

ANIVERSARIO
DEL **PARÍCUTIN**

GUÍA DE CAMPO

**GEOPATRIMONIO
DEL VOLCÁN XITLÉ,
CIUDAD DE
MÉXICO**

Guías: Marie-Noëlle Guilbaud, María del Pilar Ortega-Larrocea, Silke Cram Heydrich
y Alejandro Pastrana Cruz.

Instituto de Geofísica
UNAM

Geopatrimonio del volcán Xitle, Ciudad de México

Guía de excursión de campo

"Geopatrimonio del volcán Xitle, Ciudad de México"

Guía de excursión de campo

Marie-Noëlle Guilbaud, María del Pilar Ortega-Larrocea, Silke Cram Heydrich
y Alejandro Pastrana Cruz

Editor académico
Peter Schaaf

Editora técnica
Andrea Rostan Robledo

Formación
Vanessa Gómez Vivas

Archivos Finales
Samantha Fernanda Pita Uraga

Primera edición: 19 de Septiembre de 2024 D.R. ©
Universidad Nacional Autónoma de México
Av. Universidad No. 3000, Col. Copilco, Alcaldía Coyoacán,
C.P. 04510, CDMX

Instituto de Geofísica
Circuito de la Investigación Científica s/n, C.U., Coyoacán,
CP. 04150, CDMX

ISBN: 978-607-30-9410-8

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México.
Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular
de los derechos patrimoniales.
Impreso y hecho en México.

Geopatrimonio del volcán Xitle, Ciudad de México

Guía de excursión de campo

Marie-Noëlle Guilbaud¹ , María del Pilar Ortega-Larrocea² , Silke Cram Heydrich³  y Alejandro Pastrana Cruz⁴ 

¹ Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico City. marie@igeofisica.unam.mx

² Departamento de Ciencias Ambientales y del Suelo, Instituto de Geología, UNAM, Mexico City.

³ Instituto de Geografía, UNAM, Mexico City.

⁴ DEA-INAH, Seminario No. 8 Col. Centro, Cuauhtemoc 06060, Mexico City.

RESUMEN

Esta guía de campo tiene el objetivo de servir como apoyo en la organización de visitas a los principales geositios relacionados al volcán Xitle, localizado en el SW de la Ciudad de México. A través de un enfoque multidisciplinario se revela el patrimonio tan diverso y rico que alberga esta zona de la Ciudad de México. La guía se basa en estudios realizados en colaboración durante varios años en estos sitios con la intención de atraer a visitantes con intereses y campos de formación distintos. Por ello incluimos información diversa (geológica, biológica, pedológica y cultural). Esta guía también puede ser de utilidad para profesores o estudiantes que busquen información general sobre el volcán Xitle. La guía fue utilizada por primera vez en la excursión precongreso llevada a cabo del 16 al 18 de febrero del 2023, previa a la conferencia internacional conmemorativa del 80 aniversario de la erupción del volcán Parícutín, donde fue evaluada favorablemente por los participantes. Parte de la información versada aquí ha sido actualizada a partir de un texto anterior publicado en la revista *Geoheritage* (Guilbaud *et al.*, 2021).

INTRODUCCIÓN

El volcán Xitle, al S de la Ciudad de México, es un pequeño cono de escoria (140 m de altura, 500 m de ancho) con un extenso campo de lava (ca. 80 km²) que fueron producidos por una única erupción basáltica fechada en 1670±35 años antes del presente o AD 245-315 (Delgado *et al.*, 1998; Siebe, 2000). El volcán hizo erupción a 3000 msnm, en el flanco N del campo volcánico de la Sierra Chichinautzin, localizado en la parte centro-oriental del Cinturón Volcánico

Transmexicano relacionado con una zona de subducción (Figura 1). El Campo Volcánico de la Sierra Chichinautzin bordea el S de la Cuenca de México (Figura 1) y consiste en más de 200 pequeños edificios volcánicos, la mayoría de ellos conos de escoria y lavas (e.g., Bloomfield, 1975; Martín del Pozzo, 1982; Márquez *et al.*, 1999; Siebe, 2000; Arce *et al.*, 2013).

La cronología de la erupción sólo se conoce parcialmente (Delgado *et al.*, 1998; Siebe, 2000). Tras una primera fase explosiva que produjo tefra (fragmentos de roca), el volcán

emitió lavas que descendieron hacia el SW de la cuenca de México, sepultando la mayor parte de un asentamiento prehispánico (Cuicuilco) y alcanzando las orillas de los antiguos lagos de Xochimilco y Texcoco, a unos 2250 m de altitud, a 12 km de la fuente.

El campo de lava es complejo y se compone de múltiples unidades, lo que indica una actividad efusiva intermitente marcada por fases explosivas menores. El gran volumen de lava emitido (>1 km³) sugiere que la erupción duró una década o más (Guilbaud & Siebe, 2009). Las lavas son en su mayoría de tipo pahoehoe y forman terrenos rocosos de topografía irregular. La vegetación del campo de lava del Xitle ha sido cartografiada por Carrillo-Trueba (1995), revelando un patrón vegetal diverso que varía principalmente con la altitud: las áreas de mayor altitud (>2500 m snm) cerca del cono están dominadas por bosques de pino, encino y abeto; las áreas de menor altitud (<2500 m snm), en el campo de lava distal, están cubiertas por un matorral xérico dominado por *Pittocaulon praecox* que es nativo del centro de México (Rzedowski, 1954).

Las lavas permanecieron en su mayoría despobladas hasta que en 1948-1952 se construyó el campus central de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en el extremo más distal del campo de lava (Figura 1; Carrillo-Trueba, 1995; Salas Portugal, 2006). En la actualidad, la ciudad ha crecido sobre casi todo el campo de lava, a excepción de algunos parches, que se encuentran fragmentados y sujetos a desaparecer por presiones inmobiliarias (Cano-Santana *et al.*, 2006). El más grande y mejor conservado de estos parches es la "Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel" o REPSA, una reserva urbana con una zona núcleo de 171 ha y una zona de amortiguamiento de 66 ha que fue creada en 1983 dentro de la UNAM, después de un movimiento ambientalista encabezado por estudiantes y académicos (<http://www.repsa.unam.mx>; Zambrano *et al.*, 2016). Aunque la parte central del campus de la UNAM fue incluida en la lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO en 2007 (UNESCO, 2007), el patrimonio natural del campus aún no ha recibido el reconocimiento que merece. Alrededor de 660 000 personas viven actualmente sobre el campo de lava (Hernández Robles, 2019), la mayoría de ellas sin saber que viven sobre un lecho joven de origen volcánico.

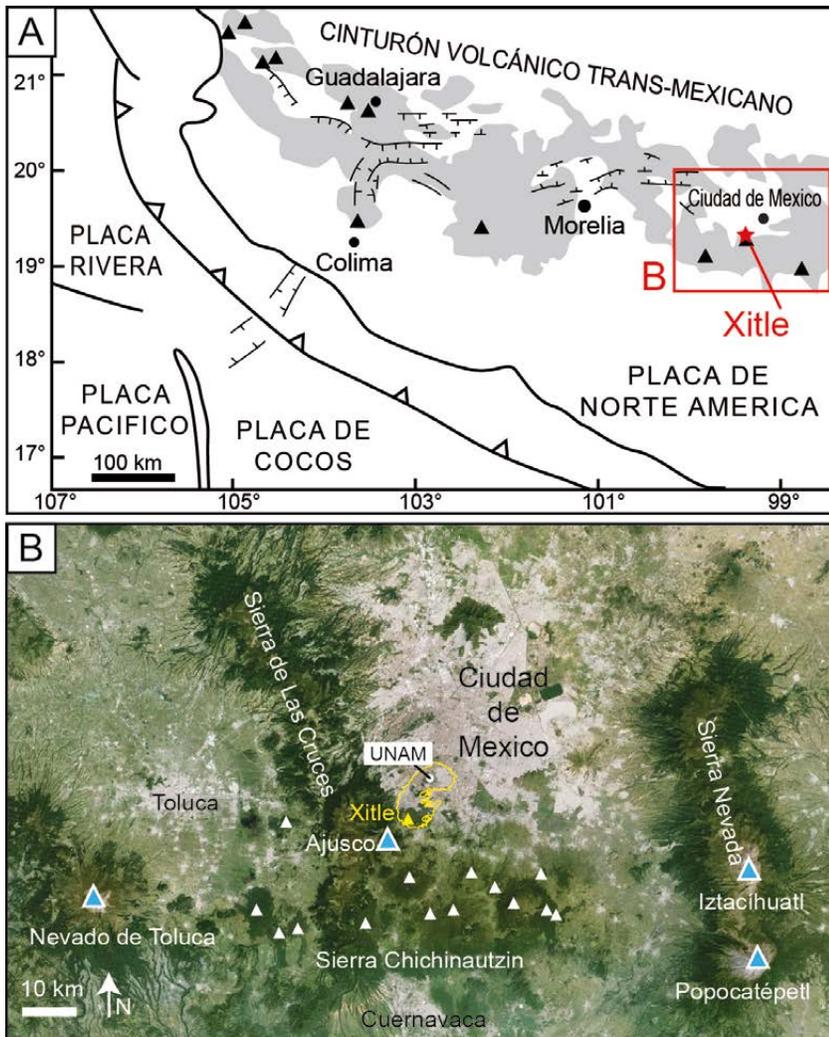


Figura 1. A. Localización del volcán Xitle y la Ciudad de México en el Cinturón Volcánico Transmexicano y el sistema tectónico asociado, que es de tipo arco continental. Los triángulos negros indican los principales estratovolcanes del cinturón. Los puntos negros indican las principales ciudades con millones de habitantes. Obsérvese que la mayoría de ellas están situadas en el cinturón volcánico y, por tanto, expuestas a riesgos por erupciones nuevas y en curso. B. Localización del volcán Xitle (pequeño triángulo amarillo) y del campo de lava del Xitle (polígono en amarillo) que incluye el campus de la UNAM, en el extremo SW de la Cuenca de México, donde se localiza la Ciudad de México. Los triángulos blancos son volcanes de la Sierra Chichinautzin formados durante los últimos 17,000 años (compilación de: Bloomfield, 1975; Siebe *et al.*, 2004; Siebe *et al.*, 2005; Agustín-Flores *et al.*, 2011; Guilbaud *et al.*, 2015; Lorenzo-Merino *et al.*, 2018). Los triángulos azules y blancos son estratovolcanes. El Popocatepetl está en erupción desde 1994, mientras que la última gran erupción del Nevado de Toluca ocurrió hace 10,500 años (Arce *et al.*, 2003). El Ajusco está extinto (modificado de Guilbaud *et al.*, 2021).

DESCRIPCIÓN DE GEOSITIOS

En esta excursión se visitan cuatro geositios excepcionales ligados al volcán Xitle que poseen altos valores científicos y culturales y son relevantes para abordar temas como la preservación de los ecosistemas, la sustentabilidad, las desigualdades sociales y los riesgos por fenómenos naturales (Guilbaud *et al.*, 2021). Los geositios se localizan en la Figura 2 junto con las principales carreteras que permiten acceder a ellos. También se indican otros lugares de interés que pueden ser visitados (ver localización y descripciones en Palacio & Guilbaud 2015).

Día 1: Geositio Cono del Xitle

El objetivo del primer día es visitar el cono del Xitle, donde se emitieron los productos volcánicos (lava y tefra). Se trata de una zona arbolada y agradable de fácil acceso desde la ciudad. La posición del cono principal en una meseta elevada directamente al S de la ciudad ofrece vistas panorámicas de la cuenca de México y de los volcanes circundantes que son espectaculares y también instructivas. Los senderos son fáciles y no requieren equipo específico. No obstante, hay que tener en cuenta la altitud relativamente elevada (unos 3000 m sobre el nivel del mar, frente a los 2268 m del campus de la UNAM) y la presencia ocasional de una brisa fría.

Este sitio exhibe productos proximales típicos de una actividad basáltica de baja explosividad, de tipo hawaiano y estromboliano, que están particularmente bien conservados y expuestos y son característicos del volcanismo de tipo monogenético. El área de la fuente consiste en un cono de escoria (el Xitle) y un cono de salpicadura y lava (el Xicotlile) que están alineados en una dirección aproximadamente WSW-ENE, lo que sugiere una fisura (Figs. 3A, 3B). La vegetación sigue un patrón que coincide con la distribución de las geoformas volcánicas (cono, cráter, lava). Cada una de ellas presenta distintos tipos de suelo y microambientes debido a las variaciones en altitud y exposición solar (Figura 3C). Las especies arbóreas dominantes son nativas del centro de México.

Itinerario y descripción de paradas:

La excursión comienza a lo largo del camino denominado "camino al cráter" ubicado en la colonia Héroes de 1910 (Tlalpan), aproximadamente a 1 h en automóvil del campus de

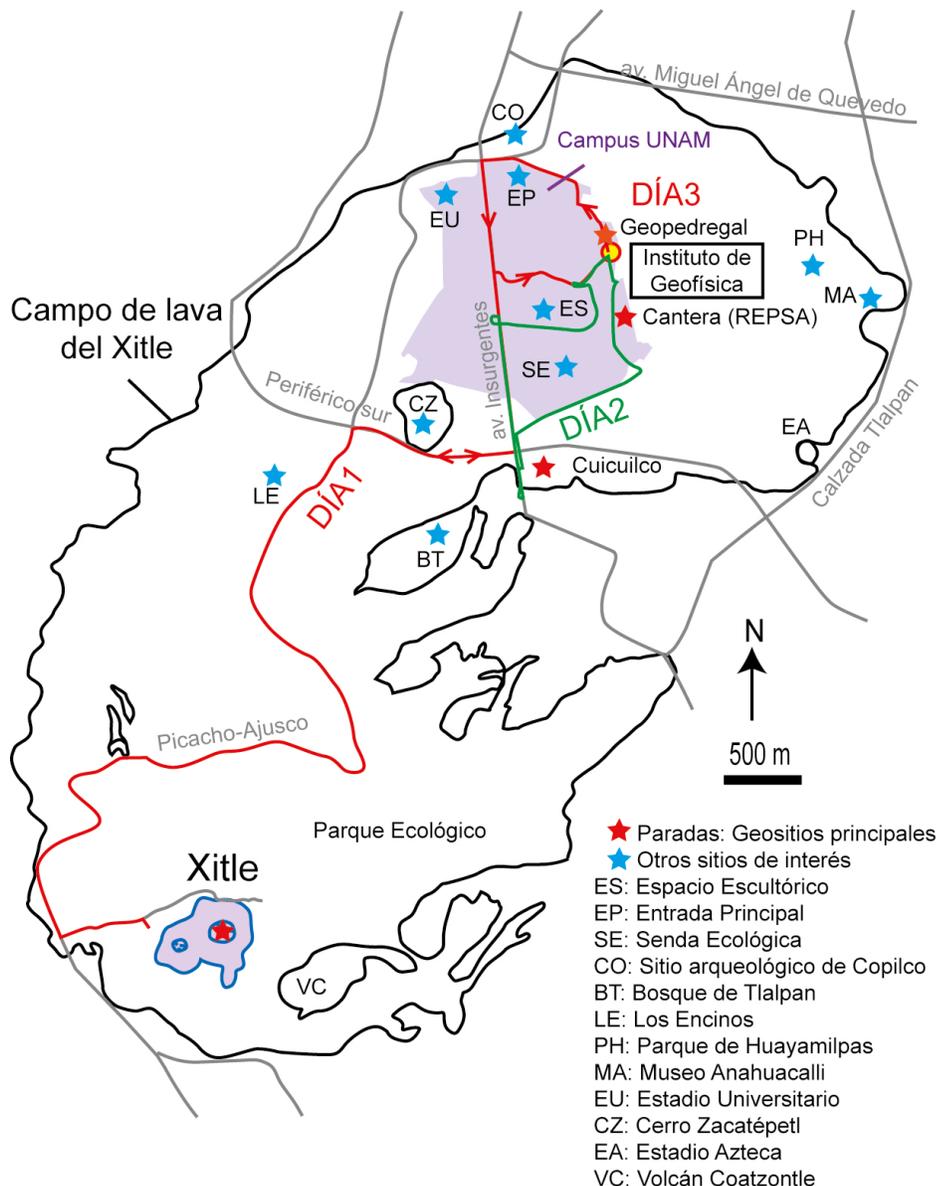


Figura 2. Mapa del campo de lava del Xitle con la ubicación de las paradas de la excursión y el itinerario de cada día, los puntos de referencia en la ciudad y las principales carreteras. El círculo relleno en amarillo indica la ubicación del Instituto de Geofísica que está cerca de la estación del metro "Universidad" (línea verde).

la UNAM (Figura 2). La excursión completa (ruta mostrada en la Figura 3) dura entre 3 y 4 horas, e incluye los tiempos en las paradas para describir, conversar y tomar un refrigerio.

