

Jessica L. Alvarez García

Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional Autónoma de México

José Luis Arce

Instituto de Geología,
Universidad Nacional Autónoma de México

**María del Carmen E.
Solanes Carraro**

Dirección de Registro Público de Monumentos
y Zonas Arqueológicas e Históricas, INAH

La Tefra Negra: evidencia de una erupción volcánica previa al Xitle en el sitio arqueológico de Copilco

Resumen: Copilco, como otros asentamientos arqueológicos ubicados al suroeste de la Cuenca de México, experimentó varios fenómenos vulcanológicos que afectaron su desarrollo y terminaron por sepultar sus vestigios. El estudio de uno de estos eventos se llevó a cabo a partir de la identificación de una capa denominada Tefra Negra, la cual impactó indudablemente a la población del sitio, previo a la erupción del volcán Xitle, aportando con ello nuevos datos para los futuros estudios arqueológicos referentes a las repercusiones que pudo haber tenido la expulsión de esta tefra en Copilco y Cuicuilco, así como en otras aldeas al suroeste de la Cuenca de México.

Palabras clave: Tefra Negra, estratigrafía, Copilco, Xitle, lava.

Abstract: Copilco, like other archaeological settlements located in the southwest of the Basin of Mexico, experienced several volcanic phenomena that affected its development and ended up burying its vestiges. The study of one of these events was carried out through the identification of a layer called Black Tephra, which must have had an impact on the population of Copilco, before the volcanic eruption of Xitle, providing new data for future archaeological studies on the impact that the expulsion of tephra might have had on Copilco and Cuicuilco, and other prehispanic settlements in the southwest of the Basin of Mexico.

Keywords: Black Tephra, stratigraphy, Copilco, Xitle, lava.

Copilco, como otros asentamientos arqueológicos ubicados al suroeste de la Cuenca de México, experimentó varios fenómenos vulcanológicos que afectaron su desarrollo y terminaron por sepultar sus vestigios.

El estudio de uno de estos eventos, ocurrido antes de la erupción del Xitle, se llevó a cabo a partir de la identificación de una capa de ceniza volcánica denominada en este trabajo *Tefra Negra*, en los sitios arqueológicos de Copilco, Cuicuilco, así como en las inmediaciones de Ciudad Universitaria y del centro comercial Oasis Coyoacán; esa capa impactó indudablemente a la población del sitio Copilco y su análisis aporta nuevos datos para futuros estudios arqueológicos referentes a la influencia que dicha erupción pudo haber ejercido en Cuicuilco y diversos asentamientos al suroeste de la Cuenca de México al inicio de nuestra era.

Aun cuando el estudio e identificación de la Tefra Negra se llevó a cabo a partir de muestreos en diferentes asentamientos prehispánicos, las conclusiones

preliminares de este trabajo sólo se enfocan al sitio Copilco.

México es un país volcánicamente activo, en especial la parte central del territorio nacional, cuyos testimonios sobre fenómenos naturales se remontan a tiempos prehispánicos. En algunos códices se relata que los pobladores coexistieron con los volcanes, e incluso, les rindieron culto como elementos de su cosmovisión.

Copilco es ejemplo de un asentamiento del Preclásico medio —periodo que va del 800 al 200 a. C. (Niederberger, 1976)— que experimentó varias erupciones volcánicas que sepultaron sus vestigios. Este sitio se localiza en lo que se conocía como Cantera de Copilco (Gamio, 1920), en la actual calle de Victoria 110, colonia Copilco el Bajo, Coyoacán, Ciudad de México. Geológicamente se ubica dentro de la Cuenca de México y colinda con la sierra de las Cruces al oeste, la sierra Nevada al este y con el campo volcánico sierra de Chichinautzin al sur, ambas dentro de la provincia geológica Faja Volcánica Transmexicana (FVT) (figura 1).

