar el sentido de identidad por parte de ellos a la geología del parque y la colonia donde residen. Dicho nombre, también sirvió para asociar las diferentes “islas” que afloran en la colonia Jardines en la Montaña y en el Área Natural Protegida (ANP) “Bosque de Tlalpan. En este contexto, la formación kipuka V.N aflora en un área total de 0.19 Km² con una altura máxima de 2440 msnm.

Esta formación consiste en una lava con estructura en bloques (Figura 14 A) formados por una roca masiva (densa, sin vesículas) de color gris claro con una costra de alteración marrón. No obstante, en ciertos sitios (por ejemplo, JM-10) los bloques presentan un color rosado que se puede asociar a la oxidación de la roca (Figura 14 B). Los bloques tienen una superficie sub-redondeada y a veces ligeramente áspera. Vista con lupa, la roca muestra cristales de olivino y plagioclasa de 2 mm de tamaño aproximado, así como xenocristales de cuarzo de 1 a 3 mm (Figura 14 C).

Al centro del parque Viaje a la Naturaleza, existen pequeños depósitos de pómez y líticos alterados, que forman una fina capa de aproximadamente 10 cm de espesor mezclada con suelo y material de retrabajo que recubre al terreno (Figura 14 D). Esta capa está constituida por fragmentos de tamaño variado (1 < 1 cm hasta los 5 cm de diámetro). Los fragmentos de pómez presentan un color blanco, con textura fibrosa y vesiculada con cristales de color negro (Figura 14 E). Por otra parte, se identificaron fragmentos con un color amarillo crema, deleznable al tacto. Estos depósitos se correlacionan con otros observados en el ANP Bosque de Tlalpan y descritos por Arce y cols. (2017).

Kipuka Zacayuca. Esta formación fue llamada así para mantener la referencia del cerro Zacayuca (o Zacayucan) localizado en el ANP “Bosque de Tlalpan” donde enfocamos nuestros trabajos. Representa un área de 0.69 km² que se encuentra bordeada por varias unidades de lava del Xitle. La altitud máxima que registra es de aproximadamente 2450 msnm.

Consiste en una loma cubierta por un gran espesor de un suelo bien desarrollado y arcilloso, donde afloran, en la parte baja y alta, grandes bloques redondos de roca cristalina, masivos (densos), con una considerable costra de alteración. La roca presenta, cristales de plagioclasa, feldespato potásico y anfíbol. En algunos sitios, se observa sobreyaciendo al

suelo que recubre estos bloques, un depósito de pómez color blanco de 3 m de espesor máxima descrita por Arce y cols. (2017) y llamada por ellos como “pómez Bosque de Tlalpan”. Por otra parte, el **cerro Zacatépetl** es considerado parte de esta formación mostrando también una configuración geológica de “isla” cuya área es aproximadamente de 0.51 km². La altura máxima que se registra es de aproximadamente 2425 msnm. Se encuentra bordeada por sedimentos (probablemente resultado de la erosión del propio cerro), así como flujos de lava del Xitle. Se distinguieron grandes bloques muy redondeados color negro que presentan cristales de plagioclasa, feldespato, y anfíbol. Por otra parte, existe un depósito con fragmentos de roca brechada en una matriz de granulometría media compactada y granosoportada. En dicho depósito se observó una textura de rompecabezas. Este depósito se correlaciona con el descrito por Cervantes y Molinero (1995) y considerado por ellos como un montículo que forma parte de una avalancha de escombros proveniente del volcán Ajusco.

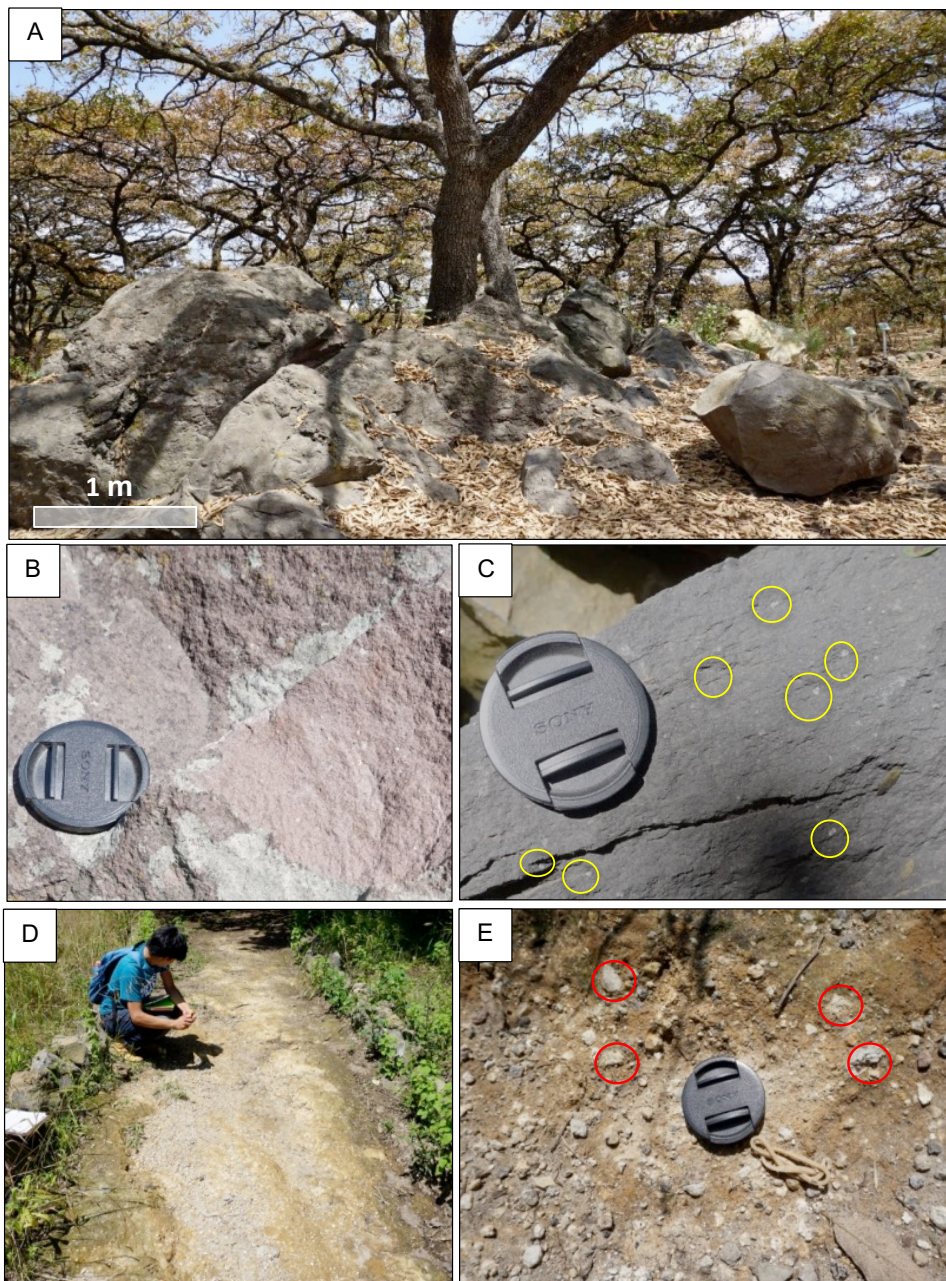


Figura 14. Fotografías de campo de productos volcánicos del parque Viaje a la Naturaleza (V.N.). A. Grandes bloques de lava redondeados que conforman la formación kipuka V.N. B. Lava de la kipuka V.N. que presenta un color rosado muy notable y contrastante (JM-10). C. Lava de la kipuka V.N. con xenocristales de cuarzo indicados por los círculos amarillos. D. Depósito de pómez en el parque, visto sobre un sendero. E. Vista cercana del depósito de pómez alterado mostrando fragmentos de pómez (círculos rojos).

4.2.2 Lavas del Xitle

La formación “LavaXitle” constan de 4 unidades con diferentes texturas de superficie que se sobreponen en el área de estudio, con la secuencia estratigráfica siguiente, desde abajo hacia arriba: Lava Xitle unidad 1, Lava Xitle unidad 2, Lava Xitle unidad 3, y Lava Xitle unidad 4 (Figura 12). Esta configuración estratigráfica se definió con base a las observaciones en fotografías aéreas y el trabajo de campo que permitieron definir la naturaleza de los contactos entre las varias unidades identificadas gracias a su morfología. Sus características en campo están descritas a continuación.

Lava Xitle unidad 1: Representa un área de 1.13 km², mientras que la elevación máxima que se registra es de 2480 msnm y la menor corresponde a 2300 msnm. Está constituida por una colada de lava con superficie de tipo a'a' (Figura 15A). La roca presenta un color negro a gris oscuro y vesículas redondeadas. Contiene cristales de olivino y plagioclasa y presenta leves costras de alteración, principalmente en vesículas y oquedades. Este flujo se encuentra rodeando a la pirámide Tenantongo en el sector este del Bosque de Tlalpan y forma parte del borde este del kipuka Zacayuca.

Lava Xitle unidad 2: Representa un área de 1.70 km², mientras que la elevación máxima que se registra es de 2450 msnm y la menor corresponde a 2360 msnm. Se constituye de una colada de lava con superficie de tipo pahoehoe (Fig. 15B), de color negro a gris oscuro. Presenta cristales de olivino y plagioclasa. Contiene vesículas alargadas y grandes oquedades de hasta 50 cm de longitud. Este flujo se ve caracterizado por mostrar estructuras de túmulos, lavas cordadas y pequeñas geoformas (lóbulo) llamadas “lenguas”.

Lava Xitle unidad 3: Representa un área de 2.38 km², mientras que la elevación máxima que se registra es de 2485 msnm y la menor corresponde a 2300 msnm. Se encuentra constituido por una colada de lava con superficie de tipo a'a. La roca es de color gris claro a oscuro. Presenta vesículas alargadas ligeramente redondeadas. Contiene cristales de olivino y plagioclasa. Este flujo, se ve representado por tener un canal de lava bordeado por estructuras de levées (Figura 15C). En dicho canal, la roca aparece fragmentada, en bloques de color gris claro a negro, cuyo tamaño ronda de entre los 20 cm de diámetro hasta los 50 cm. Se encuentran, con una superficie áspera y presencia de vesículas alargadas, irregulares que contienen pequeñas “agujas” o “filamentos” muy delgados.

Lava Xitle unidad 4: Representa un área de 2.30 km² en el mapa y exhibe una elevación máxima de 2380 msnm. Se encuentra constituida por una colada de lava de color negro, a gris oscuro con superficie de tipo pahoehoe y en algunos casos presenta grandes superficies lisas en forma de lóbulo y lenguas. Se encuentra constituida principalmente por cristales de olivino. También, presenta vesículas alargadas e irregulares. Por otro lado, pueden distinguirse grandes oquedades y fracturas con diámetros mayores a un metro con formas irregulares, en algunos casos llegan a tener una profundidad considerable formando pequeñas cuevas, además se encuentran superposición de pequeños flujos así como grandes túmulos con superficies de tipo pahoehoe.