Parada 1. Cráter Xicotlile (GPS: N19°14.745', W99°13.670', 3042 m snm).

Tras una caminata de 15 minutos por una pendiente pronunciada, se llega al borde del cráter Xicotlile donde se tiene una vista al interior y se observa la superposición de capas de salpicadura y lavas delgadas (<1 m) (Figura 4), producto del brote de lava que típicamente ocurre durante una actividad de baja explosividad a lo largo

de fisuras. Desde aquí también se puede observar la ladera N del estratovolcán Ajusco (Figura 4).

El volcán Ajusco se considera extinto y fue afectado por colapso sectorial y el emplazamiento de un depósito de avalancha de escombros con su característica morfología de montículos. Este depósito fue posteriormente cubierto en su mayor parte por las lavas del Xitle pero algunos montículos aún afloran localmente, como por ejemplo el Cerro Zacatépetl (Cervantes & Molinero, 1995). El cono del Xitle también puede observarse desde este sitio mirando hacia el ENE. Cerca de él, se encuentra una estación de bomberos que monitorea

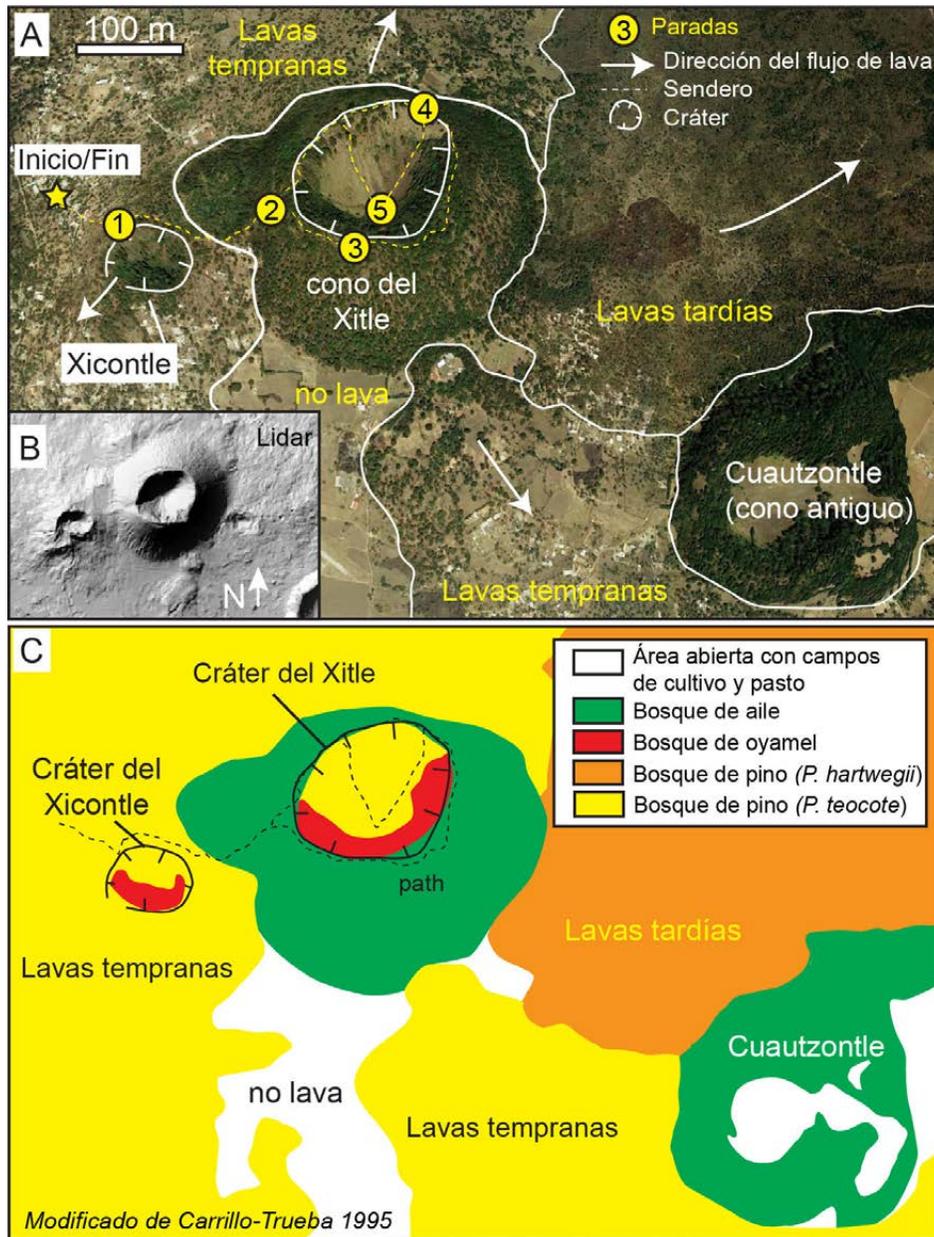


Figura 3. Localización del geosito de la zona del cono del Xitle con las paradas descritas en el texto. A. Cartografía de los principales elementos volcánicos en una vista ligeramente inclinada de imagen de satélite dispuesta sobre un modelo de elevación de Google Earth. B. Relieve sombreado a partir de un modelo de elevación digital de 5 m de resolución que muestra claramente la forma y el cráter interior del cono de escoria principal y del cono de salpicadura de lava del Xicotle. C. Mapa de cobertura vegetal modificado a partir de Carrillo-Trueba (1995) y elaborado a partir de imágenes de satélite y observaciones de campo. Véase el texto para más explicaciones.

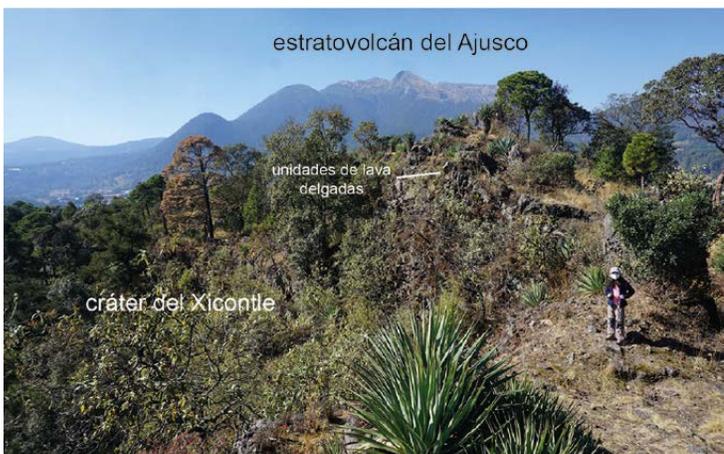


Figura 4. Parada 1. Vista del cráter del Xicotle y del estratovolcán Ajusco en el fondo. Se observan las capas de lava delgadas que afloran a lo largo del cráter (arriba a la derecha), y la vegetación peculiar.

los incendios forestales que comúnmente ocurren en esta zona boscosa en la época más seca del año (abril-mayo).

Parada 2. Formación de suelo y vegetación sobre el cono (GPS:

N19°14.751', W99°13.428', 3077 m snm).

Se sigue el sendero que baja por la ladera N del Xicotle y sube por la ladera W del cono del Xitle (Figura 3A), y pasa por una zona de asentamientos poblacionales irregulares.

El camino que asciende por el cono del Xitle presenta exposiciones verticales de tefra cubierta por un suelo (Figura 5A). La tefra es mayoritariamente de tamaño lapilli (fragmentos de centímetro) y los clastos más vesiculares muestran algún signo de alteración por oxidación (color naranja). El suelo formado es el resultado de la interacción de la roca, el aire, el agua y la biota. Este suelo se considera muy joven porque sólo se ha formado durante un período de unos 1670 años, que es la edad del material parental (tefra) a partir del cual se está desarrollando. Por tanto, es poco profundo y sólo presenta un horizonte mineral superficial de menos de 17 cm de espesor (Ah1 y Ah2) en el que se observa una incipiente acumulación de materia orgánica (h), que es el proceso pedogenético más claro que se puede identificar por el color oscuro del horizonte (Figura 5A). Este horizonte A se encuentra por encima de un horizonte Cw de tefra meteorizada, diferente del material encontrado por debajo (Figura 5A). Al ser un suelo tan joven, no ha transcurrido suficiente tiempo para el desarrollo de procesos pedogenéticos avanzados, aparte de la acumulación de materia orgánica y, por lo tanto, se clasifica como un Regosol háplico, tefrítico, esquelético (húmico), lo que significa que es un suelo poco desarrollado sin características especiales, aparte de la acumulación de materia orgánica, con una gran cantidad de rocas. Debido a que el material sobre el que se desarrolla el suelo es muy poroso, permite el crecimiento de las raíces hasta profundidades aproximadas a los 70cm, dando un buen soporte a las plantas como se ve en el tamaño y la altura de los árboles. Esta porosidad también permite la infiltración del agua de lluvia y su posterior percolación a capas más profundas. Puede decirse que este suelo cumple tres importantes funciones ecológicas: soporte de vegetación diversa, hábitat de organismos y regulador del ciclo hidrológico. Los suelos

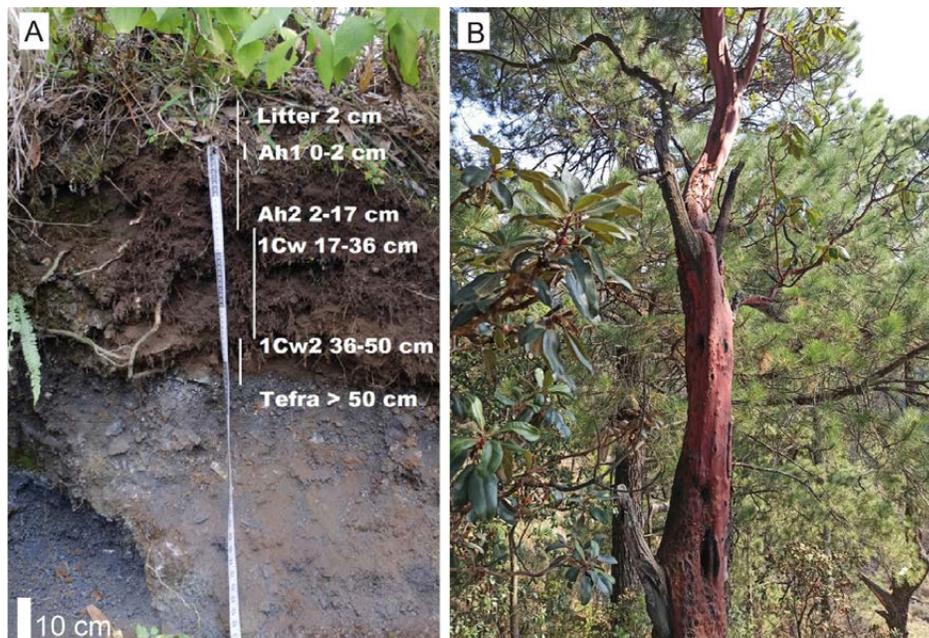


Figura 5. A. Parada 2. Fotografía del suelo y la tefra en la parte superior del cono del Xitle, es una sección expuesta a lo largo del sendero (ver descripción detallada en el texto). B. Un ejemplar de madroño (*Arbutus xalapensis*) que es una especie arbórea abundante en esta zona (foto tomada por Perla Krauze).

formados en ambientes volcánicos se llaman andosoles y tienen características especiales que les confieren mayor fertilidad.

Las laderas exteriores del cono principal que fueron cartografiadas como bosque de aile por Carrillo-Trueba (1995), presentan una amplia diversidad arbórea que incluye, además del aile (*Alnus firmifolia*), a los abedules (*Betula pubescens*), pinos (*Pinus teocote*), madroños (*Arbutus xalapensis*) muy abundantes, robles (*Quercus* spp.) y falso agave (*Furcraea parmentieri*) (Figura 5B).

Parada 3. Borde del cráter del Xitle, lado sur: vista panorámica (GPS:

N19°14.708', W99°13.333', 3136 m snm).

Después de una caminata de 20-30 min, se llega al borde del cráter Xitle en su punto más alto (ca. 3140 msnm), cerca de una torre que es utilizada por los bomberos para detectar y monitorear visualmente los incendios forestales. El cráter es profundo (65-110 m, dependiendo del lado) y empinado (30°) (Figura 6A) lo que probablemente explica el nombre de Xitle que significa “ombligo” en la lengua indígena náhuatl. Esta morfología refleja la joven edad del cono, cuyos aspectos originales no han sido significativamente afectados por la meteorización. Desde este punto se puede observar la parte S de la cuenca de México y en días despejados la vista alcanza hasta la Sierra de Guadalupe, que marca los límites admi-

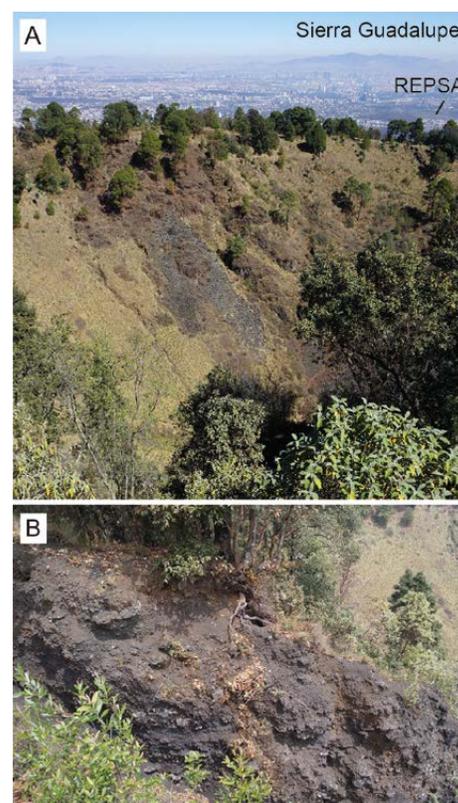


Figura 6. Parada 3. A. Vista desde la parte S del borde del cráter del Xitle mirando hacia el N, mostrando el profundo cráter y la parte S de la Ciudad de México envuelta por smog. La montaña al fondo es la Sierra Guadalupe. B. Exposición de aproximadamente 2 m de espesor que muestra capas de tefra con partículas de tamaño lapilli hasta bombas y que es visible desde un pequeño escarpe a lo largo del borde del cráter.

nistrativos más septentrionales de la ciudad (Figura 6A). También se puede distinguir la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) como un manchón verde en una zona totalmente urbanizada. En este lugar, un pequeño escarpe expone las capas de tefra gruesa, suelta y bien estratificada con bombas que conforman la parte superior del cono (Figura 6B). Sin embargo, por debajo aflora una lava que forma una pared vertical, lo que hace peligroso descender por la ladera del cráter en ese lugar.