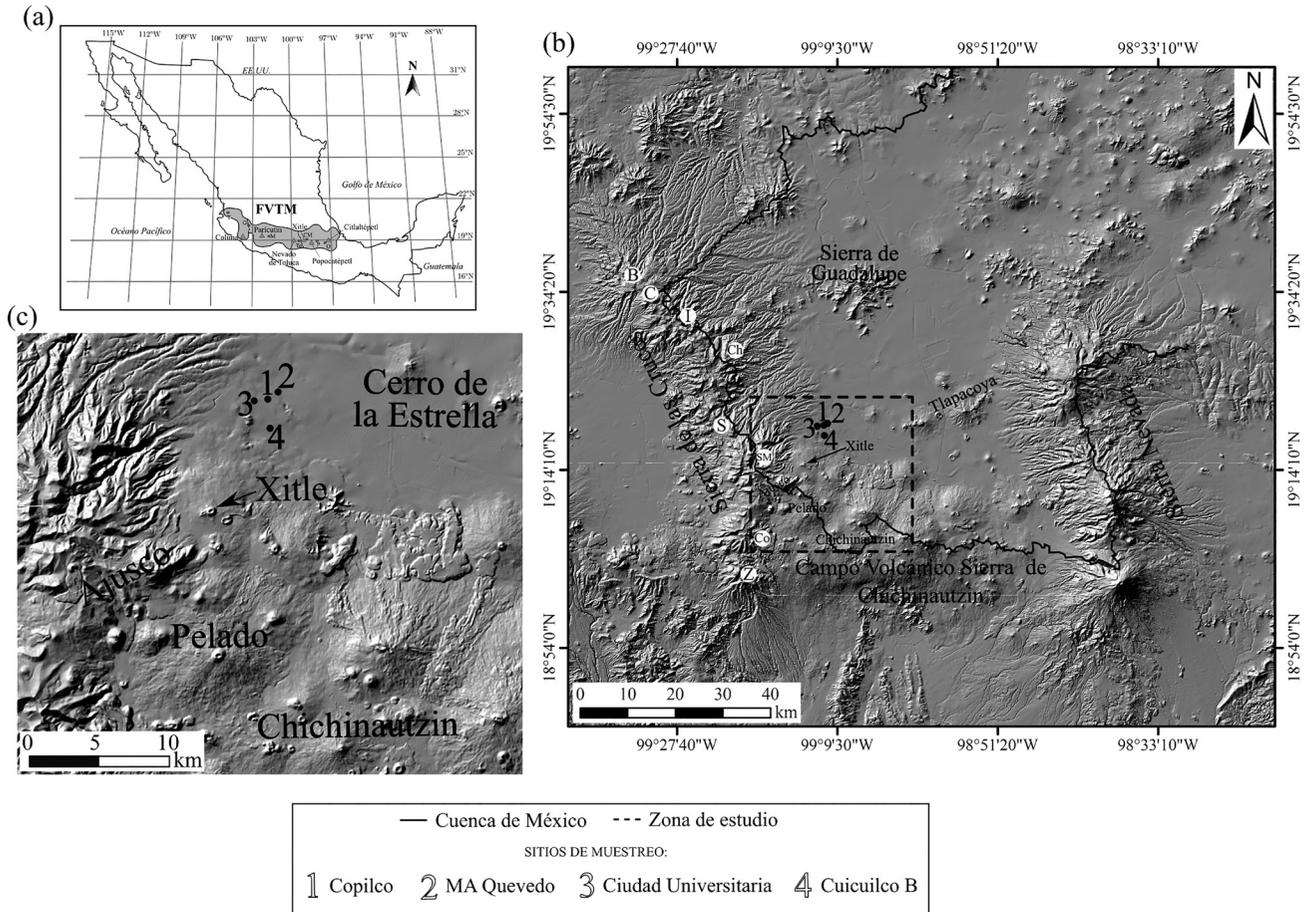


Fig. 1 Localización de la zona de estudio: (a) La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) se localiza en la parte central de la República Mexicana. Se marca su extensión en color gris (modificado de Macías, 2005). (b) Modelo sombreado de elevación con la ubicación de los sitios de estudio en la Cuenca de México. Como referencia se nombran las cadenas montañosas que la delimitan, así como algunos volcanes: al oeste la sierra de las Cruces (B: La Bufa, C: La Catedral, I: Iturbide, Ch: Chimalpa, S: Salazar, SM: San Miguel, Co: La Corona, Z: Zempoala); al norte la sierra de Guadalupe; al este la sierra Nevada; y al sur el campo volcánico sierra de Chichinautzin. La ubicación de los volcanes de la sierra de las Cruces fue tomada de García Palomo *et al.*, 2008. (c) Acercamiento de la zona de estudio.

De acuerdo con García Palomo *et al.* (2008), la sierra de las Cruces constituye el límite occidental entre las cuencas de México y de Toluca, una cordillera volcánica de 110 km de longitud con una orientación general NNO-SSE, conformada por al menos ocho estratovolcanes traslapados (de norte a sur: La Catedral, La Bufa, Iturbide, Chimalpa, Salazar, San Miguel, La Corona y Zempoala) y algunos de menor dimensión (Ajusco), que se caracterizan por derrames de lava, extrusión de domos y emplazamiento de flujos piroclásticos, depósitos de avalanchas de escombros, avalanchas de detritos y depósitos de lahar (García Palomo, 2002; García Palomo *et al.*, 2008; Mora Álvarez *et al.*, 1991). Cabe señalar que la actividad volcánica de la sierra de las Cruces abarca desde el Plioceno tardío hasta el Pleistoceno (Arce *et al.*, 2008; Mooser *et al.*, 1974; Mora Álvarez *et al.*, 1991; Osete *et al.*, 2000; Romero Terán, 2001).

Por otro lado, el campo volcánico sierra de Chichinautzin cuenta con más de doscientos volcanes monogenéticos (Siebe *et al.*, 2005) de composición basáltica a dacítica (Gunn y Mooser, 1970; Swinamer, 1989; Wallace y Carmichael, 1999) que se extiende entre los flancos del Nevado de Toluca (Macías *et al.*, 1997) y del Popocatepetl (Siebe *et al.*, 1996), formando una sierra elongada con dirección E-O que marca el límite sur de la Cuenca de México (Bloomfield, 1975; Herrero y Pal, 1978, y Márquez *et al.*, 1999) y abarca una porción de los estados de Morelos y México, así como de la Ciudad de México (Márquez *et al.*, 1999). Estudios recientes sobre cronología usando el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ han demostrado que los productos más antiguos del campo volcánico tienen 1.2 millones de años, mientras que las estructuras más jóvenes alcanzan 800, 200 y 80 000 años (Arce *et al.*, 2013). De hecho, el volcán más joven del campo volcánico sierra de Chichinautzin es el

Xitle, con una edad de 1 670 años antes del presente (a. p.) (Siebe, 2000).

En el sitio arqueológico de Copilco, ubicado aproximadamente a 11 km al noreste del cráter del volcán Xitle, se observa una estratigrafía conformada por material volcánico y epiclástico proveniente, por su cercanía, tanto de la sierra de las Cruces como del campo volcánico sierra de Chichinautzin, los productos están representados por depósitos de flujo de escombros y una tefra de color negro (Tefra Negra), cubierta por un depósito de caída de ceniza parcial-

mente retrabajada, de color gris y con desarrollo de material limoso y arcilloso (Ibarra Arzave, 2015), y por productos de la erupción del Xitle (cenizas y lavas). La presencia de material epiclástico (capa III, figuras 2b y 2c) depositado entre la Tefra Negra y los productos del Xitle sugiere que estos dos depósitos volcánicos fueron producidos por dos erupciones distintas, separadas por un lapso de tiempo suficientemente largo para permitir el desarrollo de una fracción fina (limos y arcillas) y el posible inicio de pedogénesis del material original.