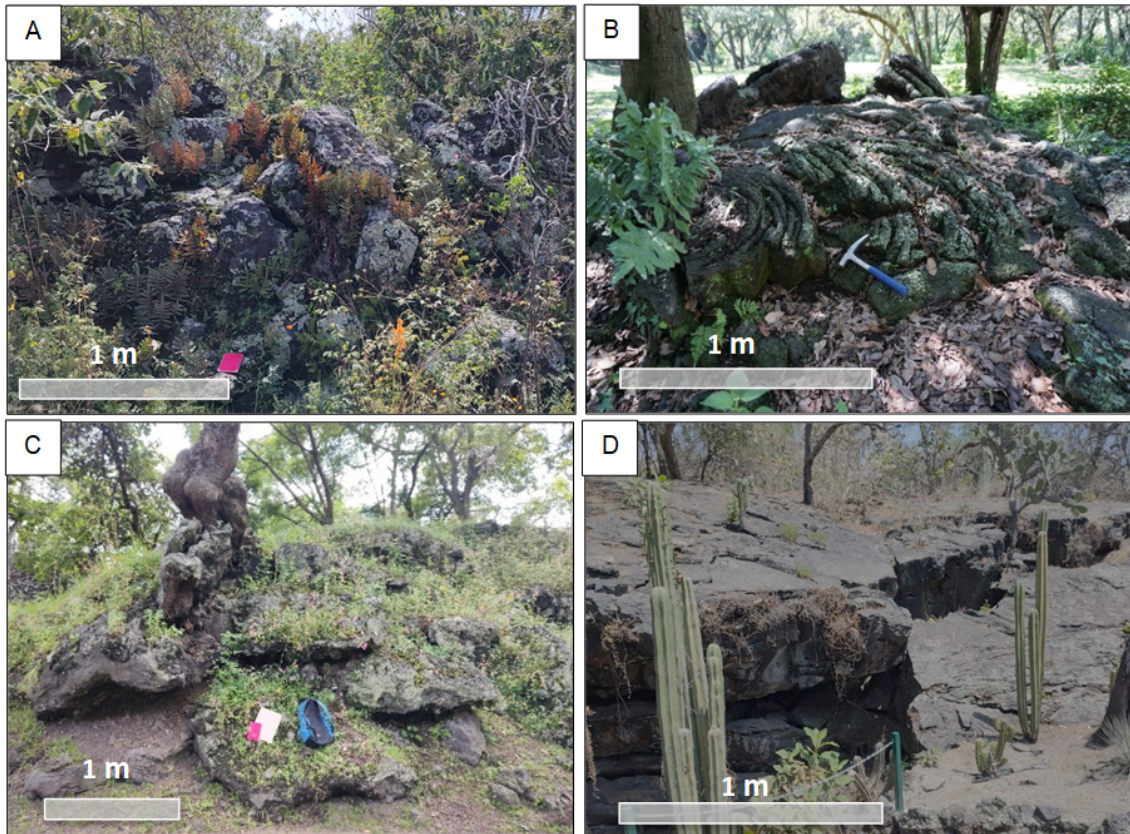


Figura 15 Fotografías de campo de flujos de lava del volcán Xitle en el área de estudio. A. Lava Xitle unidad 1 mostrando morfología de tipo a'a. B. Lava Xitle unidad 2 con morfología de tipo pahoehoe. C. Lava Xitle unidad 3 representado por el flanco izquierdo del canal de lava (Levée). Lava Xitle unidad 4 mostrando grandes fracturas discontinuas y pequeñas cuevas.

4.3 Petrografía

Los resultados del análisis de cada una de las láminas delgadas estudiadas se encuentran reportados en la Tabla 5 para las unidades 1, 2 y 3 de la formación Lava Xitle y la Tabla 6 para las formaciones de kipukas: Viaje a la Naturaleza y Zacayuca. Se resumen a continuación. Los números que componen las claves de las láminas reportadas corresponden en el sitio donde las muestras correspondientes fueron recolectadas (ver su ubicación en la Figura 13).

Cabe resaltar que, en el próximo texto, se emplea la siguiente nomenclatura que representa la abreviación de minerales identificados bajo el microscopio petrográfico: Ol = Olivino, Opx = ortopiroxeno, Px = piroxeno (Cpx o Opx, no identificado), Pl = plagioclasa, K-Felds = feldespato potásico, Hbl = hornblenda, Vesi = vesícula. Además, se usa el término de glomerofenocristales para referirse a aglomeraciones de fenocristales.

5.3.1 Lava Xitle

Las láminas de las diferentes unidades de la formación Lava Xitle presentan ligeras diferencias que se resumen a continuación. Láminas de la unidad 1 contienen fenocristales de Ol y Cpx subhedrales y glomerofenocristales de Ol (Figura 16A). No obstante, la lámina JM-56 presenta, además, glomerofenocristales de Cpx (Figura 16B). Por otra parte, la matriz contiene abundantes microlitos de Pl formando una textura traquítica. Cabe resaltar que la lámina JM-36 tiene vesículas alargadas mientras que no se observaron vesículas en la lámina JM-56. La roca no presenta alteración.

Las 4 láminas de la unidad 2, contienen fenocristales de Ol y Cpx, y dos de ellas (JM-51 y JM-59) también contienen fenocristales de Pl. Todas presentan una matriz microlítica de Pl, en textura traquítica. Se observaron vesículas alargadas y redondeadas. Los fenocristales aparecen en JM-50 y JM-58 con forma subhedral, mientras que son euhedrales en JM-51 y JM-59. Por otra parte, se encontraron glomerofenocristales de Ol en JM-51 y JM-59 (las otras dos láminas no presentan glomerofenocristales). Tres de las 4 láminas presentan un grado leve de alteración, principalmente de oxidación, en la matriz.

Las 3 láminas de la unidad 3 presentan fenocristales de Ol, Pl y Cpx, en una matriz microlítica de plagioclasa con microcristales de Px, en textura traquítica. Destacan vesículas bastante redondeadas alargadas y ovaladas (Figura 16E). Las láminas JM-49 y JM-53 presentan cristales subhedrales (Figura 49), mientras que en la lámina JM-13 los cristales presentan formas más euhedrales. Se encontraron glomerofenocristales de Ol únicamente en JM-53 y JM-13. No se observó rastro de alteración alguno.

4.3.2 Kipuka Viaje a la Naturaleza

Las láminas de esta formación son diferentes a las de la formación Lava Xitle. Principalmente se constituyen de fenocristales de Ol y Pl de forma subhedral donde las plagioclasas se distinguen con macla de albita y algunos casos con zoneamiento. Estos cristales son visiblemente más chicos que en las lavas del Xitle. Los fenocristales de olivino se concentran como glomerofenocristales. En la mayoría de las láminas, se identificó una textura porfídica con una matriz microcristalina de Pl y fenocristales equigranulares, es decir con tamaños similares (1 mm) (Figura 17A y B). Cabe resaltar que en la lámina JM-09 se observó una textura microlítica (abundante microlitos de Pl). Por otra parte, identificamos en todas las láminas xenocristales redondeados de cuarzo de aproximadamente 1 mm de diámetro promedio cuyos bordes presentan coronas de reacción de Px (Figura 17C y D). Respecto a la vesicularidad, no se distingue una proporción considerable de vesículas, sin embargo, observamos un pequeño volumen de vesículas en las láminas JM-57, JM-52, JM-04.

La lámina de un bloque suelto muestreado desde la cima de la pirámide Tenantongo en el Bosque de Tlalpan (JM-55) tiene las características propias de la formación Viaje a la Naturaleza como los fenocristales de Ol y Pl de forma subhedral con una distribución equigranular, textura porfídica con matriz microcristalina de Pl, xenocristales de cuarzo y una escasa vesicularidad.

4.3.3 Kipuka Zacayuca

La única lámina que se describió de la formación Zacayuca (JM-54) corresponde al cerro Zacayuca. Contiene fenocristales de Pl (de 1 mm a 3 mm de diámetro), Hbl (0.5 mm de diámetro), Px (0.3 mm de diámetro) y escasos K-Felds (0.5 mm de diámetro). La forma de los cristales es, en su mayoría, subhedral a excepción de los cristales de Pl que son principalmente euhedrales con zoneamiento, maclas de albita-carlsbad y un ligero fracturamiento. La textura es porfídica con cristales inequigranulares (con un rango de tamaños), con una matriz microcristalina de Pl y Px. No presenta vesículas. La alteración que presenta es comúnmente asociada a una oxidación afectando a los cristales de Hbl (Figuras 17E y 17F).

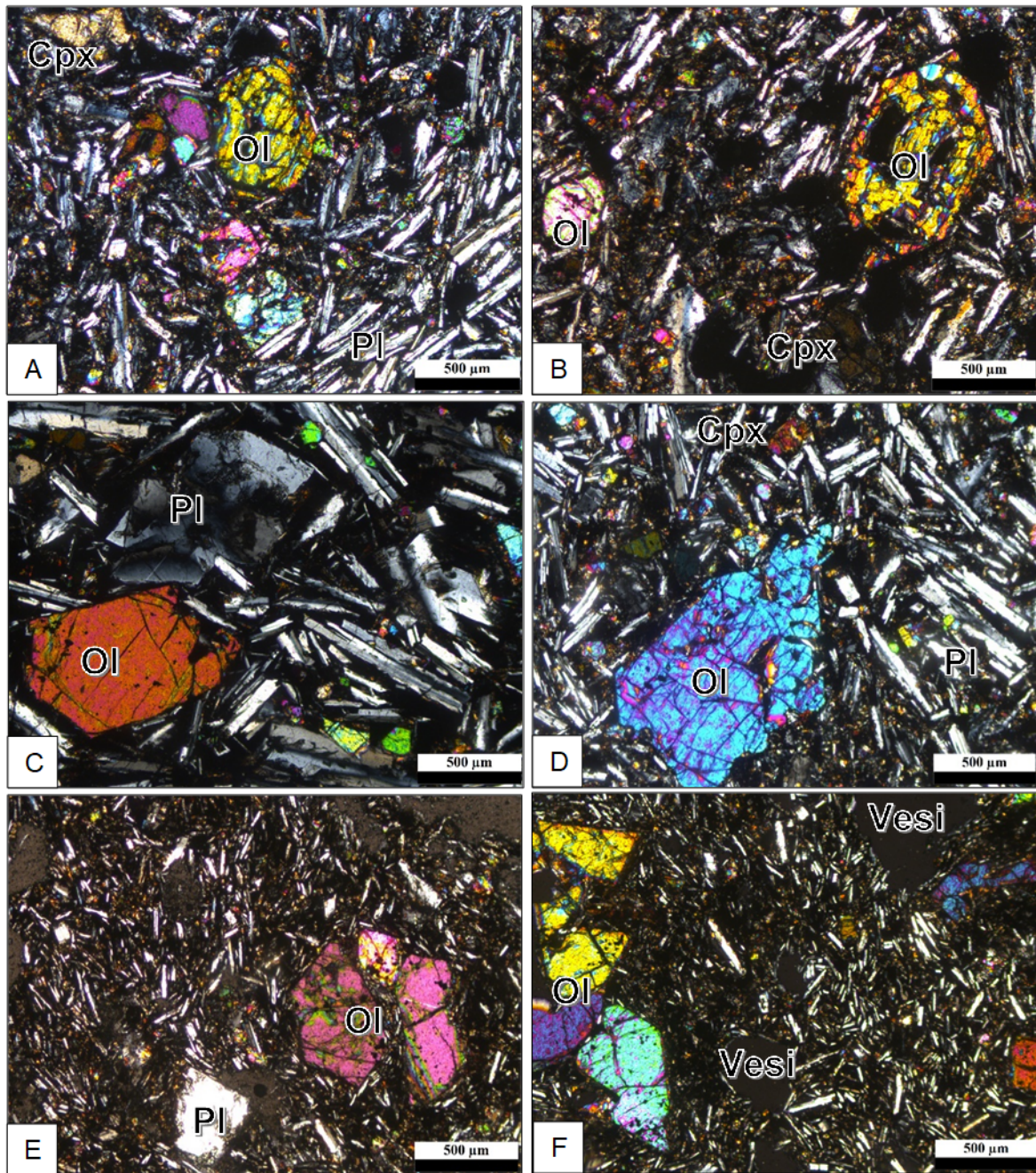


Figura 16. Fotografías representativas de láminas delgadas de la formación Lava Xitle. A Lámina JM-36. B. Lámina JM-56. C. Lámina JM-51. D. Lámina JM-59. E. Lámina JM-13. F. Lámina JM-49. Ol=olivino, Pl= plagioclasa, Cpx=Clinopiroxeno, y Vesi=vesícula. Se nota que los olivinos se presentan fracturados, pero ha sido comprobado que no son clinopiroxenos.