Parada 4. Borde del cráter del Xitle, lado N: erosión y vegetación (GPS: N19°14.866', W99°13.233', 3091 m snm).

Tras seguir el borde oriental del cono del Xitle, se llega al punto septentrional del borde, que es el más bajo (ca. 3090 m snm). Desde este punto, mirando hacia el interior del cráter, se puede observar que las laderas están afectadas por cárcavas y pequeños deslizamientos de escoria suelta del tamaño de una bomba, indicativos de la erosión por transporte coluvial que controla la evolución morfológica del cráter (Figura 7).

También se observa el contraste entre las laderas interiores del cráter. La ladera orientada al N, está cubierta por un bosque de abetos (*Abies religiosa*, localmente llamado abeto u oyamel), mientras que la ladera orientada al S está dominada por hierbas y pequeños arbustos (*Muhlenbergia macroura*, *Arctostaphylos pungens* y *Festuca toluensis*) y algunos pinos (*Pinus montezumae*) (Figura 7). La vegetación nativa asociada y conspicua en el área incluye cardo (*Cirsium ehrenbergii*), tepozán (*Buddleja cordata*), chamizo blanco (*Ageratina glabrata*) y maguey (*Agave salmiana*). Todas estas plantas son importantes huéspedes de polinizadores como murciélagos, mariposas nocturnas, colibríes, abejas, avispas y escarabajos. Además, las distintas especies de plantas viven en simbiosis con diferentes tipos de hongos micorrícicos que son extremadamente importantes para los ciclos biogeoquímicos y para mantener suelos sanos, cumpliendo muchas funciones ecológicas como el secuestro de carbono, la translocación de nutrientes, la estabilización del suelo y la facilitación de la infiltración.

En la posición GPS: N19°14.882', W99°13.258', 3096 m snm se sigue el curso de una cárcava de 1 a 2 m de profundidad para descender hacia la parte interior del cráter. La cárcava expone secuencias de ceniza y capas ricas en lapilli y bombas.



Figura 7. Parada 4. Fotografía tomada desde la parte N del borde del cráter, mirando hacia el sur, que muestra las laderas del cráter orientadas al N y al S y sus contrastes en vegetación y patrón erosivo.

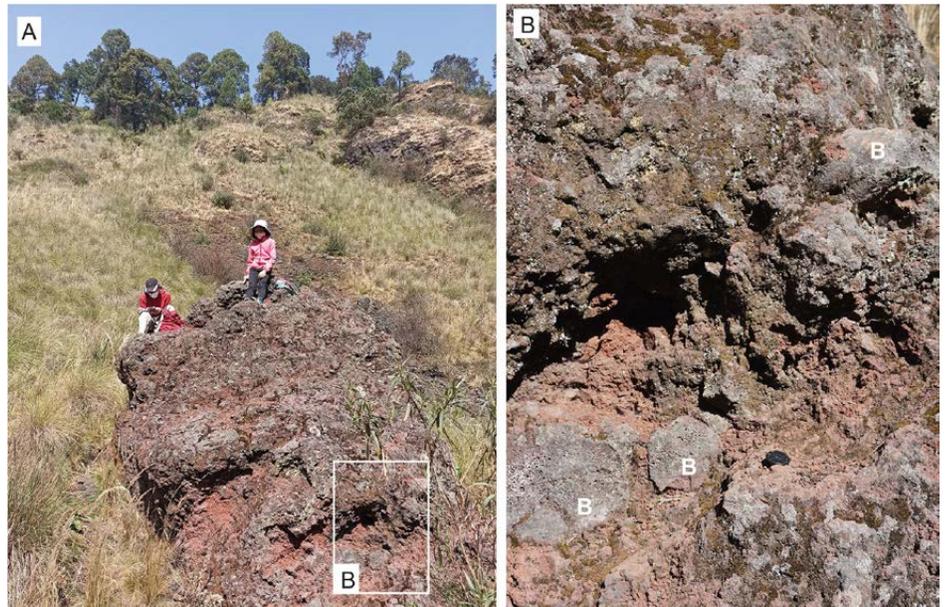


Figura 8. Parada 5. Aglutinados en el fondo del cráter del cono del Xitle. A. Vista general de un montículo de aglutinados formando un gran bloque. El rectángulo muestra la localización de la Figura 8B. B. Vista cercana del montículo de aglutinados mostrando la abundancia de bombas vesiculares subredondeadas (B en la imagen).

Hacia la mitad de la pendiente ladera abajo, el terreno se torna notablemente más áspero con abundancia de bombas sueltas, de varios centímetros de tamaño, con colores negros a rojizos, algunas con un recubrimiento entre blanco y amarillento. Esta acumulación de bloques sueltos y bombas es probablemente el producto de un pequeño

deslizamiento que removilizó el coluvión parcialmente consolidado que recubre el interior del cráter.

Los visitantes que no deseen descender al cráter (obsérvese lo escarpado e inestable del terreno y la pesada subida de regreso) pueden continuar por el sendero a lo largo del borde superior del cráter.



Figura 9. A. Imagen del camino que sigue la cárcava en el lado occidental del cráter del Xitle. B. Exposición a lo largo de la cárcava de capas bien clasificadas de fragmentos de tamaño lapilli. Nótese los fragmentos de mayor tamaño en la superficie.

Parada 5. Fondo del cráter, aglutinados y bombas (GPS: N19°14.797', W99°13.318', 3026 m snm).

En menos de treinta minutos después de la parada anterior, se llega al fondo del cráter. En este lugar, es interesante observar la amplia gama de colores (negro, rojo a amarillo y blanco) que presentan las bombas que cubren la superficie del terreno y parte de las paredes interiores del cráter. Esta coloración suele atribuirse a procesos de oxidación y circulación de gases en las rocas al acumularse, aún calientes sobre la superficie. Sin embargo, hemos encontrado pruebas del desarrollo de organismos diminutos en estos bloques que contribuyen a su coloración y son una prueba del rápido desarrollo de la vida en entornos volcánicos.

En el fondo del cráter y en sus laderas interiores, también hay montículos rojos de aglutinados de 3 a 4 m de altura que contienen grandes bombas fuertemente cohesionadas (Figura 8). Éstas se formaron durante una actividad de tipo “fuente de lava” en el interior del cráter. Debido a la baja explosividad, el magma fue emitido como grandes grumos que se acumularon aún calientes en las laderas del cráter, formando amontonamientos de aglutinados rojos. Es necesario hacer notar la costra saxícola que ha crecido sobre estos bloques desde la erupción. Se trata de consorcios colonizadores pioneros de bacterias, líquenes y musgos, que pueden observarse en las paredes casi verticales utilizando lupas de mano.

Desde la parada 5 hasta el final: Se sigue una cárcava muy empinada para salir del cráter del cono hacia el W (Figura 9A). A lo largo del camino, se pueden ver secciones o cortes laterales con capas de cenizas del tamaño de lapilli ligeramente redondeadas (Figura 9B), que son el resultado de pequeñas avalanchas de depósitos sueltos, que ocurrieron probablemente tras la erupción. Las capas resultantes se pueden ver claramente y puede atribuirse a un proceso de clasificación de los granos por tamaño ocurrido durante la avalancha. Estos depósitos están cubiertos por una delgada capa de suelo de grano fino y de color claro, resultado de la escasa acumulación de materia orgánica, de un alto grado de exposición al sol, de la baja humedad y de una vegetación poco desarrollada formada por hierbas y escasos árboles.

Tras alcanzar el sendero que rodea el borde del cono, se prosigue por el mismo hacia el S y luego se toma un sendero a la derecha, en una cárcava que deja al descubierto un suelo de gran espesor (GPS: N19°14.772', O99°13.420', 3112



Figura 10. Localización de los principales elementos antrópicos, arqueológicos y volcánicos en una vista ligeramente inclinada de imagen de satélite superpuesta a un modelo de elevación de Google Earth. Las líneas rojas indican los cortes en las lavas realizados durante las primeras excavaciones arqueológicas (en el parque) y la construcción de la antigua fábrica de papel Loreto y Peña Pobre (ahora centro comercial).

m s.n.m.). Posteriormente, se sigue el camino por la cara W del cono y luego por una cárcava a la izquierda para retornar el mismo camino seguido anteriormente (ver mapa en Figura 3). Se arriba al estacionamiento después de unos 20 min.

Día 2 – En la mañana: sitio arqueológico de Cuicuilco.

Este sitio alberga un parque arqueológico y ecológico que se ubica en el cruce de dos avenidas principales (Periférico e Insurgen-

tes) del SW de la Ciudad de México y varios grandes centros comerciales, por lo que representa una isla verde natural en una densa zona urbana con mucho tráfico y un flujo constante de bienes y personas (Figura 10). El parque destaca por su pirámide redonda que fue rodeada y parcialmente cubierta por las lavas del Xitle, lo que ilustra de manera muy clara el gran impacto de una erupción de menor magnitud sobre un asentamiento humano a principios de nuestra era (González *et al.*, 2000; Lugo Hubp *et al.*, 2001;

Pastrana, 2018). A pesar de su importancia, Cuicuilco permanece como un sitio poco estudiado y también escasamente visitado.

Itinerario y descripción de paradas:

La excursión comienza en la entrada del parque, a unos 15 minutos en automóvil del campus de la UNAM (Figura 2). La excursión completa (paradas indicadas en la Figura 10) dura aproximadamente 2 horas, incluyendo el tiempo de las paradas para las explicaciones e intercambios de opinión.



Figura 11. A. En primer plano, un corte de unos 2 m de profundidad a través de un lóbulo plano muestra las características típicas del interior de lavas tipo pahoehoe (costra superior vesicular y núcleo denso). Nótese la vegetación nativa típica (palo loco, nopal) y algunos árboles exóticos (e.g., pirul). B. Vista de los volcanes Xitle y Ajusco hacia el SW. Nótese que todas las fotos fueron tomadas en temporada de lluvias y por lo tanto la vegetación presenta follaje verde. En la estación seca (noviembre-mayo), la vegetación está disminuida y presenta en su mayor parte follaje seco y marrón, por lo cual la lava está mejor expuesta.



Figura 12. A. Vista de la pirámide redonda. Obsérvese el contraste con el alto edificio de la izquierda, construido recientemente a lo largo de Periférico Sur, la concurrida carretera de circunvalación de Ciudad de México que bordea el emplazamiento. B. Vista desde la plataforma superior de la pirámide hacia el SW, donde pueden verse al fondo los límites de la Cuenca de México (Sierra de Las Cruces), así como partes emblemáticas de la ciudad como la Ciudad Olímpica construida para las olimpiadas de 1968 (edificios color naranja).

Parada 1: Campo de colada de lava (GPS: N19°18.089', W99°11.030', 2294 m asl).

El sendero principal de entrada al sitio conduce a la pirámide y cruza una parte del campo de lava con montículos y con formas típicas de lavas pahoehoe, así como con flora y fauna asociadas a esta parte distal de la colada de lava. Después de algunas decenas de metros se observa un corte transversal a través de un lóbulo plano ("sheet lobe" o "lava rise"), donde se pueden apreciar las vesículas que ocurren al interior de las lavas (Figura 11A). Desde este lugar, mirando hacia el SW, se pueden observar en la lejanía el cono del Xitle y más atrás, el estratovolcán Ajusco (Figura 11B).

Parada 2. Pirámide principal de Cuicuilco (GPS: N19°18.096', W99°10.899', 2301 m snm).

El sendero conduce a la pirámide, cuyo contacto con la lava circundante quedó expuesto a lo largo de sus lados E y S mediante excavaciones. Las primeras excavaciones se llevaron a cabo entre 1922 y 1925. Anteriormente, la parte superior de la pirámide afloraba entre la superficie de la lava (Cummings, 1926; Pastrana, 2018).

La pirámide forma un templo con una base cónica truncada, de unos 110 m de diámetro y 26 m de altura (Kelly, 1982; Figura 12A).

Es una de las pocas pirámides redondas en México y, con la excepción de pequeños montículos cercanos, el único edificio que queda de Cuicuilco (Cummings, 1926). Después de observar la pirámide desde su base, se asciende a su cima para apreciar mejor los alrededores desde ahí y poder discutir el contexto volcánico, tectónico y topográfico. La plataforma superior de la pirámide ofrece vistas despejadas sobre el extremo SW de la cuenca de México y las laderas septentrionales de la Sierra Chichinautzin (Figura 12B). En días despejados, el cono Teuthli y el estratovolcán Popocatepetl pueden verse al SE. Cabe señalar que se han encontrado otras pirámides más pequeñas en las cercanías, en Peña Pobre y Tenantongo, situadas a 500 m y 1 km al SW, respectivamente.

Los primeros estudios postularon que este yacimiento era el de una gran ciudad habitada por 20000 personas. Según esta interpretación, la erupción del Xitle habría desencadenado la migración repentina de esta gran población hacia el N de la cuenca de México, donde habrían fundado la ciudad de Teotihuacan (110 AC-650 DC), que fue una de las más grandes de su época en todo el mundo (Heizer & Bennyhoff 1958; Sanders *et al.*, 1979; Parsons, 1989). Esta atractiva narrativa permanece en las representaciones pictóricas de Cuicuilco expuestas por ejemplo

en el museo de sitio (Parada 5). Sin embargo, trabajos recientes la describen como una zona principalmente agrícola con un sistema bien desarrollado de "chinampas" o canales y pocas construcciones (Pastrana, 2018). Todavía existe un debate considerable sobre si la erupción causó directamente el abandono de Cuicuilco y la migración de su población a Teotihuacan o si ambos eventos no están relacionados.

Parada 3. Estratigrafía (GPS: N19°18.088', W99°10.862', 2287 m snm).

A continuación, se desciende por el lado oriental de la pirámide para visitar un túnel excavado bajo las lavas donde se puede observar la base de la lava con la ceniza y el paleosuelo subyacentes (Figura 13).