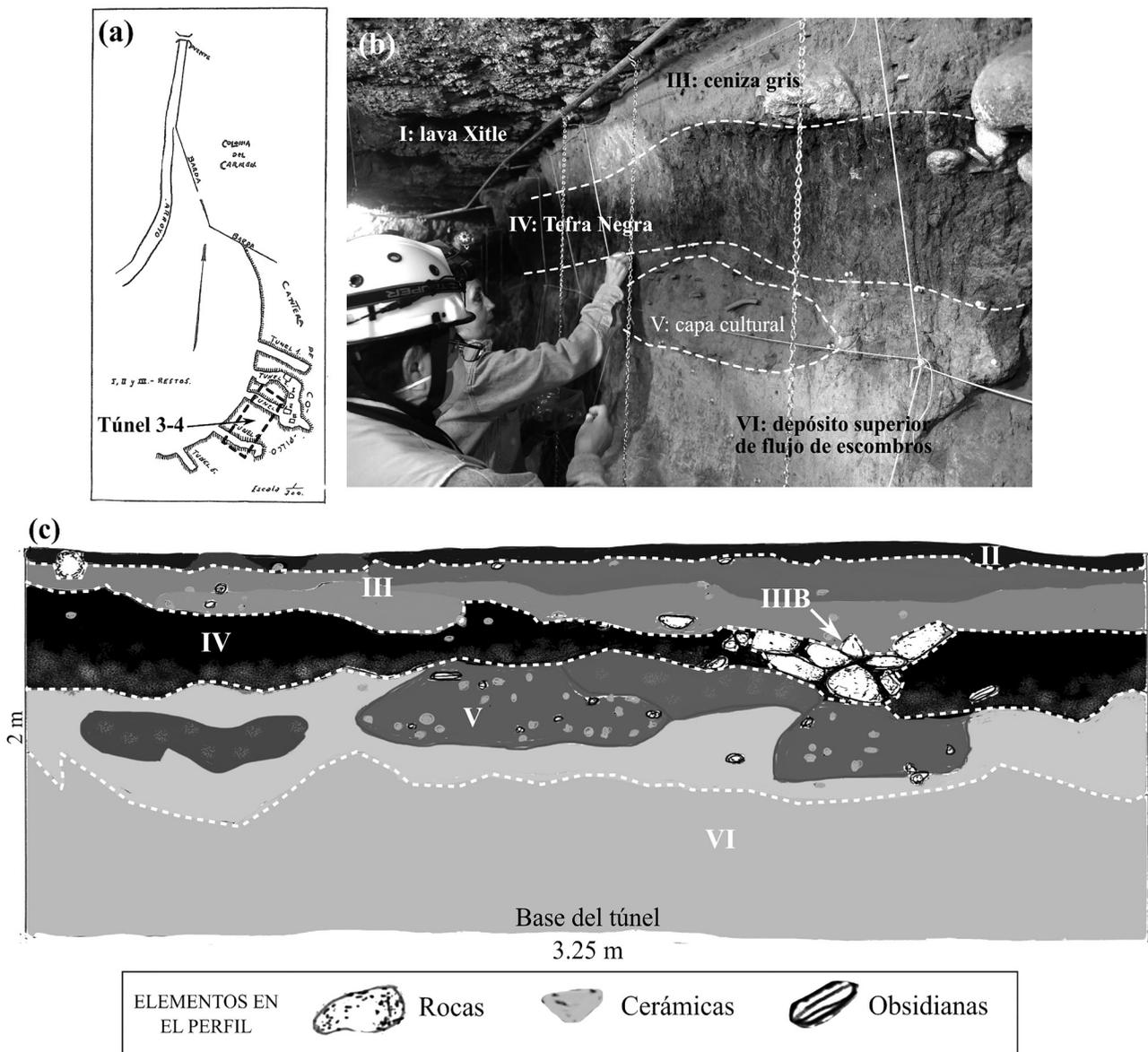


Fig. 2 (a) Plano de los túneles practicados en la Cantera de Copilco en 1917 (modificado de Gamio, 1920); se indica con una flecha el túnel 3-4. (b) Fotografía del perfil 8 en el túnel 3-4, donde se muestran algunas de las capas identificadas en la estratigrafía del sitio arqueológico de Copilco (véase la figura 4); nótese la abundancia de fragmentos de cerámica en la capa V. (c) Sección completa del túnel 3-4, perfil 8 (modificado de Sánchez Alaniz *et al.*, 2014).

En el presente trabajo se llevó a cabo un estudio detallado de la Tefra Negra,¹ en el cual se hicieron descripciones de afloramientos de varios sitios de la parte sur de la Cuenca de México, análisis de laboratorio y fechamientos de radiocarbono, para determinar la edad y la posible fuente de emisión de la Tefra negra, así como el impacto que tuvo en la población de Copilco. Cabe señalar que en trabajos previos sobre este sitio arqueológico sólo se habían considerado los depósitos correspondientes al evento eruptivo del volcán Xitle, sin hacer referencia a la erupción que depositó a la Tefra Negra, y mucho menos la posible afectación que provocó en la población y en la permanencia de ésta en el sitio.

Estratigrafía de los sitios de estudio

Se efectuaron varios estudios en los sitios Copilco y Cuiquilco, así como en otro sitio ubicado en la avenida Miguel Ángel de Quevedo (centro comercial Oasis Coyoacán), con la finalidad de describir detalladamente los afloramientos y el muestreo para distintos tipos de análisis, enfocándose siempre en el depósito de la Tefra Negra.

Para la descripción de cada depósito en campo se consideraron color, estructura, espesor y constituyentes de cada depósito, además de los cambios laterales y verticales. Estas características permitieron hacer la correlación de algunos materiales volcánicos y con ello se elaboraron dos columnas estratigráficas: una para el sitio Copilco y otra para M. A. Quevedo (figuras 3b y 3c respectivamente). A continuación se presenta la estratigrafía para cada sitio descrito.