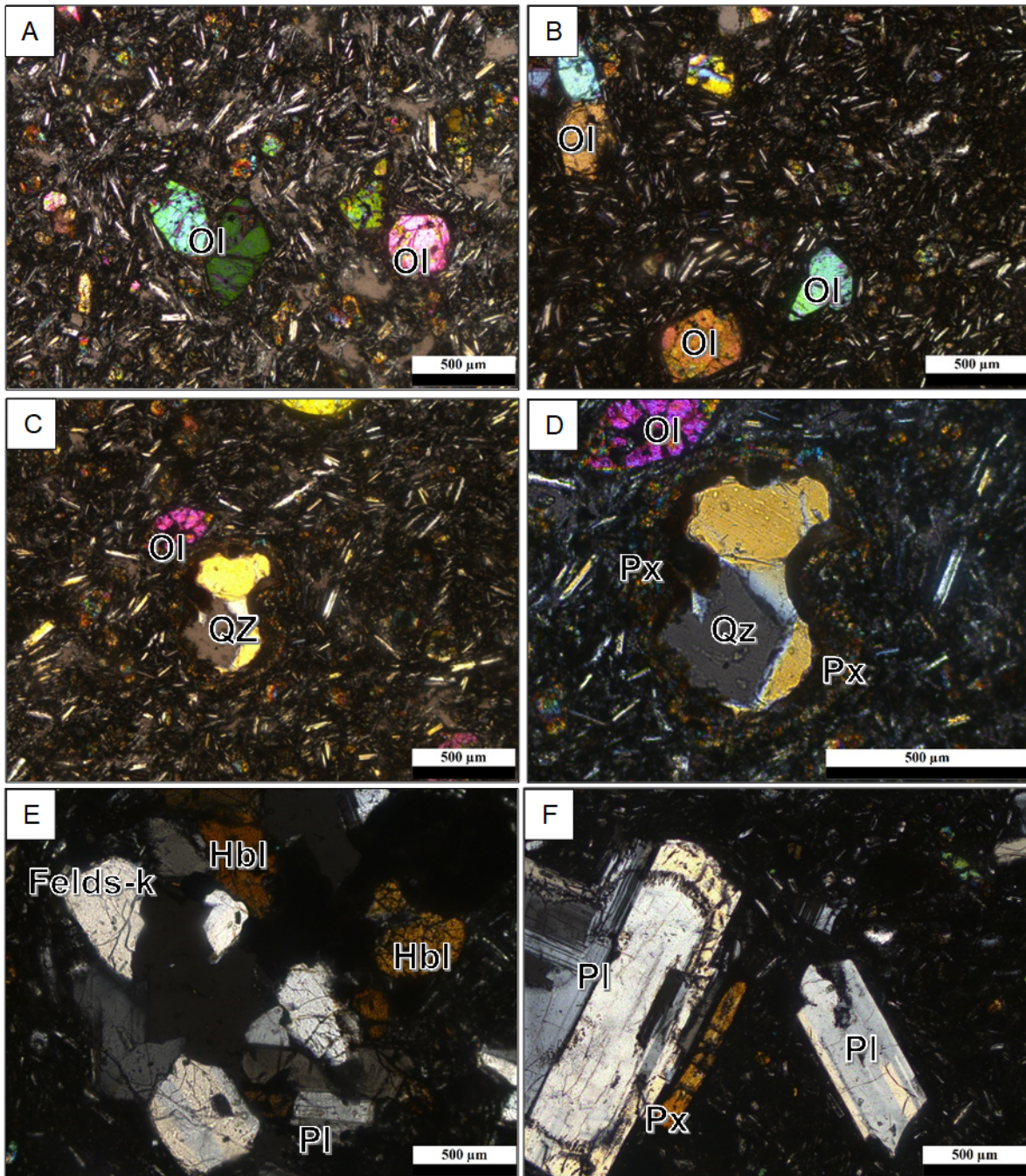


Figura 17. Fotografías de láminas delgadas de formaciones de kipuka de Viaje a la Naturaleza y Zacayuca. Viaje a la Naturaleza: A, C y D. Lámina JM-52. B. JM-09. Zacayuca: E and F. Lámina JM-54. Ol=olivino, Pl= plagioclasa, Cpx=Clinopiroxeno, Px=piroxeno, Qz=cuarzo, Hbl= hornblenda, y Felds-k= feldespato potásico. Se nota la dimensión menor de los cristales de Ol en comparación con rocas de la formación Lava Xitle

Tabla 5 Análisis petrográfico de láminas delgadas de de varias unidades de la formación Lava Xitle

Clave	JM-36 (unidad 1)	JM-56 (unidad 1)	JM-50 (unidad 2)	JM-51 (unidad 2)	JM-58 (unidad 2)	JM-59 (unidad 2)	JM-49 (unidad 3)	JM-53 (unidad 3)	JM-13 (unidad 3)
Fenocristales	OI, Cpx	OI, Cpx	OI, Cpx, PI	OI, Cpx	OI, Opx, PI	OI, Cpx	OI, cpx, PI	OI, Cpx, PI	OI, Cpx, PI
Matriz	Microlítica de PI en textura traquítica	Microlítica de PI en textura traquítica	Microlítica de PI en textura traquítica	Microlítica de PI en textura traquítica	Microlítica de PI en textura traquítica	Microlítica de PI en textura traquítica	Microlítica de PI y cristales de Px en textura traquítica	Microlítica de PI y cristales de Px en textura traquítica	Microlítica de PI con cristales de Px en textura traquítica
Vesículas	Alargadas y redondeadas	Sin vesículas	Redondeadas	Alargadas	Alargadas	Redondeadas e irregulares	Alargadas y redondeadas	Redondeadas y ligeramente ovaladas	Redondeadas
Fenocristales Forma Tamaño	OI: Subhedral de 0.3 a 1.5 mm. Cpx: Subhedral de 1 a 1.2mm	OI: Subhedral de 0.3 a 3mm. Cpx: Subhedral de 0.03 a 1mm	OI: Subhedral de 1 mm de diámetro Cpx: Subhedral menor a 1mm PI: Subhedral, de 0.3mm. Presenta macla de albita	OI: Euhedrales de 1.5 mm de diámetro Cpx: Subhedrales menores a 1mm de diámetro	OI: Subhedrales de 0.09 mm de diámetro Cpx: Subhedrales de 0.3 a 0.45mm PI: Subhedral de 0.03mm de diámetro	OI: Euhedral y Subhedrales de 0.03 a 3 mm Cpx: Subhedrales de 0.3 a 0.45 mm PI: de 0.3 mm de diámetro. Presenta macla de albita.	OI: Subhedrales de 0.03 mm a 2.5 mm Cpx: Subhedrales de 0.3 mm de tamaño promedio PI: Subhedral de 0.3 mm de tamaño promedio	OI: Subhedral 0.03 mm a 1.5 mm Cpx: Subhedral de 0.3 mm de tamaño promedio PI: Subhedral de 0.3 mm de tamaño. Presenta macla de albita.	OI: Euhedrales y Subhedrales de 0.3 a 3 mm Cpx: subhedrales de 0.3 mm de tamaño promedio. PI: Subhedral de 0.3 mm en tamaño promedio con macla de albita.
Glomerocristales	Se distinguen de OI	De OI y Cpx	No existen	Se distinguen de OI	No existen	Se distinguen de OI	No existen	Se distinguen de OI	Se distinguen de OI
Rastros de alteración	No se observa	No se observa	Rastros de oxidación	No se observa	Alteración moderada en la matriz de plagioclasa	Óxidos afectando a la matriz de plagioclasa	No se observa	No se observa	No se observa

OI = Olivino, Cpx = clinopiroxeno Opx = ortopiroxeno, Px = piroxeno (Cpx o Opx, no identificado), PI =plagioclasa

Tabla 6 Análisis petrográfico de láminas delgadas de muestras de las formaciones de kipuka de Viaje a la Naturaleza (V.N.) y Zacayuca, además de la pirámide Tenantongo

Clave	JM-52 (V.N.)	JM-57 (V.N.)	JM-10 (V.N.)	JM-09 (V.N.)	JM-04 (V.N.)	JM-55 (Pirámide Tenantongo)	JM-54 (Zacayuca)
Fenocristales	OI	OI, PI	OI, PI	OI	OI	OI, PI	PI, Hbl, Px, Felds-K
Matriz	PI Textura porfídica con cristales inequigranulares de OI . Presencia de xenocristales de cuarzo bordeados de 0.5 mm de diámetro promedio Se encuentran bordeados por coronas de reacción de Px .	PI Textura porfídica con cristales inequigranulares de OI . Presenta xenocristales de cuarzo de 0.5mm a 1 mm de diámetro. Se encuentran bordeados por coronas de reacción de Px .	PI y Px Textura porfídica con cristales equigranulares de OI . Presencia de xenocristales de cuarzo de 1 mm de diámetro promedio. Se encuentran bordeados por coronas de reacción de Px	PI y Px Textura microlítica con cristales inequigranulares de OI . Contiene xenocristales de 1 mm de diámetro en promedio. Se encuentran bordeados por coronas de reacción de Px	PI y Px Textura porfídica con cristales equigranulares de OI . Contiene Xenocristales de 1 mm de diámetro promedio. Se encuentran bordeados por coronas de reacción de Px	PI Textura porfídica con cristales equigranulares de OI . Presencia de xenocristales de cuarzo bordeados de 0.5 a 1mm de diámetro. Se encuentran bordeados por coronas de reacción de Px .	Microcristalina de PI y Px con textura porfídica y cristales inequigranulares
Vesículas	Escasas vesículas alargadas y redondeadas de aprox 0.3 mm de diámetro.	Escasas vesículas irregulares de 0.3mm de diámetro.	Sin vesículas	Sin vesículas	Escasas vesículas irregulares redondeadas menores a 0.3mm	Escasas vesículas irregulares menores a 0.3 mm de diámetro.	Sin vesículas
Fenocristales Forma Tamaño	OI : subhedral de 1.2 mm de tamaño promedio.	OI : subhedral de 0.3 mm de tamaño PI : subhedral de 0.3 a 7 mm de diámetro promedio. Presenta zoneamiento.	OI : subhedral de 0.3 mm a 1 mm de diámetro. PI : subhedral de 0.3 mm de diámetro de promedio. Presenta macla de albita	OI : subhedral de 0.3 mm a 1.5 mm de diámetro.	OI : subhedral de 0.3 mm a 0.5 mm de diámetro. PI : subhedral de 0.3 mm de diámetro promedio. Presenta macla de albita.	OI : Subhedral de 0.3 mm a 0.5 mm de diámetro promedio. PI : Subhedral de 0.3 mm de diámetro. Presenta macla de albita.	PI : Euhedral a subhedral de 1 a 3 mm de diámetro, zoneamiento y macla de albita-Carlsbad. Hbl : Subhedral de 0.5mm de diámetro. Px : subhedral de 0.3 mm de diámetro Felds-K : Subhedral de 0.5mm de diámetro. Presenta macla de Carlsbad y zoneamiento.
Glomerocristales	De OI	De OI	De OI	De OI	No se observa	De OI	De Px
Rastros de alteración	Alteración en la matriz	Alteración de la matriz	Óxidos afectando a la fase de OI así como a la matriz de PI y Px	No se observa	Alteración afectando a la matriz.	Presencia de alteración en la matriz.	Presencia de óxidos en la matriz y afectando a la fase mineral Hbl

OI = Olivino, Cpx = clinopiroxeno Opx = ortopiroxeno, Px = piroxeno (Cpx o Opx, no identificado), PI =plagioclasa, Hbl = Hornblenda, Felds-K = Feldespato potásico

4.4 Geoquímica

De acuerdo con el diagrama TAS (Le Bas y cols., 1986), existen tres tipos de roca en el área, que corresponden con las formaciones Lava Xitle, kipuka Viaje a la Naturaleza y kipuka Zacayuca (Figura 18). Todas pertenecen al campo de la serie subalcalina y cubren un rango total de sílice del 51-62 wt. % y 4.5-5.7 wt. % de álcalis (Figura 18; anexo 1-3). Por otra parte, estos tres tipos de roca presentan diferentes patrones en un diagrama de tierras raras (Figura 19), los cuales consisten en Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Samario (Sm), Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Terbio (Tb), Disprobio (Dy), Holmio (Holmio), Erblio (Er), Tulio (Tm), Iterbio (Yb), Lutecio (Lu). Tal como para la petrografía, los sitios de muestreo se ubican en el mapa de la Figura 13.

4.4.1 Elementos mayores

El tipo de roca más máfico pertenece a la **formación Lava Xitle**, donde se obtuvieron un total de 5 muestras de las unidades 1, 2 y 3. Para la unidad 1 existe una pequeña diferencia del 1.2 wt. % de contenido en sílice entre las dos muestras analizadas (JM-36 y JM-56), siendo JM-56 la que tiene mayor SiO₂. JM-36 se encuentra en el campo del basalto, y JM-56 en el límite entre basalto y andesita-basáltica (Figura 18). Respecto a unidad 2, la única muestra analizada (JM-50) pertenece al campo del basalto. Para unidad 3, la muestra JM-49 se encuentra al borde entre el campo del basalto y andesita basáltica, mientras que la muestra JM-53 corresponde al campo del basalto (Figura 18). Cabe resaltar que, existe una diferencia del 1.5 wt. % de contenido de sílice entre ellas, siendo JM-49 la que contiene mayor SiO₂.

De manera general, las muestras de la formación Lava Xitle forman dos grupos composicionales (Figura 18) que no coinciden con las tres diferentes unidades que se identificaron en el mapeo. Un grupo de muestras es de composición basáltica (JM-36, JM-50, y JM-53), con valores de 51.0, 51.2, 51.3 de SiO₂ wt. % y 4.63, 4.64, 4.53 de Na₂O+K₂O wt. %, respectivamente. El otro grupo de muestras (JM-49 y JM-56) se encuentra justo en el borde entre los campos de basalto y andesita basáltica (52.5 y 52.2 de SiO₂ wt% y 5.00 y 4.9 de Na₂O + K₂O wt. %). Promediando el contenido de sílice de las 5 muestras, corresponde a un total de 51 wt. % dando así el campo del basalto.