Un túnel excavado bajo la lava expone de arriba a abajo: la base ondulada de la lava que es prueba de su emplazamiento como lóbulos pahoehoe inflados, una fina capa de ceniza oscura producida por la actividad explosiva temprana en el cono, y un suelo enterrado (paleosuelo) que está localmente compactado y transformado en ladrillo rojo debido al calor de la lava (Figura 13). Este paleosuelo conserva información importante sobre el paleoclima y la ocupación humana en la época de la erupción (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2016). La ceniza debajo de la lava está estratificada, lo que indica una intensa actividad pulsante con fuertes explosiones que se sucedieron rápidamente. La capa basal de la ceniza contiene trozos de carbón vegetal que probablemente se produjeron por la quema de vegetación a lo largo del frente de flujo de lava que avanzaba (Siebe, 2000). Se ve en los túneles y cortes que la base de la lava moldea los escalones de una rampa que conducía a la cima de la pirámide. La mayor parte de esta rampa fue extraída por equivocación durante las primeras investigaciones arqueológicas, pero parte de ella aún puede observarse en la salida del túnel hacia el E (Pastrana, 2018).

Parada 4. La misteriosa estela (GPS: N19°18.066', W99°10.890', 2287 m snm).

Seguiremos la excavación entre la lava y la pirámide para llegar a un lugar donde se encontró una piedra tallada de 4 m de altura, enterrada en sedimentos. Esta impresionante piedra, cuyo origen sigue siendo desconocido, fue enterrada al parecer durante la ampliación de la pirámide en la época prehispánica. Consiste de una roca vesicular y cristalina que se considera de composición andesítica.

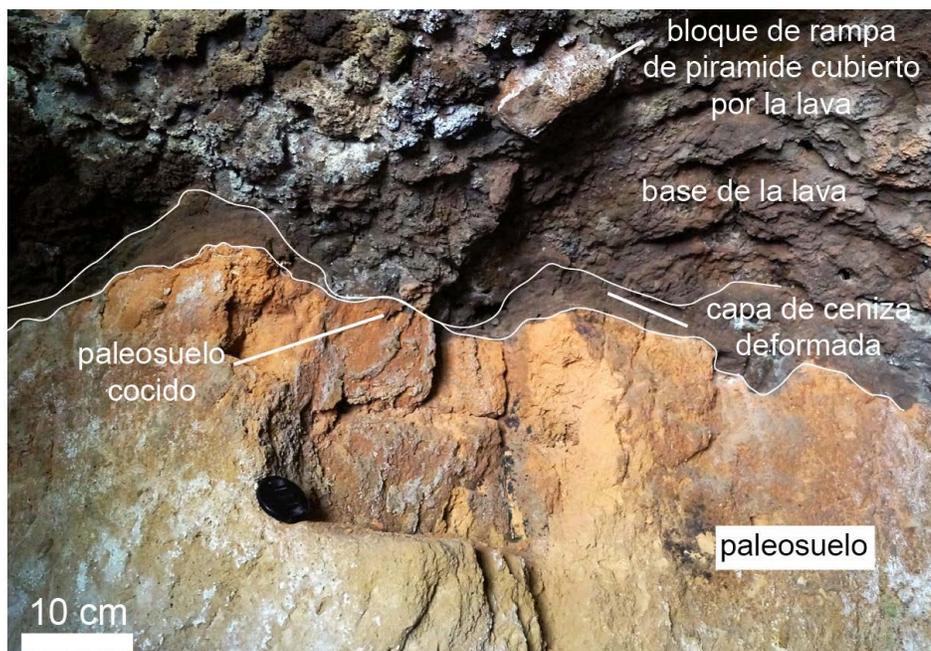


Figura 13. Parada 3. Fotografía tomada en el interior del túnel excavado bajo las lavas que muestra el paleosuelo, capa de ceniza depositada por una fase explosiva temprana en el volcán Xitle y la base de la lava. Algunos bloques rectangulares subredondeados adheridos a la base de la lava corresponden a partes de la rampa de la pirámide que quedaron sepultadas por la lava. El material suelto de la rampa, situada debajo, se extrajo durante la excavación porque se creía, erróneamente, que estaba formado por escombros producidos por la degradación de la pirámide.

Parada 5. Museo (GPS: N19°18.047', W99°10.900', 2291 m snm).

A continuación, se puede visitar el pequeño museo de sitio creado en 1948 que presenta información básica sobre el entorno del sitio y los hallazgos arqueológicos. También hay una pintura que representa, de forma artística, la destrucción de la pirámide durante la erupción del Xitle.

Parada 6. Lavas almohadillas (GPS: N19°17.937', W99°10.931', 2289 m snm).

Finalmente, se observará un afloramiento ubicado a lo largo de un estacionamiento en el cercano centro comercial de Plaza Cuicuilco, que originalmente fue una fábrica de papel (Fábrica de Peña Pobre; Figura 14). La abundancia de eucaliptos en toda la zona es consecuencia del desarrollo de esta industria. En este lugar, las excavaciones arqueológicas revelaron formas de lava redondeadas, en forma de almohada, incrustadas en sedimentos ricos en arcilla (barro) y cubriendo capas de clastos redondeados (Figura 15). Las lavas almohadilladas son la forma típica de lava emplazada en el agua, donde la corteza de lava exterior se solidifica muy rápidamente, dándole su peculiar forma globular. El hallazgo de estos tipos de lava aquí confirma otras inferencias de que Cuicuilco estaba situado en una llanura deltaica, en la convergencia de corrientes fluviales que bajaban por las laderas del Ajusco (por ejemplo, Córdova *et al.*, 1994; Lugo Hubp *et al.*, 2001). Una interpretación más reciente es que las lavas fueron emplazadas en un gran canal ("canal maestro") que alimentaba de agua a grandes extensiones de los campos agrícolas de Cuicuilco (Pastrana, 2018). Un mapa de la zona de 1929 reporta un río (Río de Tlalpan) que bordea el frente de lava en esta zona.

Cerca del afloramiento de lavas almohadillas, una sección a través de una unidad de lava más gruesa revela una estructura que es común en estas lavas y que se denominó tubo de explosión (Waitz & Wittich, 1910) porque se creía que estaban asociados a la interacción explosiva lava-agua. Sin embargo, no hay material piroclástico o sedimento y



Figura 14. Fotografía aérea de la pirámide principal de Cuicuilco y la fábrica de papel Peña Pobre, que se estableció en 1845 y cerró en 1986 (después de 141 años) por contaminante, para convertirse posteriormente en Plaza Cuicuilco, un centro comercial. Se muestra la ubicación aproximada del frente de lava (la dirección general del flujo es de izquierda a derecha en la imagen). Se marca la ubicación del sitio visitado (lavas almohadilladas), así como otros puntos de referencia. Las dos altas chimeneas de la fábrica se conservaron y aún son visibles en la plaza. Parte de la maquinaria también se conservó y puede verse en el interior del centro comercial, aunque sin ninguna indicación sobre su origen o función original. Nótese la existencia de otra pirámide más pequeña en la curva de la Avenida Insurgentes que lleva el nombre oficial de "Montículo de Peña Pobre". Foto aérea tomada en 1944, cortesía de Alberto Lenz.



Figura 15. Parada 6. Lavas redondeadas de tipo almohadilla expuestas a lo largo del nivel del terreno de un estacionamiento en el centro comercial. A. y B. Fotografías tomadas a finales de 2018 cuando los arqueólogos obtuvieron permiso para estudiar esta zona en detalle debido a la inminencia de grandes obras de construcción. Este afloramiento está en su mayor parte cubierto de vegetación en estos momentos. C. Fotografía del mismo lugar tomada en 1997. Este afloramiento fue interpretado como flujos de lava igualmente espaciados que fueron emplazados en canales paralelos y transversales a un canal agrícola central, correspondiente al sistema mesoamericano de las "Chinampas". INAH 1997. D. Exposición de una estructura en la lava que inicialmente se pensó que había sido producida por la interacción lava-agua, pero que fue reinterpretada como una sutura entre dos lóbulos planos adyacentes.

estas estructuras fueron renombradas “bordes de lava” y reinterpretadas como suturas entre dos lóbulos planos emplazados uno al lado del otro (Walker, 2009).

Día 2 – En la tarde: Cantera oriente, REPSA.

La "Cantera Oriente" se encuentra en el límite oriental del campus de la UNAM (Figura 16). A pesar de su ubicación cerca de una de las estaciones de metro más concurridas de la capital (estación Universidad), este lugar es un área verde muy tranquila que fue rehabilitada con especies de plantas exóticas y contiene un cuerpo de agua dividido por represas o barreras construidas para contener el agua. Este sitio es conocido informalmente como la "Cantera de los Pumas" porque contiene los campos de entrenamiento del equipo de fútbol "Pumas" de la UNAM. Las visitas sólo se permiten con cita previa, ya sea a través de la reserva ecológica (REPSA) o de los encargados del sector "Club Pumas".

Itinerario y descripción de paradas:

La excursión comienza en la entrada NW de la cantera (Figura 16), a 5 minutos a pie de la estación de metro. La excursión completa (paradas indicadas en la Figura 16) dura unas 2 horas, teniendo en cuenta las paradas para explicaciones e intercambio de opiniones.

Parada 1. Historia de la Cantera Oriente (GPS: N19°19.225', W99°10.417', 2258 m asl).

Antes de comenzar el recorrido, es útil conocer un poco la historia del sitio y saber que la Cantera se originó a partir de la intensa explotación de material basáltico durante 24 años (1970-1994; Figura 17). Se estima que se extrajeron aproximadamente 5.5 millones de m³ de material en una superficie de 14 ha (Lot, 2007) por una concesión que la UNAM otorgó a la Planta de Asfalto para que fuese utilizado en la construcción de carreteras.

Figura 17. Vista de la cantera tras la extracción. El basalto se extrajo hasta el nivel del antiguo suelo (en marrón en primer plano). Foto tomada desde la parte S de la cantera en 1994, antes de comenzar el proceso de rehabilitación ecológica. Obsérvese que en la parte N de la cantera, al fondo de esta foto, ya había iniciado el crecimiento de la vegetación en la parte donde escurría agua del acuífero somero que se perforó durante la explotación del basalto. Cortesía de Francisco Martínez.



Figura 16. Cantera Oriente. Este sitio está separado del Campus principal de la UNAM (a la izquierda) por la Avenida Delfín Madrigal y es administrado parcialmente por la REPSA (línea blanca discontinua en la imagen). Nótese que toda la zona está construida sobre las lavas del Xitle, pero éstas sólo afloran extensamente en la REPSA, todo lo demás ha sido transformado por la urbanización. En el popular barrio de Santo Domingo sólo hay pequeños afloramientos verticales a lo largo de las vías de las calles y algunos pequeños afloramientos restantes en jardines privados.



En 1985, después del gran sismo del 19 de septiembre, el gobierno de la ciudad utilizó el sitio para disponer de los escombros de los edificios destruidos, hasta que en 1996 las autoridades universitarias detuvieron estas actividades, designando 7.4 ha de la cantera como parte de la reserva ecológica (REPSA) y el área restante (~7 ha) para la construcción de las instalaciones del Club Pumas, terminando así con la especulación

sobre el terreno como relleno sanitario y su posterior utilización para la construcción de una unidad habitacional.

En 1997 se inició el proyecto de rehabilitación ecológica removiendo los escombros para formar terrazas, hacer un camino y aplicar capas de tierra y estiércol para formar un suelo artificial (tecnosuelo) en el que se plantaron arbustos, árboles y otras plantas en su mayoría exóticas (Parada 2; Figura 18).

Parada 2. Terrazas y manejo del sitio (GPS: N19°19.213', W99°10.375', 2276 m snm).

Tras esta breve introducción, se camina ladera abajo donde están las terrazas y se pueden observar las prácticas de manejo y las características de los tecnosuelos.

Los suelos presentes en las terrazas se denominan tecnosoles porque han sido formados artificialmente con cascajo, sedi-



Figura 18. A. Movimiento del material depositado en la cantera para estabilizar el talud formando terrazas para su posterior revegetación y delineando el camino de acceso que se construyó posteriormente. Cortesía de Francisco Martínez, 1997. B. Árboles exóticos que se plantaron a lo largo del camino. Cortesía de Manuel Figueroa Maheng, 2006.

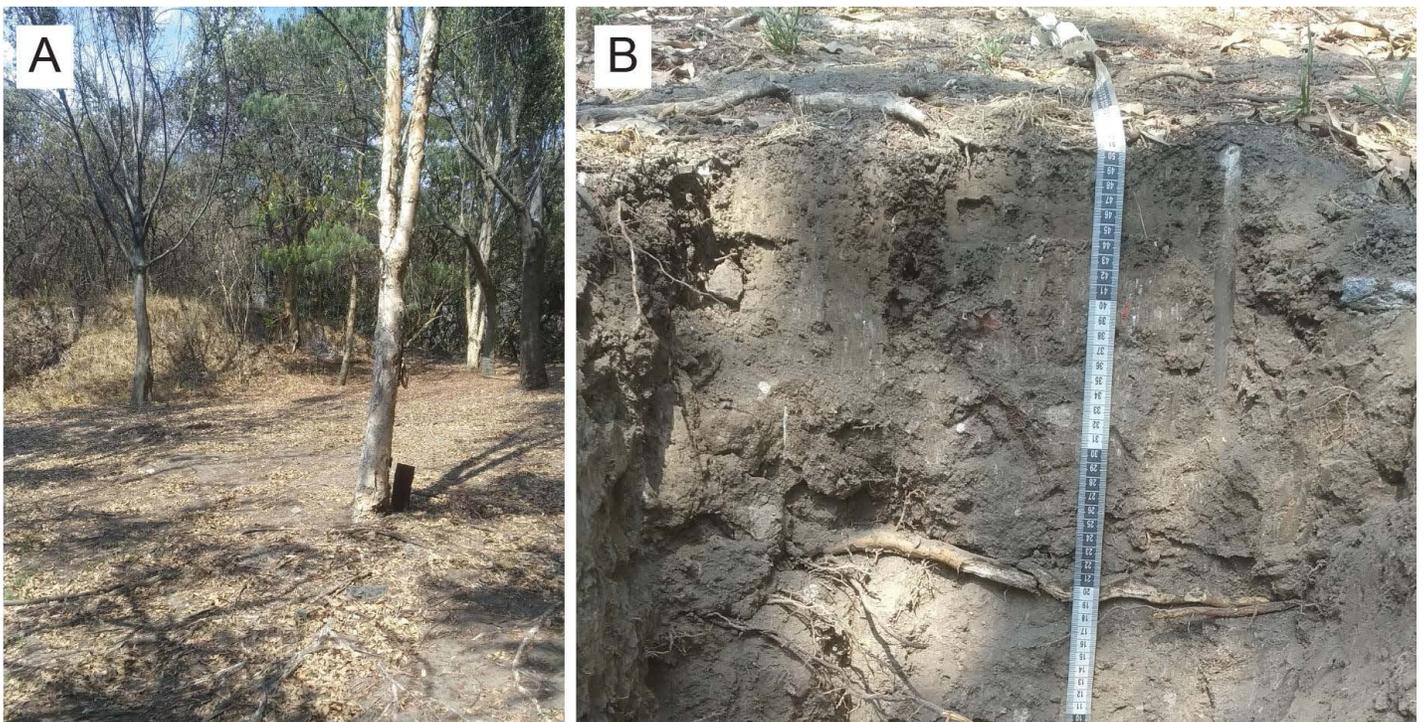


Figura 19. A. Vista sobre una de las terrazas. Esta foto muestra el resultado del barrido continuo de la hojarasca que ha dejado el suelo sin una cubierta protectora, impide la acumulación de materia orgánica en el suelo y lo hace propenso a la erosión de sus partículas, dejando al descubierto las raíces superficiales de los árboles. B. Los suelos presentes en las terrazas se han desarrollado a partir de materiales fabricados o transportados por el hombre. Son de baja calidad como soporte de vegetación y hábitat de organismos del suelo (edafón). Nótese el crecimiento de raíces en forma horizontal. Fotos tomadas por Silke Cram en marzo del 2020.

mentos y estiércol. Tienen una baja calidad para cumplir con la función de soporte de la vegetación debido a características limitantes, incluyendo su baja porosidad y bajo contenido en materia orgánica, alta densidad aparente y una estructura masiva, todo lo cual se refleja en una baja capacidad de retención de humedad y de aireación, condiciones de enraizamiento deficientes y un bajo contenido en nutrimentos. Durante muchos años ha recibido el manejo típico para el cuidado de jardines con césped y se barrió y retiró la hojarasca de la superficie del suelo, impidiendo así la incorporación de materia orgánica.