Estratigrafía e interpretación cultural de un perfil en el sitio Copilco

Desde su descubrimiento y exploración en 1917 Copilco mostró, a través de su estratigrafía, tanto evidencia de su historia arqueológica como valiosa información de eventos vulcanológicos que habían afectado la parte suroeste de la Cuenca de México, los cuales influyeron considerablemente en la historia ocupacional de los habitantes de esta región.

Es así que, desde el inicio de las excavaciones, el arqueólogo Manuel Gamio conformó un equipo interdisciplinario para la investigación de este asentamiento. En el informe de Alfonso Toro en 1918 se menciona que: “Desde el inicio de las excavaciones en 1917 se notaron perfectamente marcadas en el terreno la presencia de 3 capas” (figura 3a). Las que Mariano Bárcena describe como:

Una roja de consistencia de ladrillo, otra negra como de tierra carbonizada y la última de consistencia tepetatosa.

En resumen, esta formación fluvial en que reposa la lava, está dispuesta del modo siguiente, comenzando por la parte superior: 1) capa de 0.02 de espesor, conteniendo partículas vitrificadas, tallos incinerados y restos de trastos antiguos; 2) banco arcilloso, conteniendo fragmentos feldespáticos, hornbléndicos, partículas carbonosas, fragmentos de traquita y restos de trastos, su espesor es de 0.20, y 3) arcilla arenosa, con elementos análogos al anterior: su espesor es desconocido y forma la base del terreno aluvial (Toro, 1918).

Con estas descripciones se esboza una idea de las primeras interpretaciones sobre los eventos vulcanológicos y la estratigrafía del sitio. Esas apreciaciones en su momento ayudaron a Gamio a corroborar la existencia de ocupación humana bajo la lava del Xitle y a fechar con mayor exactitud este asentamiento. Sin embargo, el avance de la ciencia, así como el de las nuevas técnicas de fechamientos radiométricos, hicieron necesaria la reexploración del sitio, lo que conllevó una reinterpretación de la cultura y de su relación con los eventos vulcanológicos de la época.

En concreto, la descripción estratigráfica del sitio de Copilco se basó en el denominado perfil 8 en el túnel 3-4 del sitio (figura 2) que mostró dentro del asentamiento una de las estratigrafías más complejas.

En el perfil señalado se observa, de la base a la cima (figura 3b), (c) un depósito de material limo-arcilloso de 1.5 m de espesor, de color café claro, endurecido, en ocasiones con fragmentos redondeados de roca de tamaño lapilli (2 a 64 mm) a bloques (>64 mm). Debido a estas características se clasificó como un depósito de flujo de escombros (Vallance e Iverson, 2015), aunque aparentemente modificado o alterado por la actividad humana. Fue en este horizonte donde se encontraron los enterramientos en fosas circulares a inicios de la excavación a cargo de Manuel Gamio. Enseguida está sobrepuesta una capa de arena fina de color café claro; se trata de una capa cultural asociada al área de entierros y a la aparición de elementos arquitectónicos; (d) depósito de color gris oscuro a negro, de aproximadamente 35 cm de espesor, constituido por fragmentos volcánicos de tamaño ceniza gruesa a fina (<2 mm); se caracteriza por contener múltiples elementos de influencia antropogénica, entre ellos fragmentos de cerámica y de obsidiana, así como trozos de carbón; corresponde al depósito denominado Tefra Negra y se clasificó como un depósito de caída de ceniza (Houghton y Carey, 2015); (e) depósito de color gris claro, de 15 cm de espesor, constituido por fragmentos volcánicos de tamaño ceniza gruesa a fina, con contenido de fracción arcillosa (Ibarra Arzave, 2015), clasificándose por ello como material volcánico re TRABAJADO; (f) depósito de 2.5 cm de espesor, de color gris oscuro, constituido por material volcánico de ceniza gruesa a