El segundo tipo de roca pertenece a la **formación kipuka Viaje a la Naturaleza**, cuyas muestras caen en el campo de la "andesita-basáltica" (Figura 18). Las muestras correspondientes (JM-09, JM52, y JM-57) tienen una composición muy similar (55.0, 55.4 y 57.0 SiO₂ wt. %; 5.4, 5.4 y 5.3 Na₂O + K₂O wt. %), cuyo promedio es 55.2 wt. % de SiO₂ y 5.4 wt. % de Álcalis.

El tercer tipo de roca identificado corresponde a la **formación kipuka Zacayuca**, cuyo campo corresponde al de la andesita, cerca de su límite con el campo de la dácita (JM-54: 62.4 SiO₂ wt. %; 5.7 Na₂O + K₂O wt. %; Figura 18).

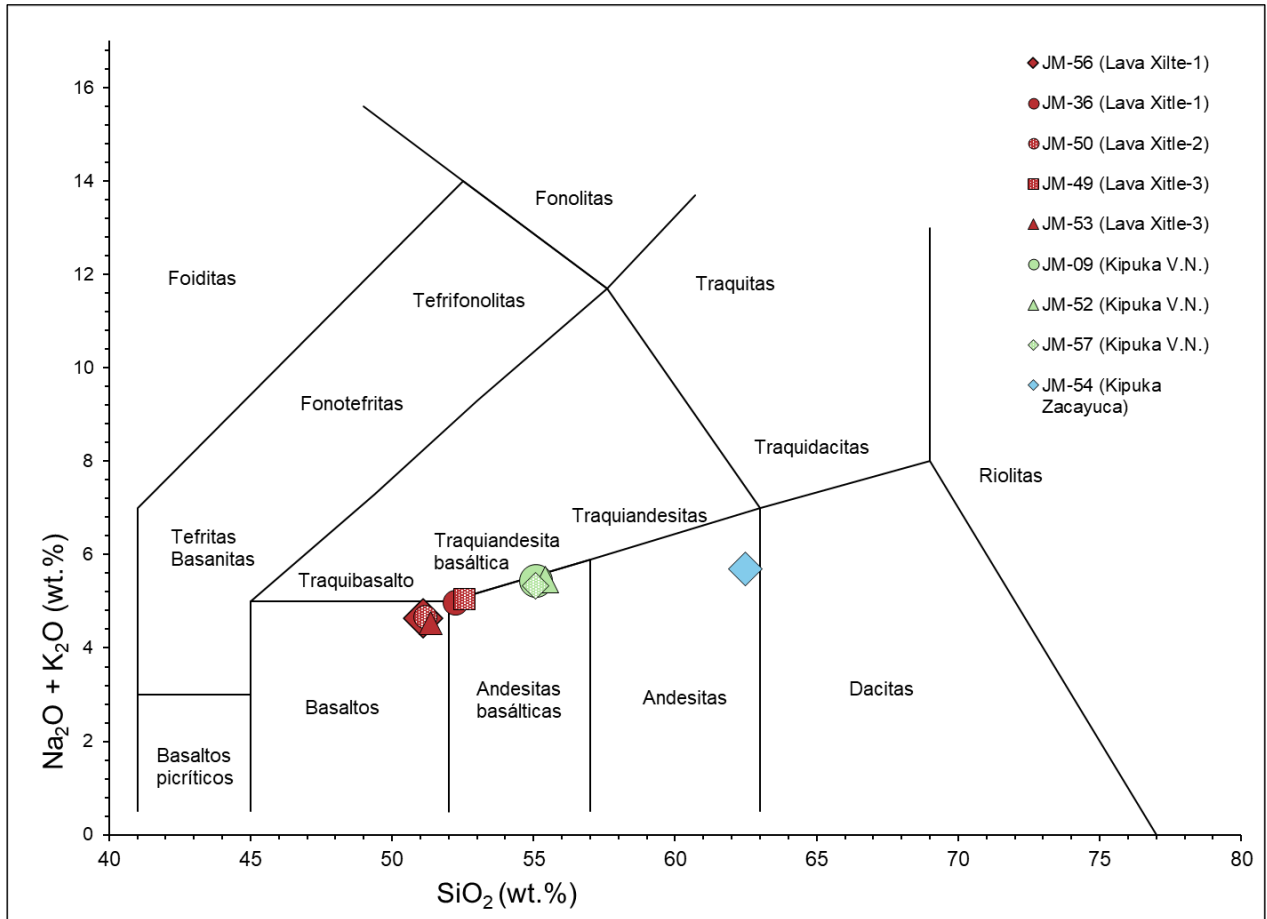


Figura 18. Diagrama de SiO_2 vs Álcalis total (TAS; Le Bas y cols., 1986). Para la elaboración del diagrama se normalizaron los valores de elementos mayores al 100%. Las muestras en rojo corresponden a la formación Xitle, las muestras en verde a la kipuka Viaje a la Naturaleza y la muestra en azul a la kipuka Zacayuca. La nomenclatura "Lava Xitle - 1" hace referencia a "Lava Xitle unidad 1" y así sucesivamente hasta la nomenclatura "Lava Xitle unidad 4".

4.4.2 Tierras raras

En diagramas de tierras raras, las muestras de la formación Lava Xitle muestran una tendencia negativa general, donde los dos grupos composicionales que se identificaron en el diagrama TAS siguen dos líneas composicionales paralelas entre sí (Figura 19). El grupo con mayor abundancia en tierras raras corresponde a las muestras con mayor SiO_2 . Así mismo, ambas líneas composicionales mantienen una ligera anomalía positiva de Tm (Figura 19).

Las muestras de la formación kipuka Viaje a la Naturaleza tienen composiciones muy similares en las tierras raras. Siguen un único patrón que muestra tres principales tendencias. La primera corresponde a una tendencia ligeramente descendiente para las tierras más ligeras (La, Ce, Pr). La segunda, corresponde a una tendencia negativa de las tierras intermedias (del elemento Nd hasta el Dy). La tercera, de las tierras pesadas, muestra una tendencia horizontal, que va del Ho, al Lu, donde se tiene una anomalía negativa de Yb.

La muestra de la formación kipuka Zacayuca presenta dos principales tendencias, una negativa en los elementos ligeros e intermedios (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy) y una horizontal en los elementos pesados (Ho, Er, Tm, Yb, Lu) teniendo una ligera anomalía positiva de Tm y Lu, y posiblemente una anomalía negativa de Yb.

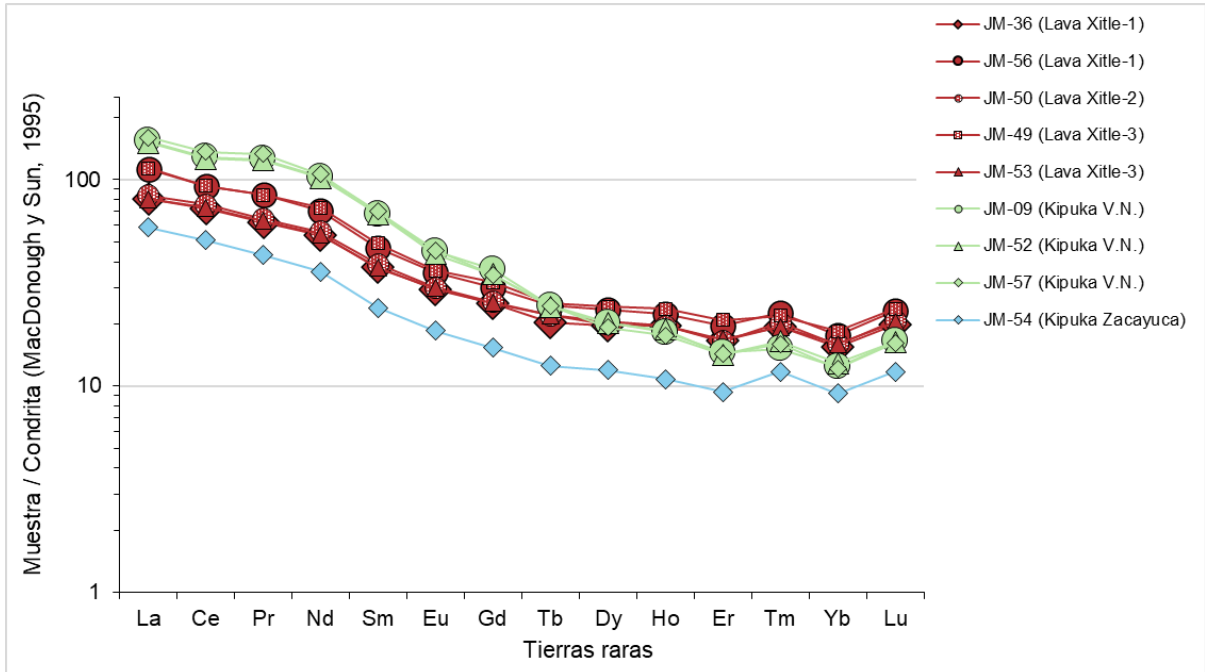


Figura 19. Diagrama de Tierras raras. Normalizado a los valores de condrita (McDonough, 1995). La nomenclatura "Lava Xitle - 1" hace referencia a "Lava Xitle unidad 1" y así sucesivamente hasta la nomenclatura "Lava Xitle unidad 3"

V.- Interpretación y discusión

5.1 Reconstrucción vulcanológica

Con base en las observaciones de las formaciones y sus contactos estratigráficos, se pudo reconstruir la secuencia de eventos volcánicos que han ocurrido en el área de estudio. Se identificaron un total de 4 eventos que han sucedido en un periodo de tiempo desde finales del Plioceno hasta el Holoceno (Figura 20A).

El primer, y más antiguo evento geológico, corresponde con la formación de las rocas que componen el cerro Zacayuca. Consta de grandes bloques con cristales redondeados de color gris claro con Pl y Anf. En cuanto al origen y edad de esta formación, no existen datos previos sobre este cerro, pero es claramente más antiguo que la pómez “Bosque de Tlalpan” que ha sido fechada a $25,666 \pm 180$ años (Arce y cols. 2017). En contraste, el cerro Zacatépetl cuenta con algo más de información al respecto, y de acuerdo con observaciones preliminares, podría ser compuesto por rocas afines al cerro Zacayuca. Cervantes y Molinero (1995) proponen que el cerro Zacatépetl es un montículo (hummock) que forma parte de una avalancha de escombros relacionada con el colapso del volcán Ajusco. Estos autores otorgan una fecha máxima de 3.37 ± 0.27 Ma a este avalancha, aplicando el método de K-Ar en cristales de Hbl contenidas en rocas parecidas en un sitio más cercano al Ajusco. Cabe resaltar que esta fecha es mucho mayor a otras fechas que han sido publicadas para el sector sur de la Sierra de las Cruces que incluye al Volcán Ajusco (1.8 Ma, Osete y cols. 2000). Además, es debatible si el cerro Zacatépetl es parte de una avalancha o más bien un domo dacítico independiente, como fue considerado por trabajos previos a Cervantes y Molinero (1995) y mencionados por ellos mismos. Se requieren mayores estudios sobre estos cerros para definir su origen y edad.

Subsecuente a este evento, se emplazaron las lavas de la formación Viaje a la Naturaleza, las cuales rodearon y parcialmente cubrieron a la formación Zacayuca. Lavas de esta formación habían sido llamadas como “andesitas Tenantongo” por Cervantes y Molinero (1995) quienes reportan descripciones petrográficas similares a las nuestras y datos de composición química de roca total también muy parecidos. Sin embargo, no reportan edades. También se observó que están recubiertas por el depósito de pómez “Bosque de Tlalpan”, por lo que, su edad es también más antigua a $25,666 \pm 180$ años.

El tercer evento geológico corresponde con el propio emplazamiento del depósito de pómez “Bosque de Tlalpan” ya mencionado hace aproximadamente $25,666 \pm 180$ años (Arce y cols. 2017). Arce y cols. (2017) propone que este depósito originó en una erupción volcánica de tipo pliniana proveniente de un volcán poligenético, que podrían ser el volcán Ajusco o el volcán San Miguel, de acuerdo con la distribución de espesores y la granulometría de los pocos afloramientos encontrados. Esto implicaría que el volcanismo de la Sierra de las Cruces podría haberse extendido hasta una fecha reciente, lo cual podría volver a ser activo en el futuro.