Parada 3. Manantiales y lago.

Bajando por el talud, se hace una parada en la base de la pared occidental de la cantera donde se pueden observar dos pequeños manantiales de agua muy próximos entre sí (Figura 20A). Después, se observa el lago caminando sobre la presa artificial hacia la pared oriental de la cantera (Figura 20B).

Estos manantiales forman parte de una serie que emerge de zonas fracturadas cerca de la base de la colada de lava en varios lugares y alimenta unos cuerpos de agua superficial que cubren aproximadamente 12,000 m² y favorecen el desarrollo de una amplia zona pantanosa o palustre (aprox. 20,000 m²) (Lot, 2007). Las fracturas en la roca son típicas de lavas basálticas jóvenes, como las del Xitle, que tienen una alta conectividad

hidráulica y permeabilidad, lo que significa que el agua se infiltra rápidamente por la roca porosa formando acuíferos (Peterson, 1972).

Por su configuración topográfica específica, las lavas del Xitle actúan como conductoras naturales del agua de lluvia desde las partes más húmedas y altas de la Sierra Chichinautzin (la zona del cráter del Xitle visitada el día anterior), hasta la zona más seca y de menor altitud (donde se encuentran Cuicuilco y el campus de la UNAM). También reducen el riesgo de inundaciones que ocurren cada temporada de lluvias, porque las lavas tienen una alta capacidad de infiltración y percolación del agua de lluvia. A pesar de la insuficiencia de recursos hídricos en la cuenca y el continuo sellamiento por la urbanización acelerada y sin planeación del derrame lávico, el acuífero somero de las lavas del Xitle ha sido poco estudiado y se encuentra fuertemente impactado por la contaminación antrópica (Canteiro *et al.*, 2019). Su existencia debe ser valorada y reconocida como un medio para aumentar la habitabilidad de la ciudad y el bienestar de todos los seres vivos.

El pequeño lago de la cantera está rodeado por una zona verde gestionada por la REPSA que es de interés biológico y tiene importancia ecológica (Lot, 2007). Los aspectos ambientales y ecológicos de la cantera son significativamente distintos a otras partes de la reserva ecológica, lo que motiva su gestión como entidad separada y la publicación de

una guía de campo dedicada (Lot, 2007). La especificidad del área y su principal interés es el ambiente lacustre que ahora es raro en la Cuenca de México pero que era común en el pasado, antes del desagüe de los paleolagos. En ese sentido, esta zona puede considerarse como una instantánea del entorno preurbano de la Cuenca de México. De manera bastante inesperada, dado el alto grado de transformación del área y la introducción de especies exóticas, los pequeños lagos contienen una rica fauna y flora acuática con muchas especies nativas y endémicas de distribución restringida y algunas incluso relictos o especies raras con respecto a su presencia en la Cuenca de México (Lot, 2007). El aislamiento de esta zona, que está rodeada por una pared de lava de hasta 40 m y cuyo acceso está restringido, la convierte en un laboratorio ideal para las investigaciones y le confiere altos valores paisajísticos y estéticos.

Parada 4. Exposición vertical de la colada de lava (GPS: N19°19.071', W99°10.348', 2264 m snm).

La lava del Xitle es probablemente la lava basáltica joven más excavada en el mundo, debido al crecimiento de una de las ciudades más grandes del planeta, primero cerca de sus márgenes y después directamente sobre ella.

Las excavaciones han adoptado distintas formas con el paso del tiempo. Las grandes canteras para extraer piedras de construcción fueron las más prominentes antes

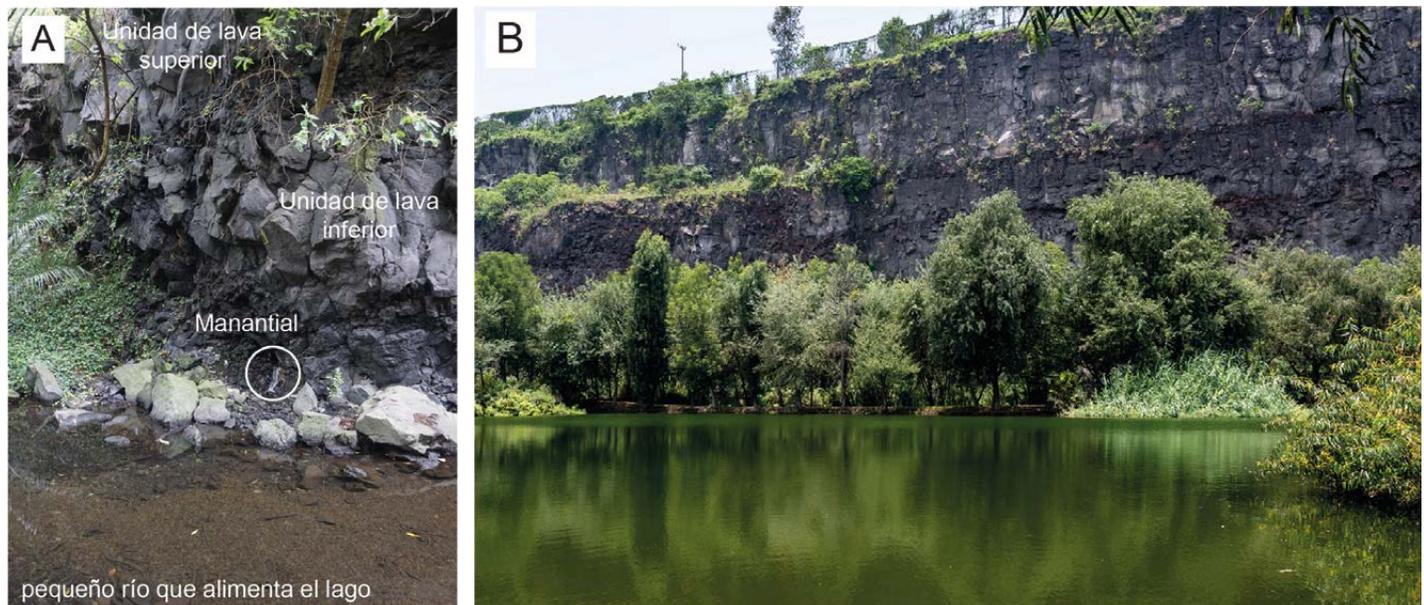


Figura 20. A. Parada 3. Vista de un manantial que aflora a lo largo de un sendero en la base de la pared más alta de la cantera, en el límite occidental del sitio. Obsérvese las dos unidades de lava. La unidad inferior presenta fracturas verticales irregulares y muy próximas entre sí, lo que puede indicar que la lava interactuó con agua durante su emplazamiento, ya que esto incrementa las tasas de enfriamiento y afecta el patrón de columnas (Long & Wood 1986). B. Vista sobre una parte del lago y de las paredes orientales de la cantera con las distintas unidades de lava.

de la urbanización de la zona. Cuando se construyeron grandes avenidas (Insurgentes Sur, Periférico Sur) se realizaron importantes cortes. Ahora, las excavaciones se limitan a zonas de construcciones más pequeñas y privadas, como los estacionamientos subterráneos o el anclaje de las estructuras de los edificios para que resistan los terremotos. Sin embargo, en la mayoría de estas excavaciones, las exposiciones resultantes de la estructura interna de la lava son efímeras ya que se cubren al finalizar las obras, lo que impide que puedan ser útiles para la investigación o educación.

Desde un inicio, los afloramientos resultantes de la extracción de rocas en canteras han impulsado involuntariamente trabajos de investigación pioneros como los de Waitz & Wittich (1910), Schmitter (1953) y Badilla-Cruz (1977), pero también los trabajos más recientes de George Walker, uno de los artífices de la vulcanología moderna, quien retomó esas investigaciones y reinterpretó múltiples observaciones anteriores (Walker, 1993, 2009). Las numerosas secciones cortadas a través de las lavas también han permitido diversos estudios sobre las propiedades magnéticas internas de los flujos de lava basáltica (por ejemplo, Cañón-Tapia *et al.*, 1995, 1996). Las canteras representan una oportunidad para fomentar la preservación del geopatrimonio, si son accesibles y se conservan.

La "Cantera Oriente" es la mayor cantera de lava del Xitle que aún no ha sido urbanizada y en la que la lava todavía puede observarse fácilmente y a la que se puede acceder para obtener muestras, lo que reviste un interés considerable para los estudios científicos. En ese sentido, la "Cantera Oriente" es el lugar donde, hasta donde se sabe, se ha encontrado en México la acumulación más gruesa de lava basáltica joven proveniente de una sola erupción. Los cortes artificiales de las paredes de la cantera muestran exposiciones espectaculares a través de una columna de hasta 40 m de espesor de flujos de lava pahoehoe inflados (lóbulos planos y túmulos). Éstos son continuos a lo largo de una distancia lateral de 900 metros y consisten en cinco unidades verticales principales (Figura 21A). El elevado espesor total de la lava y su compleja estructura interna permiten postular años de lento avance de los lóbulos, rellenando progresivamente una gran depresión (Guilbaud & Siebe 2009).

Este sitio es importante para interpretar el modo de crecimiento de las lavas por el proceso de inflación (o hinchamiento) que

crea la estructura interna específica de la misma (corteza vesiculada en la base y en la parte superior, núcleo denso: Figura 21B) y la formación de los lóbulos planos y los túmulos que tienen geometrías planares y levantadas, respectivamente. Estas características, que se muestran excepcionalmente bien en las paredes de la cantera, son típicas de las lavas pahoehoe y son diagnósticas de flujos de lava de larga duración de emplazamiento y gran alcance (Self *et al.*, 1998).

En particular, en la parada 4, el corte a través de las lavas está bien expuesto y puede observarse de cerca (Figura 21B).

Día 3 – Afloramientos de lava remanentes ("pedregales") en el campus de Ciudad Universitaria de la UNAM.

La REPSA de la UNAM es el remanente más grande en el que se puede observar la parte distal del campo de flujo de lava del Xitle y su ecosistema original. La morfología de la lava en esta área es típica del tipo pahoehoe que es común en Hawaii pero también en otros campos de lava basáltica (Self *et al.*, 1998). Debido a la necesidad de conservar y preservar este último reducto del ecosistema original y las múltiples amenazas que lo ponen en riesgo, se restringe la entrada a las visitas en las zonas núcleo, pero el campus de Ciudad Universitaria cuenta con 48 ha de "pedregales remanentes" que son parches

de afloramientos rocosos del campo de lava y que todavía no han sido destruidos por la urbanización y el cambio de uso de suelo a áreas verdes ajardinadas que resultan del relleno de los afloramientos con residuos de materiales de construcción formando suelos del tipo tecnosoles (Figura 22A; SEREPSA, 2008).

En las últimas dos décadas ha habido iniciativas para rescatar a estos "pedregales", restaurar su ecosistema y utilizarlos para la enseñanza al aire libre ("aula viva"). Son lugares magníficos para desarrollar proyectos de investigación, con la participación de estudiantes. En esta excursión visitaremos una zona donde se han desarrollado iniciativas de este tipo, en un proyecto de colaboración entre tres institutos científicos: Geofísica, Geología y Geografía. El Geopedregal es el pedregal más consolidado, con 10 años de actividades de restauración ecológica, mientras que los otros están en proceso para ser incluidos en un plan general de gestión.

GEOPEDREGAL

Durante la excursión seguiremos un sendero que rodea el sitio, haciendo paradas en lugares clave (Figura 22B). Esta excursión dura aproximadamente 1 hora incluyendo explicaciones en las distintas paradas.



Figura 21. Parada 4. A. Vista desde el dique artificial sobre el corte vertical a través de las coladas de lava. Nótese la compleja estructura interna. B. Fotografía de la pared de lava desde su base cerca del dique artificial, donde se aprecia el interior de una unidad de lava inferior cubierta por otra superior. Nótese el contacto rojizo entre las dos unidades que está relacionado con la oxidación de la parte superior de la unidad de lava inferior, tal vez debido al escape de gases.

Parada 1. Entrada al sitio y presentación del proyecto (GPS: N19°19.680', W99°10.536', 2270 m snm).

El Geopedregal se creó en 2012 sobre un afloramiento de lava de unos 3000 m² situado en un terreno compartido por los institutos de Geología y Geografía. El lugar, utilizado originalmente como un basurero (Figura 23), fue limpiado, restaurado y convertido en un pequeño geosito.

Este sitio expone en un entorno protegido los principales aspectos de la morfología de la lava, las adaptaciones biológicas correspondientes y los servicios ecosistémicos asociados, como lo es la regulación térmica, la captación de agua por infiltración, la amortiguación de la contaminación y el corredor de polinizadores nativos como murciélagos, colibríes, abejorros y mariposas. Las principales estructuras de lava consisten en un lóbulo plano ("lava rise" o "sheet lobe") alargado con márgenes laterales pronunciados y un túmulo oval en forma de cúpula con grietas axiales y laterales, que están separados por una depresión. Se pueden encontrar descripciones detalladas de estos tipos de estructuras de lava en Walker (1991) y Hon *et al.*, (1994) en el volcán Kilauea (Hawái).

El sitio se utiliza para llevar a cabo proyectos de investigación, prácticas de campo y divulgación (las tres funciones sustantivas de la UNAM) para estudiantes y universitarios de distintos niveles. También se aprovecha para exposiciones fotográficas, espectáculos de danza y visitas guiadas (naturalistas), así como para celebraciones como el Día de Muertos que atraen a personas de los centros de investigación cercanos y contribuyen a asegurar la existencia del sitio. Es el primer "pedregal remanente" del campus universitario con un programa completo de restauración que está protegido por la normatividad universitaria (Zambrano *et al.*, 2019).