1 Véase el apartado “Tefra Negra” más adelante en este mismo artículo.

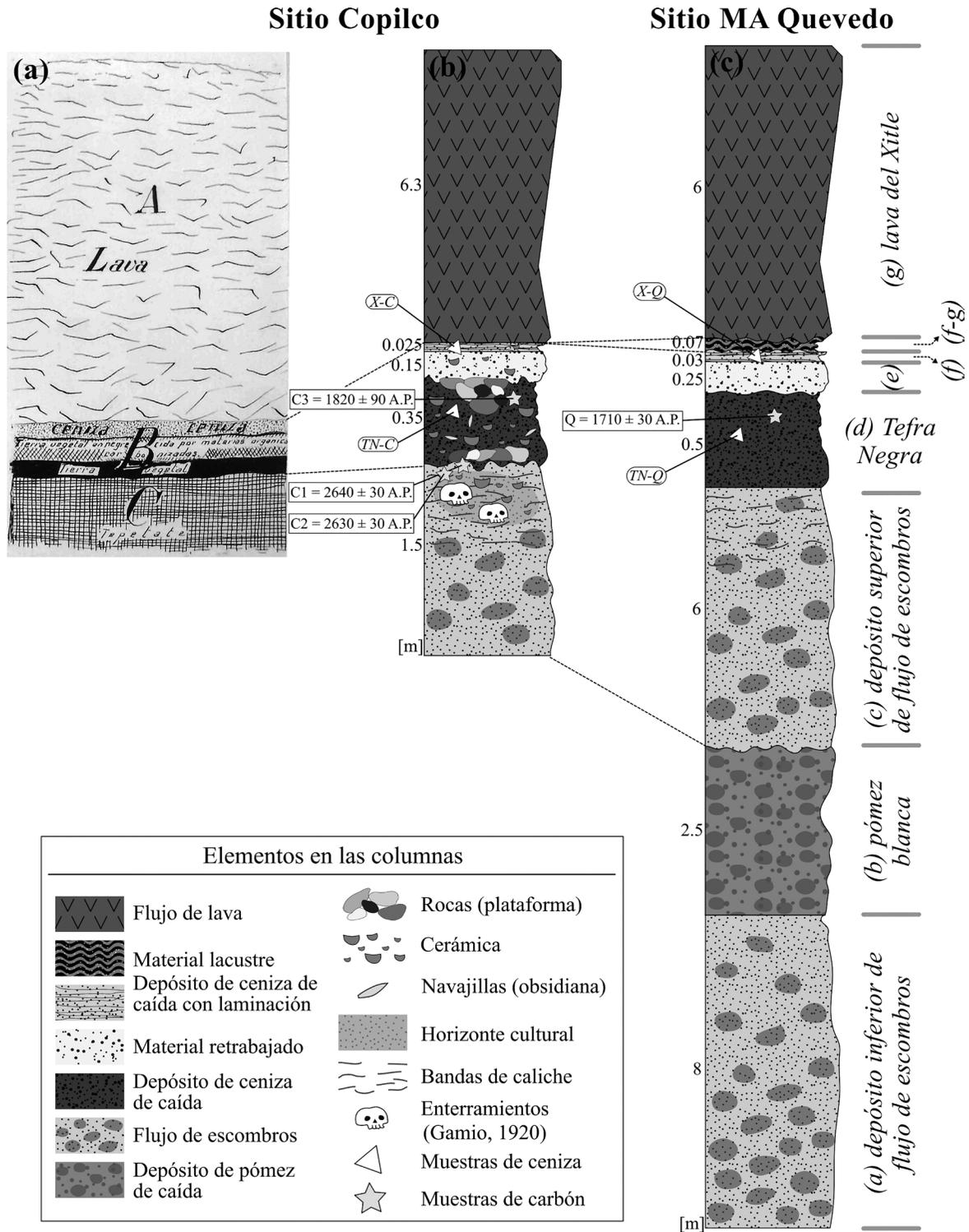


Fig. 3 Columnas estratigráficas de los sitios Copilco y M.A. Quevedo. (a) Corte transversal de la Cantera de Copilco en el Pedregal de San Ángel, en el sitio Copilco; los depósitos son descritos como sigue: A: capa de lava volcánica; B: terrenos sedimentarios de estructura blanda donde aparecen vestigios y basamentos; C: terreno inferior de estructura compacta en el que fueron excavados los sepulcros cilíndricos y ya no aparecen vestigios (imagen modificada de Toro, 1918). (b) Columna estratigráfica general para el sitio Copilco (TN-C, X-C: muestras de ceniza de La Tefra Negra del Xitle, respectivamente; C1, C2, C3: muestras de carbón recolectadas en el sitio Copilco). (c) Columna estratigráfica en el sitio M.A. Quevedo (TN-Q, X-Q: muestras de ceniza de Tefra Negra y del Xitle, respectivamente; Q: muestra de carbón recolectada en el sitio M.A. Quevedo). Las columnas no están a escala (tomada de Alvarez García, 2018).

fina, laminado, deleznable y soportado grano a grano; se trata de un depósito de caída relacionado con la erupción del Xitle (Delgado *et al.*, 1998; Siebe, 2000), y (g) lavas de color gris oscuro, masivas, de aproximadamente 6 m de espesor con abundantes vesículas en la parte inferior y superior; esta lava ha sido descrita en varios trabajos previos y ha sido asociada a la erupción del Xitle (Delgado *et al.*, 1998; Siebe, 2000).

Adicional a la descripción geológica, se hizo un análisis arqueológico del perfil. En éste, las distintas capas se trabajaron aislando cualquier cambio en tonalidad (figura 2c) y diferenciación en su textura y composición, además de la distinción de elementos culturales. Aun cuando geológicamente se identificaron cinco capas (c-tepetate, d-Tefra Negra, e-ceniza gris, f-ceniza Xitle y g-lava Xitle), culturalmente se definieron seis, con sus variantes intermedias (figuras 2b y 2c). La figura 4 describe brevemente las características de estas capas culturales y su correlación con las capas geológicas.

Estratigrafía del sitio M. A. Quevedo

Este sitio se localiza en el predio que ocupaba la fábrica de Avón y donde en el presente se asienta el centro comercial Oasis Coyoacán, entre las avenidas Miguel Ángel de Quevedo y Universidad, en la Alcaldía de Coyoacán. Debido a los requerimientos solicitados para la construcción de esa instalación, los arqueólogos Miguel Medina y Efraín Flores practicaron sondeos de salvamento arqueológico que les permitió hacerse de muestras para realizar un estudio comparativo y formarse una visión más amplia de la parte inferior de la columna estratigráfica del sitio. De este modo, en la columna estratigráfica de MA Quevedo se observó, de la base a la cima (figura 3c): (a) un horizonte masivo de color café

Capa	Características	Correlación geológica
I	Lava con un espesor de aprox. 6.30 m	(g) Lava Xitle
II	Ceniza gris oscuro muy fina, con un espesor de 2-3 cm	(f) Ceniza Xitle
III	Ceniza gris claro o con tonalidades rojizas de 5-10 cm de espesor	(e) Ceniza gris
IIIB	Capa de color amarillento, posible apisonado de 5-7 cm	(e-d) Contacto ceniza gris-Tefra Negra: capa cultural
IV	Tefra Negra de 35-40 cm de espesor. Contiene la mayor evidencia de actividad cultural	(d) Tefra Negra
V	Capa de arena fina de color café, intrusiva o de relleno, de 30-45 cm, asociada a entierros	(c) Depósito superior de flujo de escombros: capa cultural
VI	Tepetate	(c) Depósito superior de flujo de escombros

Fig. 4. Capas culturales y su correlación estratigráfica con los depósitos geológicos.