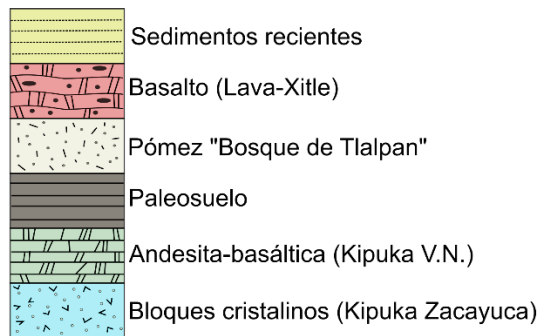
El último y cuarto evento volcánico corresponde con la erupción del volcán Xitle (Figura 23A). Ésta erupción ha sido fechada por radiocarbono en 1665 ± 65 años antes del presente (edad convencional, Siebe, 2000). Los flujos de lava de este volcán ubicado pendiente arriba del área de estudio cubrieron extensamente toda el área, enterrando la mayor parte de las formaciones previas, y dejando solamente los relieves más altos resultando en la configuración de las kipukas que se observan el día de hoy. Las lavas no fueron emplazadas en un solo evento, sino que se encontró evidencia del emplazamiento de varios flujos que

fueron sobreponiéndose con el tiempo. El flujo más antiguo corresponde a la unidad 1 cuya superficie fue cubierta parcialmente por la unidad 2. Posteriormente, la unidad 3 fluyó principalmente por un canal de lava sobre la unidad 2 y la formación kipuka Viaje a la Naturaleza culminando en un “delta” de lava. Por último, la unidad 4 formó parte de un gran flujo cuya dirección de flujo cambió de S-N a NE debido a la interacción que tuvo al bordear el flanco oeste del cerro Zacatépetl. Resaltamos que esta cartografía necesita confirmarse por un trabajo cartográfico sobre un área más amplia y adquiriendo fotografías aéreas con mayor antigüedad para el sector oeste del área de estudio.

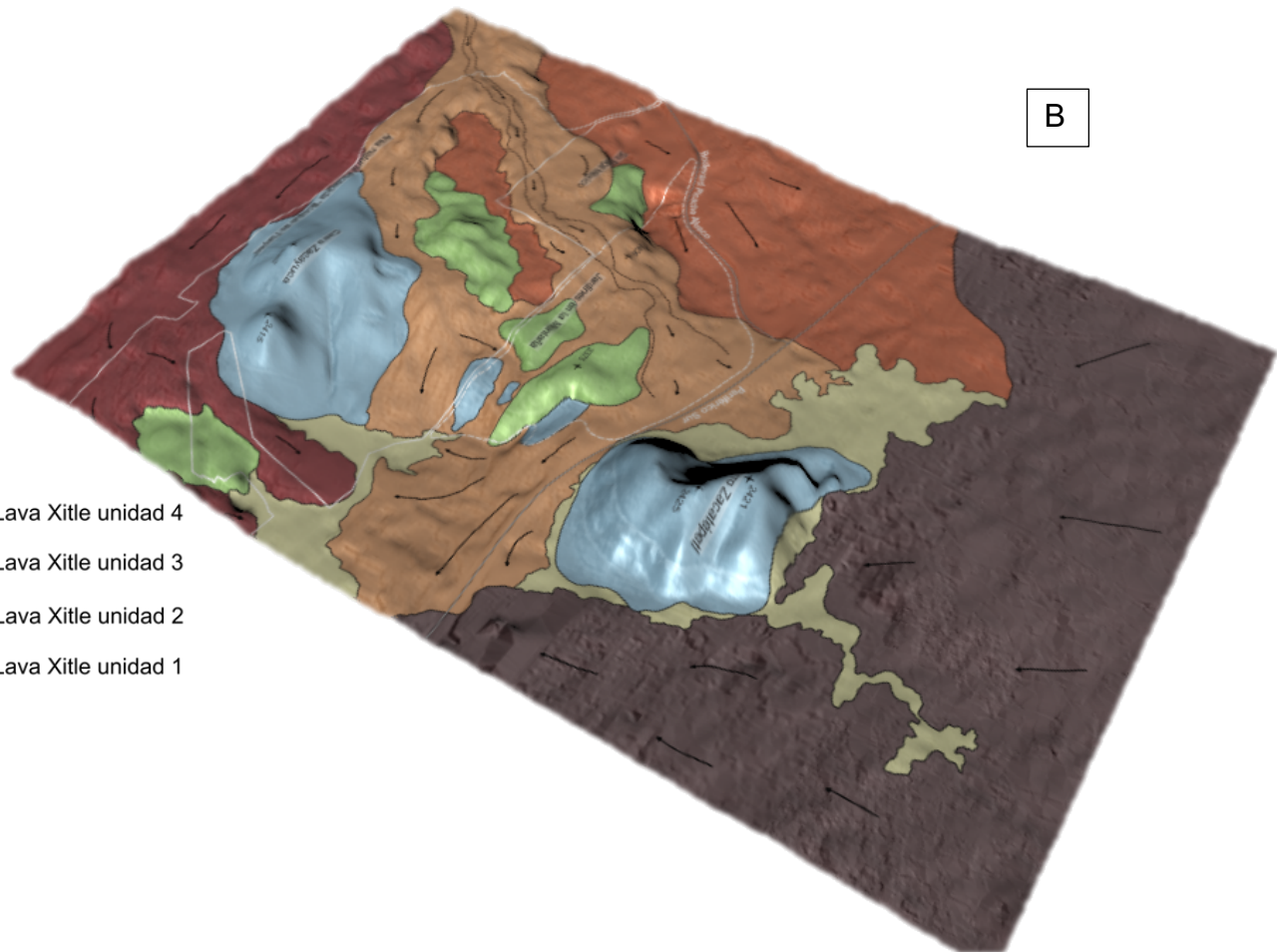
En resumen, este trabajo aportó datos importantes para reconstruir los eventos principales que han ocurrido en el área de estudio, aunque pone en evidencia la falta de estudios suficientemente detallados sobre el origen y la edad de los depósitos encontrados. Esta área resulta ser importante para reconstruir los eventos volcánicos antiguos que han ocurrido antes de la formación de la Sierra Chichinautzin y los productos geológicos que influyeron en la trayectoria de los flujos de lava del volcán Xitle. La figura 20B ilustra la integración de los eventos geológicos en un modelo 3D.

Simbología

A



B



1665 ± 65 años antes del presente (Siebe, 2000)

25,666 ± 180 años Arce y cols. (2017)

3.37 ± 0.27 Ma Cervantes y Molinero (1995)

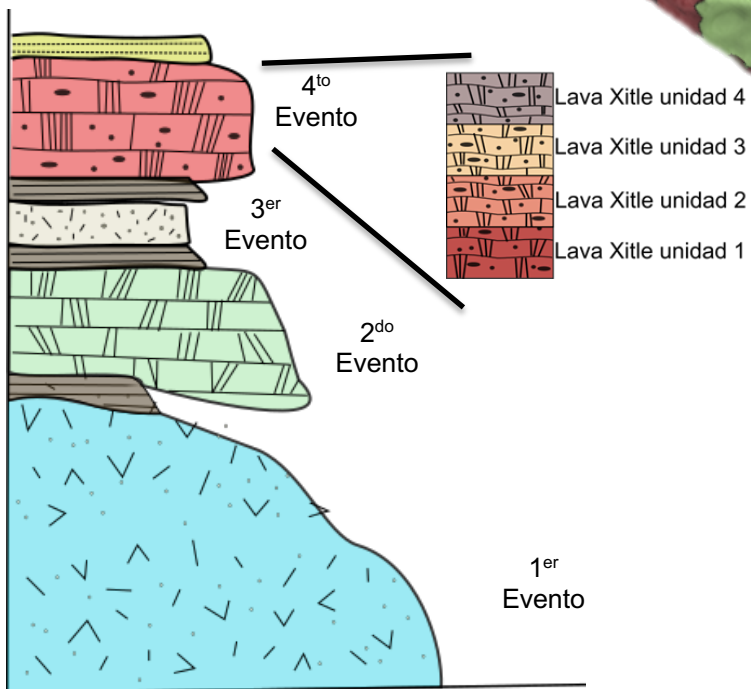


Figura 20. Representación gráfica de la sucesión de eventos volcánicos involucrados en la zona de estudio. A. Columna estratigráfica esquemática. B Relieve tridimensional construido a partir del Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR (clave e14a39e3) del 2011 obtenido de la biblioteca digital de INEGI y el empleo del plugin Qgis2threejs del software SIG "Qgis 3.30.3"

5.3 Valor del área para el geopatrimonio

En esta sección, se retomarán y se desarrollarán las ideas y conceptos mencionados en la introducción del presente estudio (sección 1.1), así como diferentes criterios relacionados con la caracterización del geopatrimonio que permiten discutir si el área de estudio de la presente tesis tiene un valor para el geopatrimonio.

5.3.1 Valor científico

Brilha (2018) establece que la geodiversidad es la serie de características y/o procesos geológicos y geomorfológicos pertenecientes a la diversidad natural. Mientras que geopatrimonio, es la justificación respaldada por criterios científicos, económicos, educativos, culturales y estéticos, por el cual uno o varios elementos de la geodiversidad merecen ser conservados (Brilha, 2018). En este sentido, establecemos que los elementos geológicos del área de estudio que son primordialmente de origen volcánico (geológicos y geomorfológicos) presentan geodiversidad, ya que estos resultados indican la presencia de rocas provenientes tanto de la Sierra Chichinautzin (volcán Xitle) como de la Sierra de las Cruces, las dos provincias volcánicas que predominan en este sector de la Ciudad de México. Se destaca que existen flujos de lava, grandes bloques de roca volcánica, y depósitos de pómez. Esto también refleja la variedad geológica que existe en la zona de estudio, puesto que cada uno de estos materiales volcánicos está relacionado con un tipo de evento volcánico o proceso de emplazamiento diferente. Por otro lado, la configuración geológica de las formaciones mencionadas resulta muy peculiar, dado que se encuentran en una distribución de kipukas, una geoforma que indica una periodicidad eruptiva y cambio del relieve a consecuencia de eventos volcánicos entre la Sierra Chichinautzin y la Sierra de las Cruces.

Prosser y cols. (2018) propusieron que para establecer esta “justificación” de conservación se requiere identificar y establecer un “valor” de conservación que varía de acuerdo con el criterio y enfoque del estudio en cuestión, sin embargo, sugieren que un punto de partida puede ser el criterio científico. Zwoliński y cols. (2018) sugirieron que durante el proceso de valorización se deben considerar métodos de investigación sobre la geodiversidad, por ejemplo, la cartografía y documentación, así como la integración de metodologías y estudios multidisciplinarios (datación de rocas, edafología, geofísica, etc) para conseguir el “reconocimiento” preciso de las características del entorno geográfico y geológico. De igual forma, Németh (2023) expresa que el valor de un elemento geológico debe estar respaldado primordialmente por el conocimiento científico que explique los procesos que le dieron origen. Németh (2023) propuso 6 principales características del vulcanismo que pueden ser meritorios de un valor geopatrimonial. El primero de ellos corresponde con la Intensidad de erupción, el segundo con el Tipo de Vulcanismo (Monogenético o Poligenético), el tercero con la Modificación del paisaje (construcción de aparatos volcánicos o formas del relieve), el cuarto con Variaciones composicionales (máfica, intermedia, félsica), el quinto con el Ambiente Tectónico, y, por último, las Facies volcánicas (Corriente piroclástica, flujo de lava, depósito de caída, lahar, etc).

La Tabla 7 presenta los elementos del área de estudio que se relacionan con los conceptos de Németh (2023).

Tabla 7. Elementos del geopatrimonio volcánico planteados por Németh (2023) aplicados en la zona de estudio

Németh (2023)	Este estudio (Justificación)
Intensidad de erupción	Se encontraron los productos de erupciones de diferentes intensidades, como la erupción pliniana que dio origen a la pómez del bosque de Tlalpan o la erupción efusiva y estromboliana que produjo las lavas del Xitle.
Tipo de vulcanismo	Con base al trabajo de campo y petrografía de esta investigación, se identificaron productos volcánicos tanto de tipo monogenético (flujos de lava asociados el volcán Xitle) y poligenético (bloques de roca y depósitos de pómez asociados a los volcanes de la Sierra de las Cruces).
Modificación del paisaje	La configuración geológica de la geodiversidad se ve representada por una construcción de kipukas, una serie de altos topográficos rodeados por flujos de lava. Fueron identificadas por fotogrametría y elaboración análisis cartográfico.
Variaciones composicionales	Se realizaron análisis químicos de roca total donde se encontraron una amplia variación composicional con base a la interpretación de diagramas TAS (Le Bas y cols., 1986) y multi-elementales de elementos traza.
Ambiente tectónico	De acuerdo con Wallace y Carmichael, 1999; Ferrari, 2000; Siebe y cols., 2004b; Schaaf y cols., 2005, el ambiente tectónico corresponde a una zona de subducción, entre la placa Norteamericana y Cocos. En este caso, esta información es apoyada por la literatura científica.
Facies Volcánicas	Las facies principales son depósitos de pómez correspondientes a una erupción de tipo Pliniana y flujos de lava, donde éstos últimos podemos encontrar lavas pahoehoe y a'a mediante el registro estratigráfico observado en trabajo de campo.