Parada 2. Lóbulo plano y túmulo sur, vegetación nativa (GPS: N19°19.674', W99°10.530', 2270 m snm).

La parte S del Geopedregal está formada por un lóbulo plano de lava que está bordeado por un margen escarpado que consiste de placas de lava volteadas y separadas por grietas profundas (grietas de inflación) (Figuras 24A, B). El margen oriental de este lóbulo se superpone a una estructura baja de túmulo que fue desenterrada durante la limpieza del sitio (Figura 24C). Este túmulo es parte de

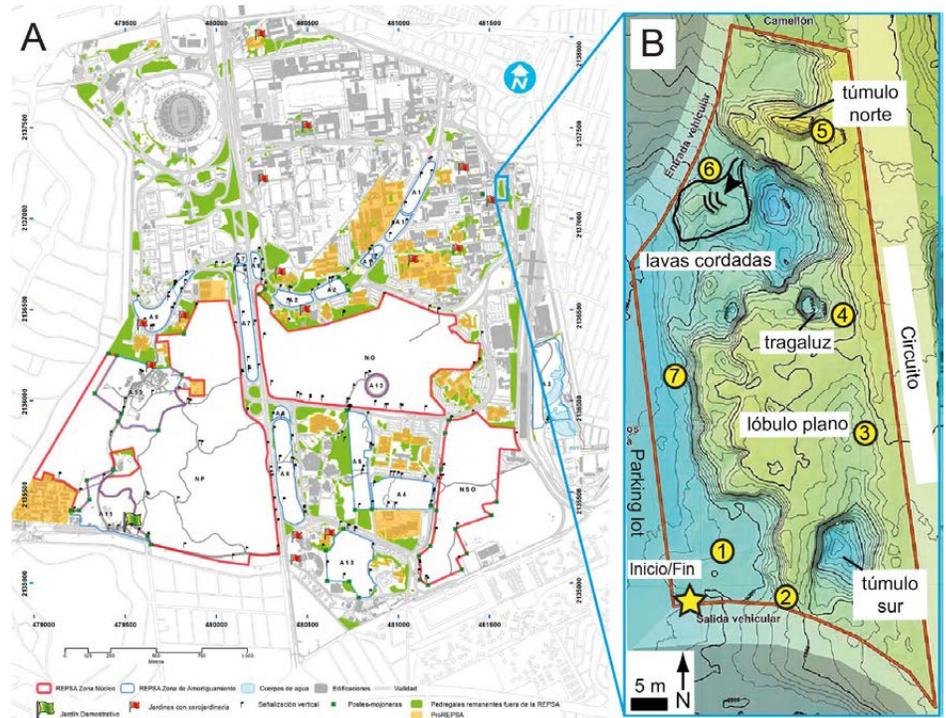


Figura 22. A. Localización del Geopedregal dentro del campus de Ciudad Universitaria de la UNAM (Atlas de Riesgos, Lot *et al.*, 2012). Los polígonos rojos y azules corresponden a las zonas núcleo y de amortiguamiento respectivamente de la reserva. Los polígonos verdes son los "pedregales remanentes" que se cartografiaron en 2012 y son afloramientos de lava remanentes no protegidos por la reserva, pero que proporcionan múltiples servicios ecosistémicos. B. Paradas dentro del Geopedregal, en un mapa topográfico. Se muestra su ubicación en el mapa A.



Figura 23. Parada 1. Proyecto Geopedregal. Imágenes que muestran el estado inicial del sitio que se utilizaba como sitio de disposición de residuos sólidos de todo tipo y donde vivían personas en situación de calle.



Figura 24. Parada 2. A. Vista aérea de dron del margen lateral occidental del lóbulo laminar que es visible desde la entrada del sitio. B. Vista del margen lateral del lóbulo en la estación lluviosa y algunas plantas nativas. C. Vista del túmulo S y de la estructura artificial en forma de rampa que se hizo para estabilizar el talud. Nótese que los bloques utilizados para el talud son trozos rotos de lavas del Xitle y son buenos ejemplos para mostrar sus vesículas y cristales.

una unidad de lava subyacente emplazada previo al emplazamiento del lóbulo plano principal. Gracias a las excavaciones profundas, como la Cantera Oriente (sitio anterior), sabemos que la capa de lava puede ser gruesa y estar formada por múltiples unidades.

En esta pequeña zona de morfología irregular y gran geodiversidad, ya se puede observar la alta biodiversidad de la vegetación reintroducida (Figura 24B). Dependiendo de los microhábitats con condiciones diferenciales de temperatura, humedad y luz, pueden desarrollarse diversas especies vegetales y consorcios comunitarios. Cabe destacar que sólo algunas de las especies fueron introducidas y las demás se propagaron de forma natural una vez adecuado el espacio sobre lo que había en las zonas conservadas. Unas de éstas son la costra criptobiótica saxícola (costra formada por organismos que crecen directamente sobre la roca) formada por una asociación de cianobacterias, líquenes y briofitas, hasta la vegetación de matorral dominada por la planta nativa local llamada "palo loco" (*Phytocaulon praecox*) que da nombre a este ecosistema matorral xérico, llamado antes Senecio (*senecioetum*). La estructura de la comunidad está formada por agaves y varias orquídeas terrestres (*Dichromanthus* spp., *Bletia* spp., etc.), con pocas especies arbóreas ("tepozán": *Buddleja cordata*, "encino" reintroducido: *Quercus rugosa* y "copal": *Bursera fagaroides* y *Bursera cuneata*) que crecen sobre todo en fracturas profundas de la lava como fisuras de inflamamiento y tragaluces (ver Parada 4).

Entre las especies de matorral destacan las orejas de burro (*Crassulasea Echeveria gibbiflora*) que suelen crecer en fracturas y grietas poco profundas, varias especies de cactus ("nopál": *Opuntia tomentosa*, *Mammillaria*



Figura 25: Parada 3. A: Vista general de la excavación en el tecnosol que rellena el espacio entre el pedregal y la calle. Fotografía del 4 de mayo del 2022. B: Columna del tecnosol. Tiene 16 cm de profundidad (horizonte Ah), con acumulación de materia orgánica, pH neutro, estructura subangular y gran cantidad de poros. Se trata de un material arenoso y limoso con abundantes piedras y artefactos (residuos de construcción).

magnimamma y la endémica *Mammillaria haageana san-angelensis* que está considerada extinta en la REPSA y fue reintroducida por clones) y el agave polinizado por murciélagos (*Manfreda brachystachya*), que crecen en superficies planas expuestas a abundante luz solar.

Parada 3. Suelos naturales versus artificiales (GPS: N19°19.687', W99°10.525', 2270 m snm).

En este lugar, se desciende a una pequeña depresión que se encuentra entre el pedregal y el camino perimetral (Figura 25A). En el lado W (a la izquierda), se observa un corte a través de la lava y su suelo natural en la parte superior y en el lado E (a la derecha) existe un corte de aproximadamente 1.6 m que permite ver el suelo artificial (Figura 25B). Estos dos tipos de suelo contrastantes (natural vs. antropogénico) nos permiten explicar los servicios ecosistémicos proporcionados por los suelos naturales.

Las lavas que rodean al Geopedregal han sido revestidas con materiales antrópicos a principios de los años 70 para construir las zonas verdes ajardinadas de la universidad cubiertas de césped, donde se desarrollan tecnosuelos (según el sistema de clasificación de la FAO) que tienen al menos 1,5 m de espesor. Los materiales parentales de este suelo son de origen antrópico y corresponden a residuos de construcción de diferentes tamaños, que se utilizaron para construir las Ciudad Universitaria. En este sitio es probable que haya habido al menos dos eventos de disposición, los dos primeros horizontes (2C-3C) parecen ser más jóvenes que el resto del perfil (4C) (Figura 25B). Los principales procesos pedogenéticos son la acumulación de materia orgánica en el horizonte superficial (Ah) y la formación de una estructura subangular (Figura 25B).

En este suelo, las raíces de árboles, arbustos y gramíneas pueden penetrar hasta los primeros 16 cm (Figura 25B), sin embargo, a

mayor profundidad, la densidad aumenta y sólo las plantas con raíces pivotantes pueden penetrar y abrirse paso en estos horizontes. Especies secundarias como el tepozán (*Buddleja cordata*) cumplen esta función y facilitan el ingreso de especies con raíces fibrosas. La cubierta vegetal del suelo está constituida principalmente por pasto, plantas herbáceas y hojarasca proveniente de los árboles vecinos. La degradación de estos materiales ha formado un horizonte orgánico incipiente, suficiente para favorecer el crecimiento de especies secundarias, pero no de las especies primarias que requieren mayor disponibilidad de nitrógeno (i.e. *Quercus* spp.). Los materiales de construcción que originan estos suelos aportan cantidades importantes de bases intercambiables (K, Ca y Mg), el pH neutro evita la pérdida de bases por lixiviación, así como la disponibilidad del P. Debido a que una parte importante de estos suelos se encuentra compactada, el agua que se retiene contra la gravedad es baja.

En comparación, la edad de la lava emplazada es inferior a 1700 años y, por tanto, los suelos “naturales” sobre ella son jóvenes y muy poco profundos (<4 cm) y se localizan sólo en pequeñas depresiones morfológicas, lo que permite una superficie de roca casi continua. Contienen menos del 20% de partículas finas y bajas cantidades de nutrientes como cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K+ y Na+) pero alta materia orgánica, clasificándose como un nudilítico Leptosol hiperskeletal distric por el USDA WRB-FAO (Siebe *et al.*, 2016; Guilbaud *et al.*, 2021). Desde el punto de vista de la calidad del suelo, se podría decir que la calidad del sitio es pobre: la textura del suelo es gruesa, causando drenaje excesivo y baja capacidad de retención de agua, la retención de nitrógeno es limitada porque el horizonte orgánico es delgado, pero la función principal de estos suelos es la infiltración, la recarga de acuíferos y el sostenimiento de una alta biodiversidad. La geodiversidad en términos de pendiente, rugosidad y patrón de fracturas de la lava, y el espesor del suelo asociado, produce una alta biodiversidad a través del papel crucial de los micrositos (o microhábitats) (Cano-Santana *et al.*, 2006; Castellanos-Vargas *et al.*, 2017).

Parada 4. “Skylights” y fauna (GPS: N19°19.702', W99°10.528', 2270 m snm).

En este lugar, cerca del margen N del lóbulo plano, podemos observar dos cavidades semicirculares conectadas de 1.5 m de

profundidad (Figura 26). Ambas cavidades muestran un techo curvo a su alrededor y su base está cubierta por fragmentos de la corteza de la lava. No se distingue una conexión interna con un túnel más largo.

Los tragaluces (“skylights”) se describen como una abertura en el techo de un tubo de lava que suele ser el resultado del colapso de puntos débiles de la corteza lávica, debido a un descenso del nivel de la corriente interna que antes la sostenía (Peterson *et al.*, 1994). Durante el emplazamiento del lóbulo plano, es posible que se formaran pequeños conductos o tubos de lava por debajo de la corteza, que permitieron la circulación eficiente de lava fluida y su llegada hacia el margen activo. El vaciado de estos conductos tras la actividad (o la migración del flujo caliente de lava hacia otro sector del campo) probablemente provocó el colapso por gravedad de un sector más débil de la corteza que anteriormente flotaba sobre la lava fluida. Estas cavidades presentan escasa vegetación debido a la baja intensidad de la luz en su interior. A pesar de ello, la cavidad más grande alberga un árbol de tepozán que creció en su interior (Figura 26), y también sirve de escondite a pequeños mamíferos.



Figura 26. Parada 4. “Skylights” o tragaluces. A. Vista de las dos cavidades separadas por un puente de corteza de lava. Fotografía tomada el 2 de febrero del 2022. B. Vista del interior de la cavidad más grande que tiene un árbol de tepozán creciendo en la orilla. Fotografía tomada el 3 de marzo del 2023.



Figura 27. Parada 5. A. Vista general del túmulo de aprox. 3 m de altura en el extremo N del Geopedregal. B. Vista de la grieta axial desde el extremo E, mirando hacia el W. Obsérvese la textura cordada de la lava en primer plano y el árbol (pirul) que crece en la grieta. Fotografías tomadas el 4 de mayo del 2022.

La irregularidad de la superficie y la presencia de cuevas en el pedregal promueven una importante diversidad en la fauna, como mamíferos e insectos locales (marsupial “tlacuache” *Didelphis virginiana*, cola de anillo “cacomixtle” *Bassariscus astutus*, roedor “ratón piñonero” *Peromyscus gratus gratus*, y el murciélago en peligro de extinción *Leptonycteris curasoae*).

Parada 5. Túmulo N, polinizadores (GPS: N19°19.715', W99°10.528', 2272 m snm).

El Geopedregal contiene, en su extremo N, un promontorio de unos 3 m de altura. Este túmulo grande tiene forma alargada en una dirección aproximadamente E-W, y alcanza 19 m de largo y 16 m de ancho (Figura 27A). Es asimétrico y más alto y estrecho hacia su extremo oriental. El túmulo tiene una grieta principal que sigue su eje principal (grieta axial, Figura 27B) y varias grietas más pequeñas y ramificadas situadas en los lados o flancos del túmulo (grietas radiales). Estas grietas de inflación tienen forma de “zig-zag” y es fácil ver que ambos lados de las grietas coinciden perfectamente y corresponden a una abertura en la corteza. La vertiente

N del túmulo presenta una grieta lateral subhorizontal cerca de la base que forma una cavidad alargada, mientras que la vertiente S presenta varias cavidades grandes (cuevas) al E y una serie de grietas laterales. Un lóbulo plano con abundantes texturas de lava cordada emerge del lado SW del túmulo grande (Parada 6).

Una colonia de abejas africanizadas se estableció en la grieta axial, aprovechando las grandes vesículas de la parte superior de las paredes. Probablemente varios mamíferos viven en la grieta principal, prueba de ello son los excrementos que se han encontrado. El árbol más alto (pirul) crece en la grieta axial, que es la más profunda (>1 m). Sus raíces penetran profundamente en la grieta e incluso podrían haberla abierto aún más durante el crecimiento del árbol, favoreciendo la acumulación de materia orgánica en su interior y la infiltración del agua de lluvia en la roca porosa. Las grietas radiales de los flancos del túmulo, por el contrario, presentan arbustos más pequeños (tepozán), probablemente relacionados con su menor profundidad. Estas grietas también son muy importantes para la fauna.

Parada 6: Las cordadas y letrina (GPS: N19°19.710', W99°10.534', 2271 m snm). Esta zona consiste en un lóbulo plano poco elevado (< 1 m) de aproximadamente 24 m² con complejas características cordadas, que emerge del lado SW del túmulo previamente descrito (Figura 28). La textura cordada de la lava indica que este lóbulo fue formado por lava caliente, muy fluida y rica en gas, probablemente al principio de la formación del túmulo. Las lavas pahoe-hoe pueden adoptar formas caprichosas, siendo la más típica la conocida como lava cordada, que es muy común en las lavas distales del Xitle (Badilla-Cruz, 1977). Se origina porque al emerger a la superficie, la lava se enfría rápidamente en su superficie, formando una delgada costra o piel que tiene un comportamiento plástico que le permite deformarse mientras la lava continúa fluyendo. A medida que el flujo avanza, se generan una serie de pliegues paralelos a la dirección del flujo (Gregg *et al.*, 1998).