claro, endurecido, de alrededor de 8 m de espesor y constituido por material limo-arcilloso; la base está enriquecida en fragmentos de lava redondeados (cantos rodados) inmersos en una matriz de ceniza media; por estas características se clasificó como un depósito de flujo de escombros (Vallance e Iverson, 2015); (b) horizonte masivo de color blanco a gris claro, de 2.5 m de espesor constante, constituido por fragmentos de pómez vesicular de tamaño lapilli y algunos bloques; los fragmentos de pómez tienen formas subangulares y están soportados grano a grano; esta unidad se clasificó como un depósito de caída de pómez pliniana y corresponde a la Pómez Bosque de Tlalpan identificada y fechada entre 27 000 y 35 000 años a. p., por Arce *et al.* (2017), asociando su procedencia a los volcanes San Miguel o Ajusco, ambos en la sierra de las Cruces; (c) depósito de material limo-arcilloso de 6 m de espesor, de color café claro y endurecido; este depósito, correlacionado con la capa más profunda en el perfil 8 de Copilco, no presenta indicios de alteración humana; (d) depósito de color gris oscuro a negro, de 50 cm de espesor constante, constituido por fragmentos volcánicos de ceniza gruesa a media, correlacionado a la Tefra Negra del sitio Copilco; a diferencia de Copilco, este horizonte no contiene indicios de algún tipo de alteración antropogénica; (e) depósito de material limo-arenoso, de color gris claro, de 15 cm de espesor; (f) depósito laminado de color gris, constituido por material volcánico de tamaño ceniza gruesa a fina, de 3 cm de espesor; presenta las mismas características que en el perfil de Copilco y se relaciona con la erupción del Xitle; (f-g) depósito de color café, de cerca de 7 cm de espesor, constituido por material limo-arcilloso, con laminaciones en forma sinuosa; el depósito no es continuo en todo el afloramiento y debido a que en la zona existieron cuerpos de agua asociados al sistema lacustre mayor del lago de Texcoco (Bradbury, 1971, 1989), se concluyó que este material son sedimentos lacustres que pudieron ser deformados por el emplazamiento de las lavas del Xitle, y (g) lavas de color gris oscuro, masivas, de aproximadamente 6 m de espesor con abundantes vesículas en la parte superior e inferior; esta unidad consta de un solo flujo de lava asociado a la erupción del volcán Xitle (Delgado *et al.*, 1998; Siebe, 2000).

Petrografía y geoquímica de roca total

Adicional a los dos sitios de estudio, para el proceso de muestreo también se visitó el sitio arqueológico Cuicuilco, a cargo del arqueólogo Felipe Ramírez, quien nos permitió la recolección de dos muestras de ceniza del Xitle. La figura 5 presenta en detalle todas las muestras de este estudio y el tipo de análisis hechos a cada una de ellas.

Tipo de muestra	Clave	Lugar de muestreo	Análisis realizado
Ceniza	TN-Copilco	Copilco	Pt, ME, GRT*
	Xitle-Copilco		Pt, ME
	TN-CU	Cd. Universitaria	GRT*
	Xitle-Cuicuilco1	Cuicuilco B	GRT
	Xitle-Cuicuilco2		GRT**
	TN-Quevedo	M.A. Quevedo	Pt, ME, GRT
	Xitle-Quevedo		GRT
	¹⁴ C		
Carbón	Carb-Quevedo	Copilco	¹⁴ C
	Carb-Copilco 1		
	Carb-Copilco 2		
	Carb-Copilco 3		

Fig. 5. Muestras colectadas para este trabajo.

* Únicamente se analizaron elementos mayores.

** Sólo se analizaron elementos traza

Nota: Las abreviaciones significan TN: Tefra Negra; Carb: carbón. Respecto a los análisis realizados Pt: petrografía; ME: microsonda electrónica; GRT: geoquímica de roca total; ¹⁴C: fechamiento por radiocarbono.

Métodos de laboratorio

Las muestras de ceniza recolectadas en los distintos afloramientos fueron utilizadas para practicar análisis de petrografía, química de minerales y geoquímica de roca total. Las muestras de carbón fueron enviadas al laboratorio para realizar fechamientos radiométricos usando el método de radiocarbono o carbono 14.

Para el análisis petrográfico se elaboraron tres láminas delgadas, dos de Tefra Negra, llamadas TN-Copilco y TN-Quevedo, tomadas en los sitios Copilco y M. A. Quevedo, respectivamente, y una de la ceniza del Xitle, denominada Xitle-Copilco, procedente del sitio Copilco (figura 5). La descripción petrográfica se llevó a cabo usando un microscopio Olympus BX51, considerando las características texturales de cada muestra.

Después de la descripción petrográfica, las láminas delgadas se cubrieron con polvo de grafito en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria (USAII) de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de México (UNAM), con el apoyo del ingeniero Iván Puente Lee, para conocer la composición química mineral usando la microsonda electrónica como método analítico (Melgarejo *et al.*, 2010).

Los análisis de las secciones pulidas se hicieron en el Laboratorio Universitario de Petrología (LUP) del Instituto de Geofísica y en el Laboratorio de Microanálisis del Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, ambos de la UNAM. Se utilizaron equipos JEOL modelo JXA-8900R y JEOL modelo JXA-8230. Una vez obtenidos los resultados se graficaron empleando el programa

Minpet 2.0, un sistema de procesamiento de datos mineralógicos y petrológicos usado para la clasificación de fases minerales.

Los análisis de geoquímica de roca total se llevaron a cabo a partir de una muestra de ceniza pulverizada, previamente limpiada. Para esta tarea se recurrió a dos métodos: primero, el de fluorescencia de rayos X (FRX) para determinar elementos mayores, en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía de la UNAM, con un espectrómetro secuencial de rayos X Rigaku ZSX Primus II, siguiendo los detalles descritos en Lozano Santacruz *et al.* (1995); y segundo, el método de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, por sus siglas en inglés) para determinar elementos traza y tierras raras, en el Laboratorio Ultralimpio del Centro de Geociencias y en el Laboratorio de Química Ultra Pura del Instituto de Geología, también de la UNAM. Las muestras que se analizaron por estos métodos fueron: TN Copilco, TN-Quevedo, TN-CU, Xitle-Quevedo, Xitle-Cuicuilco1 y Xitle-Cuicuilco2 (figura 5); los detalles del procedimiento pueden consultarse en Mori *et al.* (2007).