Se puede deducir de la correlación en la Tabla 9, que el valor geopatrimonial de la zona de estudio es alto debido a encontramos en el área productos de erupciones de diferentes intensidades, que la configuración geológica está determinada por dos tipos de vulcanismo muy contrastantes (monogenético y poligenético) cuya representación se da mediante la distribución de kipukas que reflejan una “sucesión” de eventos volcánicos, cuyos productos geológicos muestran diferencias geoquímicas, petrográficas, y geomorfológicas, es decir una “geodiversidad geológica”.

Además, se observa que esta geodiversidad influye sobre otros procesos naturales como la actividad biológica y la dinámica de ecosistema, ya que un kipuka posee una gran cualidad ecológica. Funcionan como un punto de partida para la colonización de nuevas áreas volcánicas por parte de la vegetación circundante, participan así a la propagación de especies, generación de ecosistemas (USGS National Park Service, 2021), y el desarrollo de biodiversidad. Específicamente, en el área de estudio, se ha documentado una gran diversidad biológica. De acuerdo con Galicia y Flores-Martínez. (2023), la flora del parque Viaje a la Naturaleza presenta un total de 241 especies de plantas, de las cuales 109 son emblemáticas de la vegetación del Pedregal de San Ángel, 61 son especies exóticas de México, y 49 son consideradas endémicas del país. Resaltan que existen especies como *Furcraea parmentieri*, *Bursera cuneata*, *Ponthieva schaffneri* y *Deiregyne albovaginata* cuyo estatus es de especies amenazadas. Respecto a la fauna, estos mismos autores indican la existencia de 4 especies de reptiles de las cuales *Sceloporus grammicus* y *S. torquatus* han

sido identificadas, aunado a esto, comentan que se pueden encontrar 49 especies de aves, de las que destacan el gavilán de Cooper (*Accipiter cooperii*) y el aguililla de pecho rojo (*Buteo lineatus*). Por otro lado, los autores estimaron que puede haber un aproximado de 817 especies de artrópodos. Respecto al ANP “Bosque de Tlalpan”, la Gaceta Oficial del Distrito Federal publicada el 20 de junio de 2011 (<http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/4504.htm>) presenta el “Programa de Manejo del Área Natural Protegida Bosque de Tlalpan” en donde describen las características naturales del “Bosque de Tlalpan”, y establece que la relevancia biológica del bosque está representada principalmente por matorral xerófito y bosque de encino, un aproximado de 83 especies de aves, de las cuales 49.4 % son migratorias, 47 especies de mamíferos de las que destacan *Didelphys virginiana*, *Bassariscus astutus*, *Mustela frenata*, *Sciurus aureogaster*, *Sylvilagus floridanus*, *Sorex spp* y *Cryptotis sp*, 9 especies de reptiles como *Pituophis deppei* (amenazada), *Thamnophis scaliger* (amenazada), *Crotalus molossus* y *Sceloporus grammicus* (ambas protegidas). Por último, es considerada la presencia de 60 especies de mariposas y un aproximado de 1,000 artrópodos.

En resumen, se puede demostrar que existe una importante geo y bio diversidad en el área de estudio, ambas con un alto valor científico puesto que la información está respaldada por diversas metodologías, disciplinas, y la participación de investigadores en diversas áreas que han dado sustento en la identificación de los elementos de la naturaleza relacionados con el área de estudio en cuestión.

5.3.2 Valor arqueológico

Existen evidencias que la zona de estudio tiene un alto valor cultural, en particular de naturaleza arqueológica. Durante nuestra investigación de campo, encontramos vestigios arqueológicos localizados en la cima del cerro Zacatépetl y el cerro Zacayuca, así como una estructura piramidal localizada en el ANP “Bosque de Tlalpan” conocida como “Piramide Tenantongo”. El cerro Zacatépetl de acuerdo con Medina (1995), era considerado “sagrado” y catalogado como de tipo chichimeca, por sus características geográficas como agrestes y áridas. En él, se ritualizaba una cacería que remitía al pasado recolector-cazador de los pueblos que dominaban la Cuenca de México, así como la dramatización cosmogónica de la guerra (Medina, 1995). Para Broda (2016), el sitio arqueológico situado en el cerro Zacatépetl es sucesor al sitio de Cuicuilco, perteneciente al periodo Preclásico. Al igual que Medina (1995), Broda (2016) comenta que se realizaba un ritual de cacería mayormente con “sacrificios de sangre”, además, se llevaban a cabo procesiones por parte de los aztecas desde Tenochtitlan hasta el sitio, donde caminaban por senderos y brechas inhóspitos y muy agrestes, que corresponde al llamado “Malpaís”. Broda (2016) propone que el santuario del cerro Zacatépetl se encuentra alineado con otros centros ceremoniales localizados con la Sierra de las Cruces, por ejemplo, el Cerro Judío (Mazatepetl). Ramírez (2012) menciona que la “Piramide Tenantongo” o “Monte Tenantongo” pertenece al sitio arqueológico de Cuicuilco cuyo periodo corresponde con el Preclásico Tardío, donde su construcción es similar al centro principal de Cuicuilco, es decir de geometría circular y pudo estar rodeada por cuerpos de agua somera, cuyo propósito era el desarrollo de la agricultura. Respecto al vestigio arqueológico ubicado en la cima del Cerro Zacayuca, no encontramos información publicada al respecto, a pesar de ser denominado “Pirámide de los sacrificios Cuicuilca” en el portal “Google Maps”.

En resumen, podemos deducir que existe una relación entre la arqueología y la geología en el área de estudio. Observamos una conexión importante, dado que la geología de la zona de estudio fue importante para la construcción de sitios arqueológicos, principalmente por la topografía y como material de construcción dado que el santuario ubicado en el cerro Zacatépetl fue construido con roca volcánica local, al igual que el “Monte Tenantongo” y el sitio de sacrificios Cuicuilca, específicamente, el santuario del cerro Zacatépetl fue construido

con rocas del volcán Xitle, “El Monte Tenantongo” por rocas de la formación Viaje a la Naturaleza, y el sitio de sacrificios Cuicuilca, fue adaptado a partir de rocas pertenecientes a la formación Zacayuca. Resulta un tanto curioso, pero esto remarca el valor que ahora poseen estas rocas, ya que tienen un pasado, no solo geológico, sino también arqueológico.

5.4 Valor educativo y propuesta de difusión del valor del área

Prosser y cols. (2018) comenta que resulta de vital importancia para la ciencia conservar el geopatrimonio dado que los elementos de la geodiversidad con un fuerte valor científico conservan información importante sobre la dinámica e historia de la Tierra. Esto resulta que, en ocasiones, la geodiversidad únicamente sea valorada bajo el criterio científico, cuando puede tener valores adicionales muy relevantes para la sociedad. No obstante, la participación de la sociedad en la conservación de la geodiversidad puede agregarle un valor, cuyo beneficio sea para la misma sociedad, por ejemplo, el desarrollo del geoturismo que involucra la transmisión de conocimientos hacia visitantes en un determinado sitio con valor científico (Mata-Perelló y cols., 2018).

En el área de estudio cabe destacar las iniciativas de un grupo de vecinos de la residencial Jardines en la Montaña quienes han creado un “Comité de ecología” cuyo objetivo es: “el rescate de los bosques urbanos que se encuentran dentro del fraccionamiento con la asesoría de un grupo de biólogos y el trabajo voluntario de los vecinos” (Herminia Torres 2024, comunicación personal). Sin embargo, el comité ha realizado una multitud de otras actividades, dentro de las que destacan es el conocer mejor la biodiversidad del parque y crear espacios para la recreación como actividades al aire libre, difusión de la biodiversidad del parque, y actividades relacionadas con prácticas ecologistas y de sustentabilidad. Urroz (2022) explica de manera detallada el proceso de creación del “Comité de Ecología”, así como la transformación del parque y como se han creado lazos de amistad entre vecinos que comparten una misma visión sobre su entorno. Esto resulta importante, ya que, a través del reconocimiento de la biodiversidad, los vecinos han apreciado este espacio generando información científica que ha servido, en primera instancia, para el aprendizaje de ellos mismos. Es decir, han creado una “bioeducación” de su entorno. Esto ha servido como un referente, puesto que diversas comunidades, de barrios aledaños, han entablado comunicación con el fin de “aprender” sobre proyectos de conservación. En este sentido, la presente investigación aportó información relevante que complementa el conocimiento científico mediante la caracterización geológica del parque Viaje a la Naturaleza, cuyo fin se ve reflejado en el aporte del sentido de pertenencia por parte de los residentes, así como un cúmulo de información que promueve la “geoeducación” de los residentes.

Para difundir los resultados a la comunidad y generar conciencia sobre el valor científico y ambiental de estos espacios, se diseñaron propuestas de geosenderos en dos partes: Jardines en la Montaña y el Bosque de Tlalpan. Cabe mencionar que el recorrido y las paradas seleccionadas fueron elegidos de acuerdo con las observaciones de campo, análisis de resultados, y representatividad para exponer la geodiversidad de la zona de estudio.

La propuesta de realizar geosenderos tiene como principal objetivo exponer la geodiversidad que existe en el área de estudio, para ello, se diseñaron 2 rutas de recorrido. El primer diseño contempla un recorrido a través de las calles de la residencial “Jardines en la Montaña” mediante un trayecto (Figura 24) que permite observar cada una de las diferentes formaciones descritas con anterioridad a través de pequeños pedregales que existen en parques y calles de la residencial. La ruta consiste en 9 paradas. Presenta una longitud de aproximadamente 2.40 km y un tiempo aproximado de recorrido de 2 hrs. Cabe señalar que la configuración de la ruta tuvo como base generar una conexión y organización de los pedregales ya que de esta forma pueden agruparse a la formación geológica que le

corresponde. Esta condición permite que sean tratados como extensiones de la formación geológica y puedan ser considerados como una sola área "virtual". El agrupar y conectar los remanentes de pedregales permite dar sentido a la configuración geológica del lugar y facilitar su estudio en investigaciones futuras. Respecto al geosendero del ANP "Bosque de Tlalpan" se desarrolló una ruta de 6.5 km con 7 paradas en total con un tiempo aproximado de recorrido de 3 horas, donde se plantea la visita de todas las formaciones geológicas descritas en la presente tesis. El diseño del geosendero tuvo como base cubrir la observación de todas las formaciones en la menor distancia posible debido a que el bosque es un área de mayor extensión respecto a la residencial de Jardines en la Montaña. No obstante, esta misma condición permite que los afloramientos de roca tengan una mayor superficie expuesta y faciliten la observación de un mayor número de características de tipo regional, por ejemplo, demostrar la magnitud de un evento volcánico y la dispersión de los productos generados por dicho evento.

Cabe señalar que los pedregales de Jardines en la Montaña y el ANP "Bosque de Tlalpan" representan remanentes de geodiversidad dentro de un área urbana, por lo que la elaboración de geosenderos también busca ser una iniciativa para conservar estos espacios a través de la apreciación y aprendizaje de la geología local. No obstante, es importante considerar algunas dificultades que presentan. Por un lado, el geosendero de la residencial Jardines en la Montaña tiene un acceso limitado dado que se encuentra dentro del fraccionamiento y resulta que no puede ser considerado para el público en general, pero sí para conservación y geoeducación de los vecinos del fraccionamiento, mientras que el geosendero del "Bosque de Tlalpan" padece de logística, ya que no existen insumos de ubicación y localización de senderos representados en infografías o mapas dentro del bosque, esta situación tiene múltiples afectaciones como la gestión de tiempo durante el recorrido. No obstante, estas condiciones no afectan el principal objetivo de cada geosendero. De manera general las tablas 10 y 11 muestran la estructura de cada recorrido, así como la agrupación de paradas, correspondencia con las formaciones geológicas y el propósito de observación.