Aunque las lavas cordadas se observan en casi todas las superficies expuestas del Geopedregal, en este sitio estas estructuras son fácilmente accesibles y están bien expuestas después de su restauración, es decir, no hay mucha vegetación establecida que impida su observación, lo que permite

apreciar su complejidad morfológica, así como su belleza e importancia ecológica, gracias a que prácticamente no hay formación de suelo (Figura 28). Se trata de un sitio con alta incidencia solar, ya que es plano y los pocos árboles son pequeños, por lo que hay poca sombra. La acumulación de semillas que provienen de los excrementos de los mamíferos que viven en el Geopedregal (tlacuache) favorecen la propagación y el crecimiento de las plantas.

Parada 7. Corte artificial de lava, enfriamiento y desgasificación de la lava; comunidades saxícolas (GPS: N19°19.694', W99°10.540', 2270 m snm). En el Geopedregal existen paredes naturales cuyo origen se debe a la apertura de la corteza lávica debido a la expansión del lóbulo por inflación interna y paredes artificiales derivadas de procesos antropogénicos. En esta parada, un corte artificial expone la corteza superior del lóbulo con gran cantidad de vesículas en superficie hasta su núcleo más denso en la parte inferior (Figura 29A).

Las lavas basálticas de tipo pahoe-hoe son muy calientes (Temp. = 1100-1200°C) en el momento de su emisión; su superficie se enfría rápidamente, pero su interior tarda mucho tiempo en solidificarse (Hon *et al.*, 1994). En consecuencia, existe una variación en las texturas vesiculares y cristalinas desde la parte externa (corteza) a la interna (núcleo) del flujo, lo que se debe a un aumento en el tiempo de solidificación. En todas las paredes o secciones se observa que la lava contiene abundantes cavidades en su interior denominadas vesículas (Figura 29B). Éstas son el resultado de la pérdida de gas y la formación de burbujas dentro de la lava al fluir, que quedaron atrapadas cuando se solidificó. Este gas procede del escape de vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) y dióxido de azufre (SO₂) de la lava fluida (Walker, 1993). Como la densidad del gas es menor que la de la lava, las burbujas ascienden hacia la parte superior y, por tanto, la roca es muy porosa en la parte superficial de la lava, con muchas vesículas pequeñas y algunas más grandes, que aumentan de tamaño y disminuyen en abundancia al aumentar la profundidad; las burbujas de gas más grandes se forman por coalescencia, que resulta de la fusión de varias burbujas en contacto. En esta pared, se observa que la parte superior tiene un gran número de vesículas pequeñas y la parte inferior tiene mucho menos vesículas, que son más grandes. Las vesículas

tienen importantes funciones ecológicas. En primer lugar, favorecen la infiltración de agua en la roca y su retención, permitiendo la recarga de acuíferos poco profundos de la zona (Canteiro *et al.*, 2019). Además, las vesículas favorecen la biodiversidad. Las más grandes en las paredes del túmulo N sirven de nicho para las abejas; también es común observar lagartijas en las pequeñas grietas que se forman en la lava durante el proceso de enfriamiento ("cooling joints"). Estas grietas también sirven como receptores de agua, sedimentos y materia orgánica, lo que permite el crecimiento de pequeñas plantas en las paredes (helechos, "oreja de burro", etc.). Directamente sobre la pared también se forman costras microbianas (líquenes), de gran importancia ecológica ya que son los primeros colonizadores de las rocas e inician la pedogénesis (Cano-Santana & Meave, 1996).

SITIOS ALREDEDOR DE LOS INSTITUTOS EN CIENCIAS DE LA TIERRA: GEOSENDERO.

Alrededor de los Institutos de Geofísica, Geología y Geografía hay varios afloramientos de lava que tienen tamaños y atributos

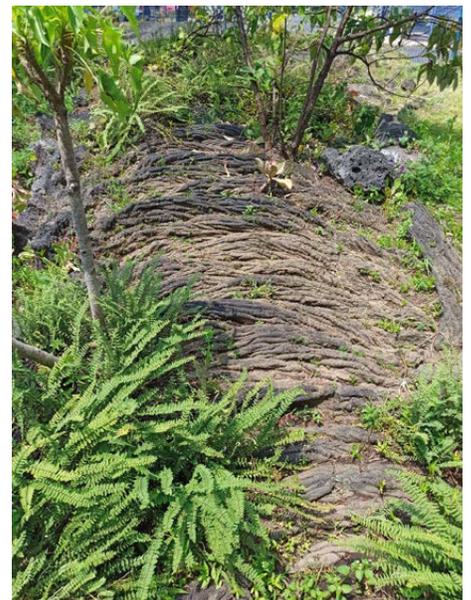


Figura 28: Parada 6. Lavas cordadas. Las lavas forman aquí un lóbulo plano ("sheet lobe") relativamente delgado (<1 m de espesor) con superficies planas y una gran diversidad de pliegues, desde simples (una generación) a complejos (varias generaciones; formas retorcidas). Notan la abundancia de helechos, típica en temporada de lluvia. Fotografía tomada el 24 de agosto del 2022.

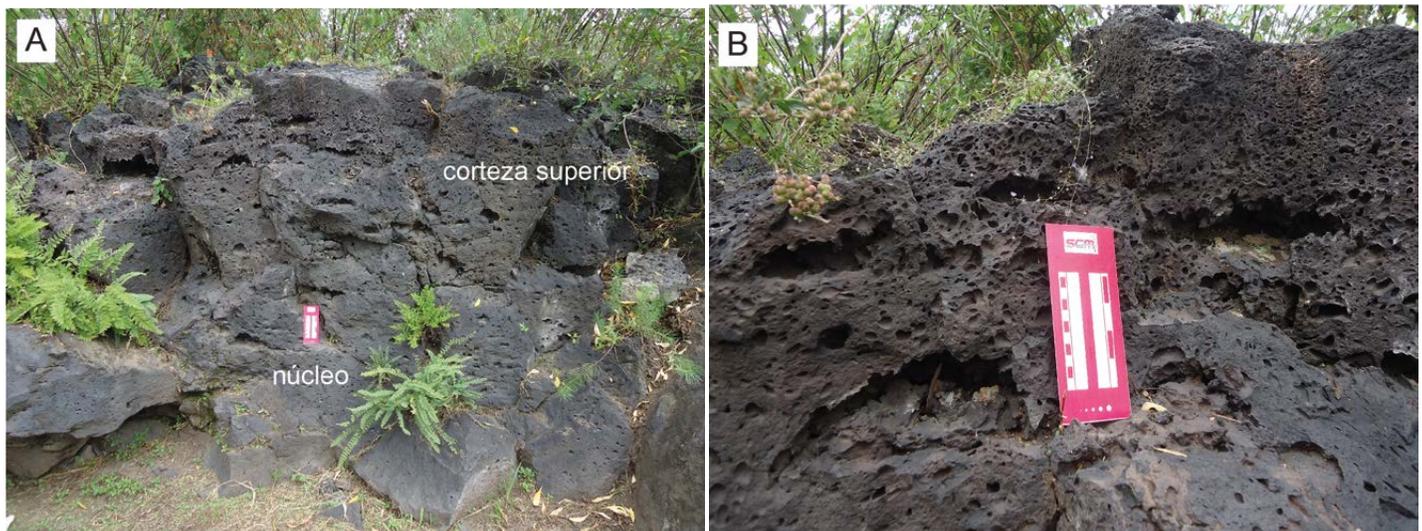


Figura 29. Parada 7. A. Sección de un margen lateral de un lóbulo que muestra la corteza superior muy vesicular y el núcleo más denso. B. Detalle de la corteza superior que muestra la abundancia de vesículas y sus formas muy variadas. Obsérvense los helechos que crecen en las grietas (grietas de enfriamiento llamadas “cooling joints”). Estas fotografías fueron tomadas en enero del 2018.

distintos, tanto en términos de elementos geológicos y biológicos como de su tipo y grado de manejo que se les da. A diferencia del sitio del Geopedregal, ninguno de estos sitios ha sido restaurado ecológicamente y están sometidos a numerosas amenazas. Se diseñó un geosendero para visitar esos afloramientos (Figura 30). Este recorrido dura aproximadamente 1 hora, con explicaciones e intercambio de opiniones en las distintas paradas.

Parada 1. Jardines entre los Institutos de Geología y Geofísica (GPS: N19°19.629', W99°10.579', 2270 m snm).

Se trata de un pequeño afloramiento de lava (250 m²) formado por dos estructuras tumulares separadas por grietas profundas y que muestran una ejemplar superficie de lava cordada (Figura 31). Los túmulos se originaron por el levantamiento de la corteza externa rígida de la lava debido a la inflación interna durante el emplazamiento, como un panqué en el horno. En este sitio encontramos plantas nativas y exóticas, estas últimas de uso ornamental. Hay árboles nativos de tepozán y exóticos como el fresno (*Fraxinus uhdei*) y el pirul (*Schinus molle*) que son los más comunes en esta zona. Este lugar es manejado todo el año por jardineros y recibe algo de riego. Está amenazado por una invasión de "pasto kikuyo" ornamental (*Pennisetum clandestinum*) y la acumulación de desechos de jardinería.



Figura 30. Geosendero en torno a los institutos de investigación "Geo" de Ciencias de la Tierra en la UNAM: IGG= Instituto de Geografía, IGL= Instituto de Geología, IGF= Instituto de Geofísica. Otras dependencias son el CENDI (Centro de Desarrollo Infantil) y la DGAE (Dirección General de Administración Escolar, dependencia encargada de la entrega de títulos de grado). Imagen satelital tomada de Google Earth.



Figura 31. Fotografías del pedregal entre los institutos de Geología y Geofísica. A. Túmulo que forma la parte N del afloramiento. Nótese el crecimiento de árboles en la grieta axial. Fotografía tomada el 27 de abril del 2022. B. Ejemplar textura de lava cordada que se observa en una placa levantada en la parte N del sitio. Fotografía tomada el 21 de abril del 2023.

Parada 2. Entrada al Instituto de Geología (GPS: N19°19.668', W99°10.561', 2270 m snm).

Este afloramiento de lava tiene una forma aproximadamente cuadrada y ocupa una superficie de 460 m² (Figura 32A). Consiste en una serie de túmulos de forma alargada, con profundas grietas subverticales que forman paredes de lava. Estas paredes muestran típicamente estrías sub-horizontales (Figura 32B) que probablemente resultaron de la apertura incremental de la grieta en el interior de la lava viscosa (Walker, 1991). Las superficies de lava varían de lisas a cordadas (o plegadas) (Figura 32C) y están subdivididas en placas de algunos metros de tamaño separadas por grietas poco profundas.

Este sitio está situado en el lado N del edificio de tres plantas del instituto de Geología, cuyo edificio proporciona una sombra considerable durante todo el año. Además, hay un sistema de riego y una alta densidad de árboles (3.2 individuos/m² en promedio), por lo que el ambiente es húmedo y fresco. En el sitio se registraron temperaturas de 20 °C, frente a los 40 °C del estacionamiento vecino en mayo de 2022. Por este motivo, en este afloramiento abundan los líquenes, especialmente en las paredes de lava, y diferentes especies de helechos. Sin embargo, también hay varias plantas ornamentales exóticas que fueron introducidas por el programa de áreas verdes de la universidad. La convivencia/competencia entre plantas nativas y exóticas ocasionalmente resulta



Figura 32. Fotografías del pedregal en la entrada del Instituto de Geología. A. Vista general del sitio desde el estacionamiento cercano. Obsérvese los numerosos árboles que dan sombra casi permanente al espacio. B. Paredes fuertemente inclinadas de la grieta axial de un túmulo alargado. Nótese la estríación paralela a la superficie superior. C. Ejemplar textura de lava cordada de un lóbulo que se desprendió del túmulo principal, en la esquina SE del sitio. Fotografías tomadas el 1 de diciembre del 2021.

en un problema para la preservación de las especies nativas. Otro problema es la acumulación de residuos de jardinería en las depresiones del sitio, que gradualmente entierran las estructuras de lava. Al igual que en otros sitios, se tiene evidencia del tránsito de animales como aves, cacomixtles y tlacuaches, además de ardillas, perros y gatos que afectan el ecosistema originario.

Parada 3. Camellón (GPS: N19°19.640', W99°10.499', 2274 m snm).

Cruzando la calle que conduce a lo largo del margen oriental del Geopedregal, hay una gran zona semirectangular (5003 m²) que consiste en un extenso lóbulo plano de poca altura en el lado N y una elevación de lava (estructura intermedia entre lóbulo plano y túmulo) de unos 2 m de altura en el lado S (Figura 33A), separadas por una zona deprimida.

Este sitio presenta una alta geodiversidad (grietas profundas, Figura 33B, extensas áreas de lava cordada; cortes verticales a lo largo del camino) y una biodiversidad de especies nativas (nopal: Figura 33C, tepozán, palo loco, agave, oreja de burro, entre otras). Sin embargo, también abundan las especies exóticas (pasto kikuyo, ricino *Ricinus communis*, leonotis *Leonotis nepetifolia*). En mayo se ha medido una temperatura de 45°C en el centro del lóbulo, frente a 20 °C en el interior de las grietas.

Debido al fácil acceso y a la falta de gestión por parte de cualquier entidad o dependencia, este sitio es objeto de múltiples amenazas y usos indebidos (vandalismo, se utiliza como baño público, refugio de indigentes,



Figura 33. Fotografías del pedregal remanente en el camellón. A. Vista general del túmulo en el lado S del pedregal tomada el 14 de diciembre del 2022, después de la realización de dos jornadas de limpieza. Nótese el árbol alto (pirul) que sobresale de la cima del túmulo, enraizado en la profunda grieta axial. B. Profunda grieta de inflación en el interior del túmulo, accesible desde la calle y en la que puede observarse de cerca la estructura vesicular interna de la lava. Desafortunadamente, contiene una gruesa capa de residuos y es utilizada como baño público. Foto tomada el 10 de noviembre del 2021. C. Superficie de elevación de lava o lóbulo plano en la parte N del pedregal, donde crecen exitosamente cactus (nopal) gracias a la abundante luz solar. Nótese también las flores de mayitos en esta foto. Foto tomada el 27 de abril del 2022.



Figura 34: Fotografías del "pedregal" cercano al estacionamiento del Instituto de Geofísica. A. Vista general del lugar desde la banqueta de cemento con techo que conduce a la entrada del edificio de Geofísica. Nótese los árboles que dan sombra casi permanente al espacio, y la cobertura de la lava por acículas de pino. B. Textura de lava cordada cubierta de costra saxícola y con flores de mayitos. Estas fotos se tomaron después de que los jardineros cortaran la hierba. Fotografías tomadas el 27 de abril de 2022.

acumulación de residuos de jardinería en grietas etc.). La comunidad lo considera inseguro. Una reciente iniciativa de rehabilitación de este lugar dirigida por la COUS (Comisión para la Sustentabilidad de la UNAM) y en la que participan las dependencias que lo rodean, entre ellos los Institutos de Ciencias de la Tierra, está rindiendo resultados, principalmente mediante la organización de jornadas de limpieza casi mensuales.