En cuanto a los fechamientos de radiocarbono, las muestras de carbón recolectadas fueron secadas en un horno a una temperatura de aproximadamente 30°C durante 24 horas. Posteriormente fueron empaçadas en bolsas de plástico y enviadas para su fechamiento en laboratorio.

Tefra Negra

El análisis petrográfico demostró que la Tefra Negra es una ceniza conformada por cristales de plagioclasa, anfíbol, clino y ortopiroxeno, subredondeados y anhedral. Contiene también fragmentos densos de lava con microlitos de plagioclasa y alteración sericítica, vidrio y óxidos de hierro-titanio (figura 6).

La plagioclasa es la fracción más abundante (70% del volumen de cristales) y se encuentra como fenocristal subhedral a anhedral, aislado o como glomero-cristal. Algunos cristales presentan zoneamiento mientras que en otros se observa maclado polisintético. Su tamaño es en promedio de 0.1 milímetros.

De acuerdo con los análisis de la microsonda electrónica, la composición de la plagioclasa en la muestra TN-Copilco varía de anortita An₃₀ a An₅₅, mientras que la composición de la muestra TN-Quevedo va de An₃₅ y An₅₃, clasificándose como andesina (figura 7a).

El anfíbol (18% en promedio del volumen de cristales) se encuentra como feno- y microfenocristales subhedrales a anhedral, algunos con golfos de corrosión o con macla tipo Carlsbad, aunque la mayoría se encuentra inmerso en vidrio de forma aislada (figura 6). Según los análisis con la microsonda electrónica y tomando en cuenta la nomenclatura propuesta por

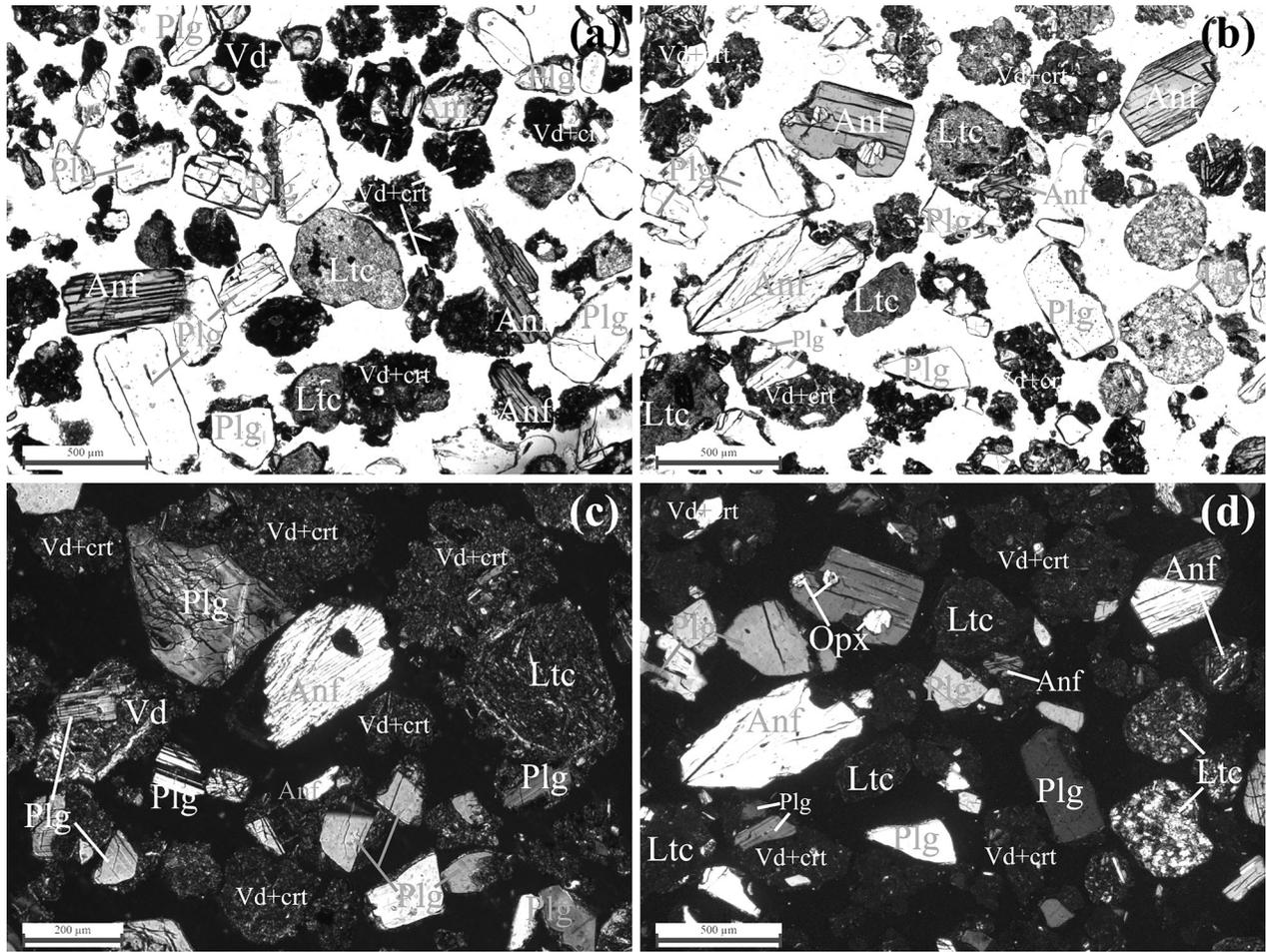


Fig. 6 Fotomicrografías de Tefra Negra en el sitio Copilco en luz paralela (PL) y luz polarizada (PX). (a-b) Se aprecia la forma anhedral y el gran tamaño de los constituyentes, especialmente los cristales de plagioclasa y de anfíbol (PL); (c) en el centro de la fotomicrografía se observa un fenocristal de anfíbol con golfos de corrosión; nótese el maclado polisintético en algunos cristales de plagioclasa (PX), y (d) fotomicrografía de (b) en luz polarizada donde se distinguen los fragmentos líticos constituidos por microlitos de plagioclasa; destaca un fenocristal de anfíbol euhedral con macla tipo Carlsbad (esquina superior derecha) y se señalan tres microfeno-cristales de ortopiroxeno dentro de un fenocristal de anfíbol. Anf: anfíbol; Ltc: fragmentos líticos; Opx: ortopiroxeno; Plg: plagioclasa; Vd: vidrio, y Vd+crt: vidrio y cristales, generalmente microlitos de plagioclasa (tomada de Álvarez García, 2018).