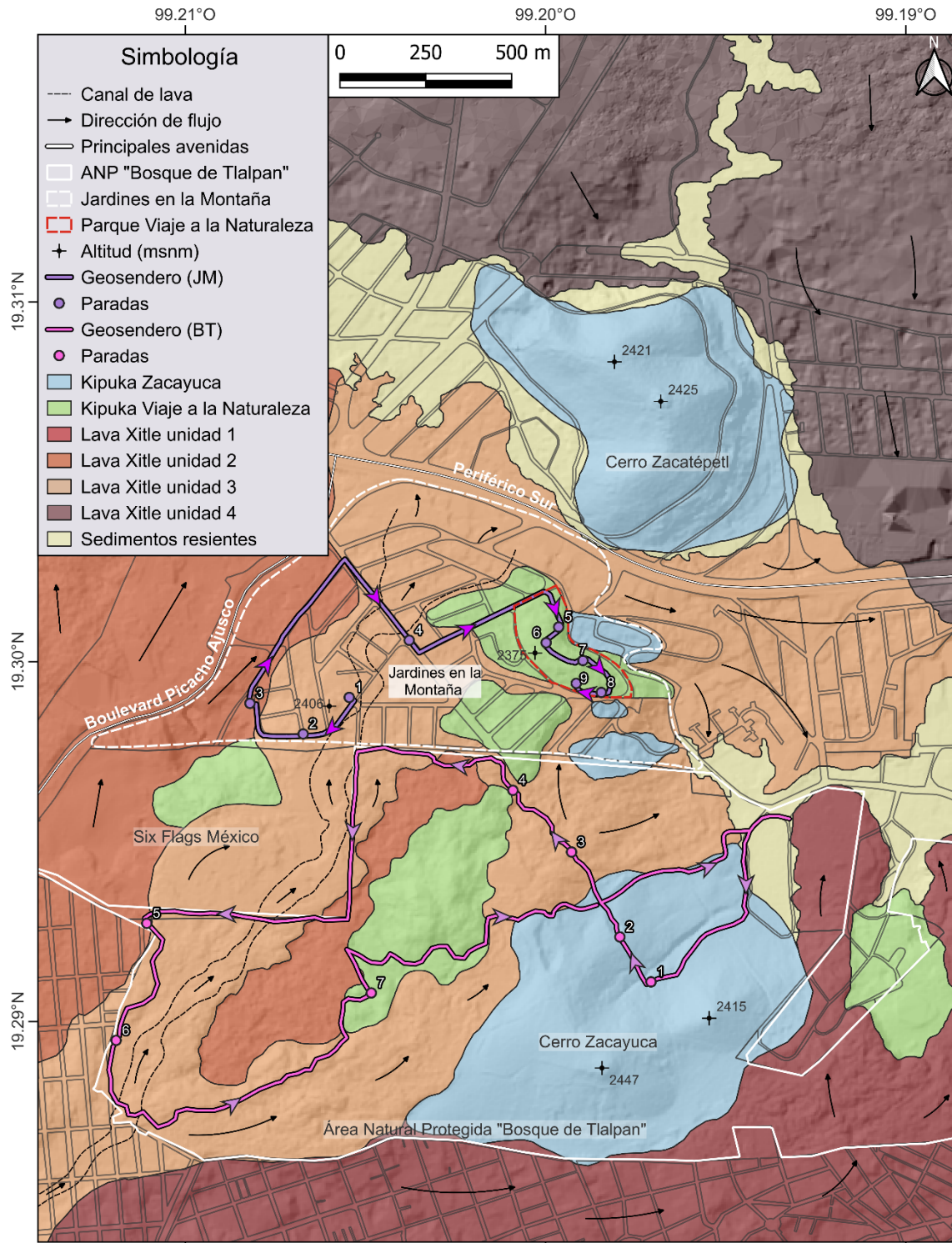


Figura 21. Propuesta de Geosenderos en la residencial Jardines en la Montaña (JM) y el Bosque de Tlalpan (BT).

Tabla 8. Descripción resumida de las paradas del Geosendero propuesto para la residencial Jardines en la Montaña

Parada	Formación geológica	Representatividad	Descripción
1 y 2	Lava Xitle unidad 3	Estructuras de levée y superposición de flujos	Los sitios se encuentran cerca del parque central donde se ha establecido el edificio de la Asociación de colonos. El área se encuentra altamente modificada y acondicionada para el esparcimiento de los vecinos por lo que los afloramientos pierden algunas de sus características como la disposición y geometría.
3	Lava Xitle unidad 2	Lavas pahoehoe con superficies cordadas, lenguas, lóbulos y pequeños túmulos	El afloramiento es ideal para observar y apreciar formas generadas por el desplazamiento de una lava muy fluida.
4	Lava Xitle unidad 3	Pequeño remanente de lava que corresponde al borde de una canal de lava	Este sitio se encuentra al centro de un camellón. El propósito de la parada consiste en ejemplificar la pérdida de espacios y destrucción de la geodiversidad.
5 y 6	kipuka Viaje a la Naturaleza	Grandes bloques de lava y mirador a la ciudad	Este sitio tiene como propósito mostrar las diferencias entre este tipo de lava antigua y las lavas del Xitle que se vieron en sitios anteriores.
7	Pómez Bosque de Tlalpan	Depósito de pómez	El depósito de pómez está descansando en este sitio sobre la formación kipuka V.N. A pesar de su alto nivel de alteración, se distinguen fragmentos de pómez. Permite hablar de las erupciones de tipo pliniana.
9 y 8	Contacto entre la unidad Lava Xitle unidad 3 y V.N. (Formación de kipukas)	Brecha Volcánica Contactos directos entre unidades	Interacción entre dos tipos de lavas y diferencias que presentan en estructura, color y superficies. Cómo se construye un kipuka y sus implicaciones ecológicas.

Tabla 9. Descripción resumida de las paradas del Geosendero propuesto para el ANP “Bosque de Tlalpan”

Parada	Formación geológica	Representatividad	Observaciones
1	kipuka Zacayuca	Suelos bien desarrollados, bosque y erosión	En este sitio se ven los suelos arcillos que recubren la kipuka y dan pie a un bosque diverso; se evidencia también evidencia de erosión hídrica antigua (canales).
1	Pómez del bosque de Tlalpán	Sitio de mayor exposición de un depósito de pómez	El sitio es ideal para enseñar los productos típicos de una erupción volcánica de tipo Pliniana.
3	Lava Xitle unidad 3 (Lavas de tipo a'a)	Superficies ásperas en una lava, texturas vesiculares y observación de cristales de olivino	El sitio es ideal para mostrar un tipo de lava característico de erupciones de tipo monogenético y cómo estos son guiados por medio de la topografía.
4	kipuka V.N. (Bloques de lava)	Contraste entre las unidades 2 y 3 de las formaciones Lava Xitle y kipuka V.N.	El sitio demuestra las diferencias que existen entre la vegetación que se desarrolló entre cada unidad, y cómo esta se desarrolla de acuerdo con el tipo de roca.
5	Lava Xitle unidad 2 (Lavas pahoehoe)	Túmulos y superficies cordadas	Sitio ideal para ejemplificar geoformas de flujo que adquieren las coladas de lava fluidas.
6	Lava Xitle unidad 3 (Canal de lava)	Canalización de un flujo de lava, estructuras de levée y vista directa al volcán Xitle	El sitio permite observar el cono del Xitle a distancia, la manera en cómo se desplazó Lava Xitle unidad 3 mediante un canal, además, de las estructuras típicas de canales con bordes de levée, lava balls, brechas volcánicas y lavas de tipo a'a.
7	kipuka V.N. (Representación de un kipuka)	Islas de material volcánico bordeado por flujos de lava más recientes	El sitio permite ejemplificar cómo se forma un kipuka y que implicaciones tiene para los ecosistemas.

VI.-Conclusiones

En conclusión, este estudio ha sido fundamental para revelar la complejidad geológica que caracteriza a un área altamente urbanizada de la Ciudad de México que incluye la zona residencial de Jardines en la Montaña y el Área Natural Protegida "Bosque de Tlalpan". Cabe notar que parte de estos resultados se encuentran publicados en Guilbaud y cols. (2024).

La identificación de pedregales remanentes productos de eventos volcánicos distintos y muy anteriores a la erupción del volcán Xitle, la cual es relativamente bien conocida en el área, constituye un descubrimiento de gran importancia, proporcionando valiosa información sobre la evolución geológica de la región.

Se descarta que, aún existen inconsistencias en la geocronología de las formaciones descritas en la presente tesis. Únicamente se consideraron fechas registradas en la literatura y para lograr una mejor reconstrucción cronológica es necesario desarrollar más estudios enfocados en realizar fechamientos radiométricos a las formaciones kipuka Zacayuca y Viaje a la Naturaleza.

Asimismo, el análisis geoquímico de los productos volcánicos aporta nuevos datos que completan la información existente para esta región.

Aún queda incertidumbre en definir el origen de los cerros Zacayuca y Zacatépetl dado que puedan tratarse como domos dacíticos y no como un depósito de escombros generado por el colapso del flanco norte del volcán Ajusco. De igual manera estos dos cerros podrían tener orígenes distintos.

La presencia de centros arqueológicos de edad preclásica construidos con materiales provenientes de las formaciones geológicas estudiadas resalta la estrecha relación entre la geología y la cultura desarrollada en tiempos prehispánicos, lo que permite enriquecer el valor patrimonial.

Además, la generación de cartografía detallada y la propuesta de diseño de geosenderos representan herramientas prácticas para la difusión del conocimiento geológico y la promoción de la geodiversidad para las poblaciones locales en la zona. Este estudio no solo ha contribuido significativamente al avance del conocimiento científico sobre la geología local, sino que también ha sentado las bases para futuras investigaciones y acciones de conservación orientadas a preservar la rica diversidad geológica y cultural al sur de la Cuenca de México.

VII.-Referencias

- Agustín-Flores, J., Siebe, C., & Guilbaud, M. N. (2011). Geology and geochemistry of Pelagatos, Cerro del Agua, and Dos Cerros monogenetic volcanoes in the Sierra Chichinautzin volcanic field, south of Mexico City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1-4), 143-162.
- Arce, J. L., Cruz-Fuentes, D., Ramírez-Luna, A., Herrera-Huerta, I. A., & Girón-García, P. (2017). Pómez Bosque de Tlalpan, producto de una erupción de gran magnitud en el margen suroeste de la cuenca de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 34(3), 274-288.
- Arce, J. L., Layer, P. W., Lassiter, J. C., Benowitz, J. A., Macías, J. L., & Ramírez-Espinosa, J. (2013a). ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating, geochemistry, and isotopic analyses of the quaternary Chichinautzin volcanic field, south of Mexico City: implications for timing, eruption rate, and distribution of volcanism. *Bulletin of Volcanology*, 75, 1-25.
- Arce, J. L., Layer, P. W., Morales-Casique, E., Benowitz, J. A., Rangel, E., & Escolero, O. (2013). New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and whole-rock chemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 266, 34-49.
- Arce, JL, Layer, PW, Macías, JL, Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, FJ, Vásquez-Serrano, A. (2019). Geología y estratigrafía de la cuenca de México (Ciudad de México), cinturón volcánico transmexicano central. *Revista de Mapas*, 15 (2), 320-332.
- Avelar, S., Mansur, K. L., Anjos, S. C., & Vasconcelos, G. F. (2015). Community perceptions for geoconservation of a coastal area in Rio de Janeiro, Brazil. *Geoheritage*, 7, 275-283.
- Brilha, J. (2016). Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage*, 8(2), 119-134.
- Brilha, J. (2018). *Geoheritage: Inventories and Evaluation*. E, Reynard. J, Brilha (Eds.), Geoheritage (pp. 69-85) ISBN 9780128095317
- Broda, J. (2016). Processions and Aztec state rituals in the landscape of the Valley of Mexico. *Occasional Papers in Anthropology at Penn State*, (33), 179-211.
- Cadoux, A., Missenard, Y., Martínez-Serrano, R. G., & Guillou, H. (2011). Trenchward Plio-Quaternary volcanism migration in the Trans-Mexican Volcanic Belt: the case of the Sierra Nevada range. *Geological Magazine*, 148(3), 492-506.
- Cervantes, P., & Wallace, P. (2003). Magma degassing and basaltic eruption styles: a case study of ~ 2000-year BP Xitle volcano in central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 120(3-4), 249-270.
- Cervantes, Pablo. Molinero, Ricardo (1995) *Eventos Volcánicos al sur de la Ciudad de México*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Christlieb, F. F., & Merodio, G. G. *Cultura y territorialidad en la ocupación de un mismo espacio: México-Tenochtitlan y la Ciudad de México en el siglo XVI*.

Córdova, C., del Pozzo, A. L. M., & Camacho, J. L. (1994). Palaeolandforms and volcanic impact on the environment of prehistoric Cuicuilco, Southern Mexico City. *Journal of Archaeological Science*, 21(5), 585-596

Del Pozzo, A. M. (1982). Monogenetic vulcanism in sierra Chichinautzin, Mexico. *Bulletin Volcanologique*, 45, 9-24.