Parada 4. Estacionamiento del Instituto de Geofísica (GPS: N19°19.597', W99°10.542', 2273 m snm).

Este sitio rectangular de tamaño medio (883 m²) muestra una superficie plana con lava cordada y superficies onduladas (Figura 34A) casi totalmente colonizadas por costra saxícola (Figura 34B). Se observa un sistema de grietas poco profundas (<20 cm) y un corte artificial de 40 cm de altura a través de la corteza de lava del lado del edificio del instituto. Este sitio arbolado alberga fresnos, cedros (*Cedrus sp.*), pinos (*Pinus sp.*), entre otros. Hay poca vegetación típica y algunas especies de jardinería ornamental. También crecen especies nativas, como mayitos (*Zephyranthes spp.*) y orquídeas terrestres.

CONCLUSIONES

A pesar de ser una de las zonas más pobladas y urbanizadas del planeta, la ciudad de México aun conserva sitios geológicos y arqueológicos de gran valor en lo que corresponde a los productos de la erupción del Volcán Xitle y sus efectos. Los geositos visitados en esta excursión presentan valores tanto científicos como estéticos, educativos, turísticos y de conservación ambiental. Permiten observar los productos de una erupción volcánica reciente y reflexionar sobre el impacto tanto positivo como ne-

gativo del volcanismo sobre el desarrollo humano y el ambiente. Cabe notar que una nueva erupción de este tipo es un evento probable en esta área (Siebe, 2000; Siebe *et al.*, 2004), por lo cual es importante sensibilizar la población de la ciudad sobre este fenómeno para reducir su vulnerabilidad (Guilbaud *et al.*, 2021).

Se destaca:

1) Gran parte de la información presentada en esta guía es fruto de trabajos de investigación en curso y que puede ser re-evaluada en el futuro: la investigación científica es una labor en desarrollo constante y varios sitios no han sido investigados a detalle.

2) El enfoque de nuestro trabajo hacia el estudio y la valoración del geopatrimonio nos ha llevado a considerar los diversos aspectos que lo afectan, como la geodiversidad, la biodiversidad y el patrimonio cultural. La integración de las distintas disciplinas representa una experiencia enriquecedora para nuestras investigaciones y labores docentes, pero también es una clave para realizar excursiones de campo amenas y divertidas.

3) Los sitios visitados cuentan con una infraestructura turística muy limitada. Varios de ellos tienen una barda perimetral que permite controlar el acceso, pero la zona del cono del volcán no cuenta actualmente con mecanismos de regulación de su acceso. En este sitio hemos observado una urbanización ilegal que ha transformado negativamente el entorno inmediato del volcán durante los últimos 15 años, a pesar de que las autoridades han conferido a esta zona la denominación de "área de conservación". Evidentemente, alguien no cumple cabalmente con sus funciones.

4) Al organizar excursiones abiertas al público en general, nos hemos percatado del gran interés por parte de un sector de la población local en conocer mejor su

entorno y vincularse con la naturaleza y la ciencia, además de tener un genuino interés y compromiso por la conservación del medio ambiente. Los habitantes del área están particularmente interesados en aprender sobre los volcanes locales y el vulcanismo en general, lo cual constituye una ventaja para su sensibilización sobre el tema que podría incrementar su resiliencia frente a los peligros que representan.

Con base a estas observaciones, recomendamos el desarrollo de una estrategia integral de investigación, protección y divulgación del geopatrimonio de la ciudad de México, adoptando una visión multidisciplinaria y social, para el bien de la sociedad en su conjunto.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la participación activa de Nestor Tunal Sánchez y María Fernanda Martínez-Báez Téllez en el proyecto Geopedregal desde su inicio. Alumnos de varios talleres impartidos en la Facultad de Ciencias apoyaron en la descripción de sitios del Geopedregal y del geosendero de los institutos. Recibimos apoyo por parte de los proyectos siguientes: DGAPA-UNAM PAPIIT-IN111424 ("Volcanismo monogenético y sociedad: estudio de la actividad pasada, evaluación del peligro y geopatrimonio"), Proyecto CONAHCYT CBF-1049 ("Proyecto Geocity: Geopatrimonio del sur de la Ciudad de México y su relación con aspectos biológicos y socioculturales"), SEP-CONACYT-ANUIES-ECOS Francia 321145 ("Construcción del sentido a través del patrimonio natural") y UNESCO-IGCP 692 ("Geoheritage for geohazards and sustainable development through capacity building for local communities in developing countries").

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 México City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1-4), 143-162.
- Arce, J. L., Layer, P. W., Lassiter, J. C., Benowitz, J. A., Macías, J. L. & Ramírez-Espinosa J. (2013). 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. doi:10.1007/s00445-013-0774-6
- Arce, J. L., Macías, J. L., & Vázquez-Selem, L. (2003). The 10.5 ka Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, Mexico: Stratigraphy and hazard implications. *Geological Society of America Bulletin*, 115(2), 230-248.
- Badilla-Cruz, R. R. (1977). Estudio petrológico de la lava de la parte noreste del Pedregal de San Ángel, D.F. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 38, 40-57.
- Bloomfield, K. (1975). A late-Quaternary monogenetic volcano field in central Mexico. *Geologische Rundschau*, 64, 476-497.
- Cano-Santana, Z. & Meave, J. (1996). Sucesión primaria en derrames volcánicos: el caso del Xitle. *Universidad Nacional Autónoma de México, Ciencias* (041), 58 p.
- Cano-Santana, Z., Pisanty, I., Segura, S., Mendoza-Hernández, P. E., León-Rico, R., Soberón, J., ... & Martínez-Ballesté, A. (2006). Ecología, conservación, restauración y manejo de las áreas naturales y protegidas del Pedregal del Xitle. *Manejo, conservación y restauración de recursos naturales en México: perspectivas desde la investigación científica*, 203-226. Universidad Nacional Autónoma de México, Editorial Siglo XXI.
- Cañón-Tapia, E., Walker, G. P., & Herretero-Bervera, E. (1995). Magnetic fabric and flow direction in basaltic pahoehoe lava of Xitle volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 65(3-4), 249-263.
- Cañón-Tapia, E., Walker, G. P., & Herretero-Bervera, E. (1996). The internal structure of lava flows—insights from AMS measurements I: near-vent a'a. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70(1-2), 21-36.
- Canteiro, M., Olea, S., Escolero, O., & Zambrano, L. (2019). Relationships between urban aquifers and preserved areas south of Mexico City. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 373-380.
- Carrillo-Trueba, C. (1995). El Pedregal de San Ángel, *Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City*, 177 p.
- Castellanos-Vargas, I., García Calderón, N. E., & Cano Santana, Z. (2017). Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: atributos para su conservación. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 51-64.
- Cervantes, P. & Molinero, R. (1995). Eventos volcánicos al sur de la Ciudad de México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 74 p.
- 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.
- Cummings, B. (1926). Cuicuilco and the Archaic culture of Mexico. *The Scientific Monthly*, 23(4), 289-304.
- Delgado, 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.
- González, S., Pastrana, A., Siebe, C., & Duller, G. (2000). Timing of the prehistoric eruption of Xitle Volcano and the abandonment of Cuicuilco Pyramid, Southern Basin of Mexico. *Geological Society, London, Special Publications*, 171(1), 205-224.
- Gregg, T. K., Fink, J. H., & Griffiths, R. W. (1998). Formation of multiple fold generations on lava flow surfaces: Influence of strain rate, cooling rate, and lava composition. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 80(3-4), 281-292.
- Guilbaud, M. N., Arana-Salinas, L., Siebe, C., Barba-Pingarrón, L. A., & Ortiz, A. (2015). Volcanic stratigraphy of a high-altitude mammuthus columbi (Tlacotenco, sierra Chichinautzin), central México. *Bulletin of Volcanology*, 77, 1-16.
- Guilbaud, M.-N. & Siebe, C. (2009). The lava flow-field of the ca. 1670 yrs BP Xitle eruption, México: structure and implications for eruption dynamics (abstract). In: Siebe C, Guilbaud M-N, Salinas S (Eds) 250 Aniversario del nacimiento del volcán Jorullo en México: Morelia, Michoacán, Mexico. Impretei, Mexico City, pp 28-29.
- Guilbaud, M. N., Ortega-Larrocea, M. D. P., Cram, S., & van Wyk de Vries, B. (2021). Xitle Volcano Geoheritage, Mexico City: Raising awareness of natural hazards and environmental sustainability in active volcanic areas. *Geoheritage*, 13, 1-27. doi: 10.1007/s12371-020-00525-9.
- Heizer, R. & Bennyhoff, J. A. (1958). Archaeological investigations of Cuicuilco, Valley of Mexico, 1956. *Science* 127, 232-233.
- Hernández-Robles, H. E. (2019). Dinámica de cambio de uso de suelo y coberturas vegetales en el derrame de lava del volcán Xitle, Ciudad de México, 1993-2015. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 56 p.
- Hon, K. E. N., Kauahikaua, J. I. M., Denlinger, R., & Mackay, K. (1994). Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: Observations and measurements of active lava flows on Kilauea Volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, 106(3), 351-370.
- Kelly, J. (1982). *The Complete Visitor's Guide to Mesoamerican Ruins*. University of Oklahoma Press.
- Long, P. E., & Wood, B. J. (1986). Structures, textures, and cooling histories of Columbia River basalt flows. *Geological Society of America Bulletin*, 97(9), 1144-1155.
- Lorenzo-Merino, A., Guilbaud, M. N., & Roberge, J. (2018). The violent Strombolian eruption of 10 ka Pelado shield volcano, Sierra Chichinautzin, Central Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 80, 1-17.
- Lot, A. (2007) *Guía ilustrada de la Cantera Oriente. Caracterización ambiental e inventario biológico*. Coordinación de la Investigación Científica, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, 253 p.
- Lot, A., Pérez Escobedo, M., Gil Alarcón, G., Rodríguez Palacios, S. & Camarena P. (2012). *La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de riesgos*. 30 aniversario 1983-2013. ICyT, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, 52 p.
- Lugo Hubp, J., Inbar, M., Pastrana, A., Flores, A. & Zamorano, J. (2001). Interpretation of the geomorphic setting of the Cuicuilco basin, Mexico City, affected by the pre-Hispanic eruption of the Xitle volcano/Interprétation de l'environnement

- geomorphologique du bassin de Cuicuilco, ville de Mexico, affecté par l'éruption pré-hispanique du volcan Xitle. *Geomorphologie: relief, processus, environnement*, 7(3), 223-232.
- Márquez, A., Verma, S. P., Anguita, F., Oyarzun, R., & Brandle, J. L. (1999). Tectonics and volcanism of Sierra Chichinautzin: extension at the front of the Central Trans-Mexican Volcanic belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 93(1-2), 125-150.
- Martín del Pozzo, A. L. (1982) Monogenetic volcanism in Sierra Chichinautzin, Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 45(1), 9-24.
- Palacio, 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.
- Parsons, J. R. (1989). Arqueología regional en la Cuenca de México: una estrategia para la investigación futura. *Anales de Antropología*, 26, 1.
- Pastrana, A. (2018). La erupción del Xitle y su afección a Cuicuilco. *Arqueología mexicana* 25(151), 46-55.
- Peterson, F.L. (1972). Water development on tropic volcanic islands—Type example: Hawaii a. *Groundwater*, 10(5), 18-23.
- Peterson, D. W., Holcomb, R. T., Tilling, R. I. & Christiansen, R.L. (1994). Development of lava tubes in the light of observations at Mauna Ulu, Kilauea Volcano, Hawaii. *Bulletin of Volcanology*, 56, 343-60.
- Rzedowski, J. (1954). Vegetation of Pedregal de San Angel. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN, Mexico*, 8, 59-129.
- Salas Portugal, A. (2006). Morada de lava. Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, 204 p
- Sanders, W. T., Parsons, J. R. & Santley, R. S. (1979). The Basin of Mexico: Ecological Processes in the Evolution of a Civilization. Academic Press, New York, 561 p
- Schmitter, E. (1953). Investigación petrológica en las lavas del pedregal de San Angel. In *Congreso Científico Mexicano, Memorias* (Vol. 3, pp. 218-237).
- Self, S., Keszthelyi L., Thordarson, T. (1998). The importance of pāhoehoe. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1), 81-110
- SEREPSA (Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica El Pedregal de San Ángel) (2008) Manual de Procedimientos. Programa de Adopción de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Secretaría Ejecutiva REPSA, Coordinación de la Investigación Científica, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, 108 p
- 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. doi: 10.1016/S0377-0273(00)00199-2
- Siebe, C., Arana-Salinas, L., & Abrams, M. (2005). Geology and radiocarbon ages of Tlálco, 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., Mendoza-Hernández, P.E., Juárez-Orozco, S., Vázquez-Selem, L. & Cram-Heydrich, S. (2016). Consecuencias de la actividad volcánica del Xitle y el disturbio antrópico sobre las propiedades del suelo y la diversidad vegetal del Parque Ecológico de la Ciudad de México en el Ajusco medio. En: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SEDEMA). *La biodiversidad en la Ciudad de México*. Conabio/Sedema, Mexico City, 75-91 pp.
- Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P., & Abrams, M. (2004). Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: implications for archaeology and future hazards. *Bulletin of Volcanology*, 66, 203-225.
- Solleiro-Rebolledo, E., Straubinger, M., Terhorst, B., Sedov, S., Ibarra, G., Sánchez-Alaniz, J. I., Marmolejo, E. (2016). Paleosols beneath a lava flow in the southern basin of Mexico: The effect of heat on the paleopedological record. *Catena*, 137, 622-634.
- UNESCO (2007) Nomination of natural, mixed and cultural properties to the world heritage list - Central University City Campus of the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Decision 31 COM 8B.52.
- Waitz, P. & Wittich, E. (1910) Tubos de explosión en el Pedregal de San Ángel. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 7, 169-186.
- Walker, G. P. L. (1991). Structure, and origin by injection of lava under surface crust, of tumuli, "lava rises", "lava-rise pits", and "lava-inflation clefts" in Hawaii. *Bulletin of Volcanology*, 53, 546-558
- Walker, G. P. L. (1993). Basaltic-volcano systems: *Geological Society, London, Special Publications*, 76(1), 3-38
- Walker, G. P. L. (2009) The endogenous growth of pahoehoe lava lobes and morphology of lava-rise edges. En: Thordarson, T. *et al* (Eds.), *Studies in Volcanology: The Legacy of George Walker: Special Publication IAVCEI 2*, 17-32.
- Zambrano, L., Rodríguez Palacios, S., Pérez Escobedo, M., Gil-Alarcón, G., Camarena, P., Lot, A. (2016). La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de Riesgos. 2da edición. Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, 52 p.
- Zambrano, L., Cano-Santana, Z., Wegier, A., Arroyo-Lambaer, D., Zúñiga-Vega, J. J., Suárez, A., *et al* (2019). Evaluating socio-ecological interactions for the management of protected urban green spaces. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 144