Delgado-Granados, H., Molinero, R., Cervantes, P., Nieto-Obregón, J., Lozano-Santa Cruz, R., Macías-González, H. L., ... & Silva-Romo, G. (1998). Geology of Xitle volcano in southern Mexico City—a 2000-year-old monogenetic volcano in an urban area. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 15(2), 115-131.

Diccionario del Español de México (DEM) <http://dem.colmex.mx>, El Colegio de México, A.C., [12 de abril del 2023].

Enciso-De la Vega, S. (1992). PROPUESTA DE NOMENCLATURA ESTRATIGRÁFICA PARA LA CUENCA DE MEXICO. *Revista, volumen*, 10(1), 26-36.

Galicia, R., Flores-Martínez, J. (2023). Estudio previo justificativo para la declaración del área de valor ambiental con categoría de bosque urbano a “Viaje a la Naturaleza”.

García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., & Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(1), 158-178.

Guilbaud, M.-N., Villalba, N. I., Rodríguez Osnaya, E., Ortega-Larrocea M.P., Zeno-Lira, E., Cram-Heydrich, S. (2024). The multiple values of urban geosites: EL Arenal and Viaje a la Naturaleza parks in Mexico City. *Geofísica Internacional*, 63(3), 1067–1085. <https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2024.63.3.1767>

Granados, H. D., & del Pozzo, L. M. (1993). Pliocene to Holocene volcanic geology at the junction of Las Cruces, Chichinautzin and Ajusco ranges, southwest of Mexico City. *Geofísica Internacional*, 32(3), 511-522.

Gray, M. (2018). Geodiversity: The Backbone of Geoheritage and Geoconservation. E, Reynard, J, Brilha (Eds.), *Geoheritage* (pp. 13-25) ISBN 9780128095317

Guilbaud, M.-N., del Pilar Ortega-Larrocea, M., Cram, S., & de Vries, B. van W. (2021). Xitle Volcano Geoheritage, Mexico City: Raising Awareness of Natural Hazards and Environmental Sustainability in Active Volcanic Areas. *GEOHERITAGE*, 13(1), 6.

Jaimes-Viera, M. D. C., Del Pozzo, A. M., Layer, P. W., Benowitz, J. A., & Nieto-Torres, A. (2018). Timing the evolution of a monogenetic volcanic field: Sierra Chichinautzin, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 356, 225-242.

Le Bas, M.J., Le maitre, R.W., Strecksein, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.* 27, 745–750.

Lenz, K.A. (2010). Cerro de Zacayucan, actualmente Bosque de Tlalpan. Mexico, Mitt, No. 600, 20–24.

MacCaughy, V. (1917). Vegetation of Hawaiian lava flows. *Botanical Gazette*, 64(5), 386-420.

Macdonald, G. A., & Hubbard, D. H. (1951). *Volcanoes of Hawaii National Park* (1.^a ed.). Naturalist Division, Hawaii National Park.

Macías, J. L., Arce, J. L., García-Tenorio, F., Layer, P. W., Rueda, H., Reyes-Agustin, G., ... & Avellán, D. (2012). Geology and geochronology of Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl, and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico.

Mata-Perelló, J., Carrión, P., Molina, J., & Villas-Boas, R. (2018). Geomining heritage as a tool to promote the social development of rural communities. E, Reynard. J, Brilha (Eds.), *Geoheritage* (pp. 167-177).

Medina, A. (1995). Los sistemas de cargos en la Cuenca de México: una primera aproximación a su trasfondo histórico. *Alteridades*, 5(9), 7-23.

Meriggi, L., Macías, J. L., Tommasini, S., Capra, L., & Conticelli, S. (2008). Heterogeneous magmas of the Quaternary Sierra Chichinautzin volcanic field (central Mexico): the role of an amphibole-bearing mantle and magmatic evolution processes. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(2), 197-216.

Mueller-Dombois, D., & Lamoureux, C. H. (1967). Soil-vegetation relationships in Hawaiian kipukas.

National Park Service (2021,5 de mayo). Kipuka, Islands Within Islands. Recuperado el 3 de octubre de 2023 <https://www.nps.gov/havo/learn/nature/kipuka.htm>

Németh, K. (2023). Volcanic Geoheritage in the Light of Volcano Geology. In: Dóniz-Páez, J., Pérez, N.M. (eds) *El Hierro Island Global Geopark. Geoheritage, Geoparks and Geotourism*. Springer, Cham.

Nieto-Torres, A., Espinasa-Pereña, R., & Martín Del Pozzo, A. L. (2022). The Xitle Lava Tubes in México City, Conservation or Destruction? *Geoheritage*, 14(2), 66.

Nixon, G. T., Demant, A., Armstrong, R. L., & Harakal, J. E. (1987). K-Ar and geologic data bearing on the age and evolution of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, 26(1), 109-158.

Orozco, J. J. Z., García, L. M. T., Hubp, J. L., & Rubio, G. S. (2002). Evolución geológica y geomorfología del complejo dómico Los Pitos, norte de la Cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(1), 66-79.

Osete, ML, Ruiz-Martínez, VC, Caballero, C., Galindo, C., Urrutia-Fucugauchi, J., & Tarling, DH (2000). Migración hacia el sur de la actividad volcánica continental en la Sierra de Las Cruces, México: evidencia paleomagnética y radiométrica. *Tectonofísica*, 318 (1-4), 201-215.

Palacio Prieto, J. L., & Guilbaud, M. N. (2015). Patrimonio natural de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y áreas cercanas: sitios de interés geológico y geomorfológico al sur de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 227-244.

Palacio-Prieto, J. L. (2014). Geoheritage Within Cities: Urban Geosites in Mexico City. *Geoheritage*, 7(4), 365-373–373.

Prosser, C. D. (2019). Communities, quarries and geoheritage—making the connections. *Geoheritage*, 11(4), 1277-1289.

Prosser, C. D., Díaz-Martínez, E., & Larwood, J. G. (2018). The conservation of geosites: principles and practice. E, Reynard. J, Brilha (Eds.), *Geoheritage* (pp. 193-212). ISBN 9780128095317

Ramírez, F. (2012). La erupción del Xitle y el fin de Cuicuilco. *Revista de Arqueología Americana*, 61-89.

Romero-Terán, E (1998). Geología del Volcán Ajusco. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Salinas Garces J, I (2014). Geología del complejo volcánico San Miguel, Sierra de Las Cruces, suroeste de la Cuenca de México. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Sandoval G, M (2021) Reconstrucción de paleorelieve del suroeste de la cuenca de México y su impacto en la trayectoria de los derrames de lava del Xitle. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Schaaf, P., Stimac, J. I. M., Siebe, C., & Macías, J. L. (2005). Geochemical evidence for mantle origin and crustal processes in volcanic rocks from Popocatepetl and surrounding monogenetic volcanoes, central Mexico. *Journal of Petrology*, 46(6), 1243-1282. 197–226

Siebe, C. (2000). Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 104(1-4), 45-64.

Siebe, C. (2009). La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670 +/-35 años AP y sus implicaciones. En Lot A, Cano-Santana Z (Eds), Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel (pp.43-50). Universidad Nacional Autónoma de México

Siebe, C., & Macías, J. L. (2004). Volcanic hazards in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatepetl, Nevado de Toluca, and Jocotitlán stratovolcanoes and monogenetic scoria cones in the Sierra Chichinautzin Volcanic Field.

Siebe, C., Arana-Salinas, L., & Abrams, M. (2005). Geology and radiocarbon ages of Tlaloc, Tlacotenco, Cuauhtzin, Hijo del Cuauhtzin, Teuhtli, and Ocusacayo monogenetic volcanoes in the central part of the Sierra Chichinautzin, México. *Journal of volcanology and geothermal research*, 141(3-4), 225-243.

Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P., & Abrams, M. (2004). Geochemistry, Sr–Nd isotope composition, and tectonic setting of Holocene Pelado, Guespalapa and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130(3-4), 197-226.

Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P., Abrams, M. (2004b). Geochemistry, Sr-Nd isotope composition, and tectonic setting of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 130,

UNESCO. (12 de abril del 2023). Qué es un Geoparque Mundial de la UNESCO. UNESCO. <https://es.unesco.org/fieldoffice/montevideo/GeoparquesLACResiliencia>

Urroz, R. (2022). “Habitar” un ecosistema: la experiencia comunitaria en torno al bosque de Jardines en la Montaña de la Ciudad de México. *Investigaciones geográficas*, (109).

Velasco Tapia, F., Rodríguez Saavedra, P., Márquez, A., Navarro de León, I., De Ignacio, C., Marroquín Guerra, SG, ... & Rangel Alvarez, OM (2013). Evidencia mineralógica y geoquímica de mezcla/mezcla de magma en la cordillera volcánica Sierra de las Cruces, Faja Volcánica Mexicana. *Revista de geología ibérica*, 39 (1).

Vereb Viktor, van Wyk de Vries Benjamin, Guilbaud Marie-Noëlle, & Karátson Dávid. (2020). The Urban Geoheritage of Clermont-Ferrand: From Inventory to Management. *Quaestiones Geographicae*, 39(3), 5–31. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.2478/quageo-2020-0020>

Wallace, P. J., & Carmichael, I. S. (1999). Quaternary volcanism near the Valley of Mexico: implications for subduction zone magmatism and the effects of crustal thickness variations on primitive magma compositions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135(4), 291-314.

Zwoliński, Z., Najwer, A., & Giardino, M. (2018). Methods for assessing geodiversity. In *Geoheritage* (pp. 27-52). Elsevier.

VIII.-Anexo

Anexo 1. Elementos mayores analizados de la formación Lava Xitle (normalizados)

Nomenclatura	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Total
JM-36	51.09	15.93	9.62	0.14	8.72	8.25	3.60	1.033	1.61	0.43	100.46
JM-56	52.26	15.84	9.43	0.14	7.82	7.33	3.67	1.28	1.67	0.68	100.16
JM-50	51.20	16.03	9.48	0.14	8.54	8.24	3.59	1.05	1.63	0.47	100.39
JM-49	52.58	15.84	9.36	0.14	7.65	7.26	3.74	1.29	1.67	0.67	100.24
JM-53	51.37	15.99	9.58	0.14	8.69	8.14	3.51	1.01	1.58	0.42	100.47
JM-09	55.08	15.68	7.46	0.12	6.803	7.84	3.86	1.56	1.10	0.47	100.02

Anexo 2. Elementos mayores analizados de la formación kipuka Viaje a la Naturaleza (normalizados)

Nomenclatura	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Total
JM-09	55.08	15.68	7.46	0.12	6.80	7.84	3.86	1.56	1.10	0.47	100.02
JM-52	55.41	15.55	7.406	0.11	6.71	7.70	3.89	1.56	1.10	0.47	99.94
JM-57	55.07	15.67	7.35	0.12	6.68	7.98	3.76	1.56	1.04	0.48	99.74

Anexo 3. Elementos mayores analizados de la formación kipuka Zacayuca (normalizados)

Nomenclatura	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Total
JM-54	62.47	16.31	5.27	0.08	2.93	5.12	3.99	1.70	0.75	0.23	98.88

Anexo 4. Elementos traza (Tierras Raras) analizados de la formación Lava Xitle

Nomenclatura	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
JM-36	19.4	44.2	5.62	24.8	5.64	1.76	5.03	0.81	4.88	0.98	2.65	0.38	2.48	0.39
JM-49	27.3	57	7.59	33.7	7.35	2.18	6.36	1.01	6.04	1.18	3.35	0.43	2.95	0.43
JM-50	20.1	46.2	5.82	25.8	5.84	1.8	5.11	0.88	5.12	0.98	2.63	0.40	2.54	0.41
JM-53	19.3	44.7	5.67	25	5.59	1.79	5.05	0.88	4.95	0.98	2.7	0.38	2.56	0.40
JM-56	27	56.5	7.57	32.5	6.98	2.12	6	0.98	5.85	1.12	3.12	0.45	2.82	0.46

Anexo 5. Elementos traza (Tierras Raras) analizados de la formación kipuka Viaje a la Naturaleza

Nomenclatura	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
JM-09	36.9	78.3	11.3	47.5	10.2	2.69	7.35	0.98	5.08	0.91	2.33	0.30	1.98	0.32
JM-52	36.2	77	11.2	47	10.2	2.62	6.96	0.97	5.05	0.94	2.27	0.32	2.07	0.32
JM-57	38.4	83.2	12	48.9	10.5	2.72	6.91	0.98	4.8	0.88	2.29	0.32	1.94	0.32

Anexo 6. Elementos traza (Tierras Raras) analizados de la formación kipuka Zacayuca

Nomenclatura	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
JM-54	14.1	31.1	3.89	16.5	3.58	1.11	3.06	0.5	2.98	0.54	1.5	0.235	1.47	0.23