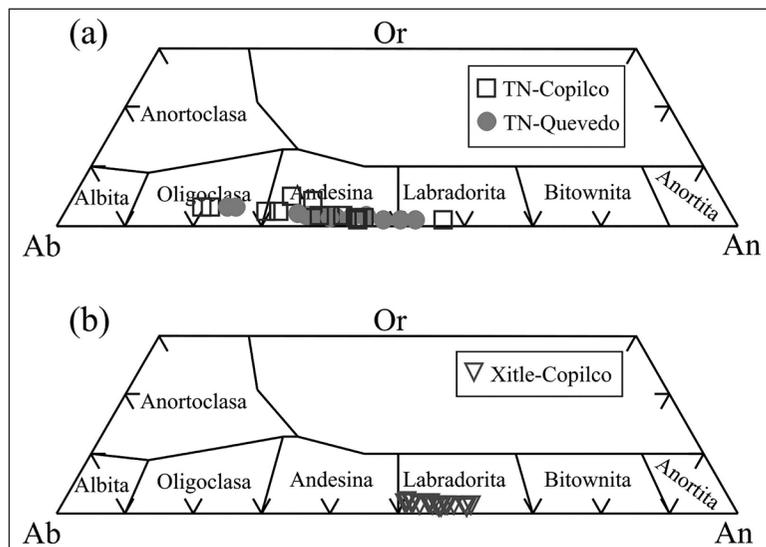


Fig. 7 Diagrama de clasificación química para las plagioclasas de acuerdo a Deer y Zussman (1992). (a) Tefra Negra de los sitios Copilco y M.A. Quevedo. (b) Ceniza del Xitle del sitio Copilco. En general, las plagioclasas de Tefra Negra tienen una composición más sódica, y aunque el espectro composicional es amplio, se clasifican principalmente como andesina. Por otro lado, las plagioclasas del Xitle son ricas en calcio y caen exclusivamente en el campo de la labradorita. Ab: albita, Or: ortoclasa y An: anortita.

Leake *et al.* (1997), el anfíbol está presente como edenita, pargasita y ferropargasita tanto en la muestra de Copilco como en la de M.A. Quevedo (figura 8a).

Los piroxenos (13% en promedio del volumen de cristales) están presentes como feno- y microfenocristales anhedrales a subhedrales, principalmente de forma aislada. En general, su tamaño es menor al de los anfíboles. La composición química de los ortopiroxenos varía de En_{55} a En_{77} (enstatita), mientras que en los clinopiroxenos se observa una composición promedio de wollastonita-enstatita-ferrosilita (Wo_{36} - En_{47} - Fs_{20}), que corresponde a la augita (figura 9a).

Ceniza del Xitle

La muestra descrita fue tomada en el sitio Copilco y en el análisis macroscópico de la ceniza se reconocieron dos fracciones: una gruesa, que comprende fragmentos de roca de 2 a 5 mm de diámetro, mesocráticos, subredondeados y de textura porfídica; y una fracción fina de menos de 1 mm de diámetro que se compone de cristales de plagioclasa, anfíbol, piroxeno y olivino, así como fragmentos de vidrio.

La plagioclasa, que constituye la fracción más abundante (80% del volumen total de cristales), se presenta como microfenocristales euhedrales a subhedrales embebidos en una matriz de vidrio (figura 10). También se

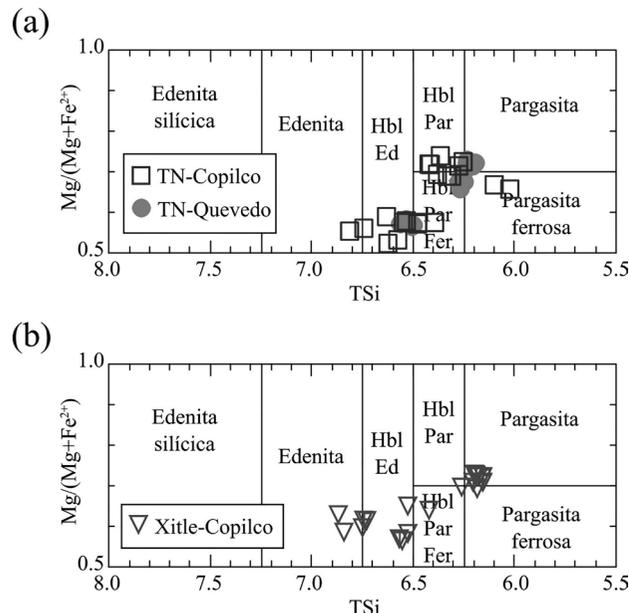


Fig. 8 Diagrama de clasificación química para los anfíboles de acuerdo a Leake (1978). (a) Tefra Negra de los sitios Copilco y M.A. Quevedo; el anfíbol se encuentra presente como edenita, pargasita y en menor medida ferropargasita. (b) Ceniza del Xitle del sitio Copilco; las especies minerales corresponden a los campos de la edenita y la pargasita. Hbl Ed: hornblenda edenítica; Hbl Par: hornblenda pargasítica, y Hbl Par Fer: hornblenda pargasítica ferrosa.

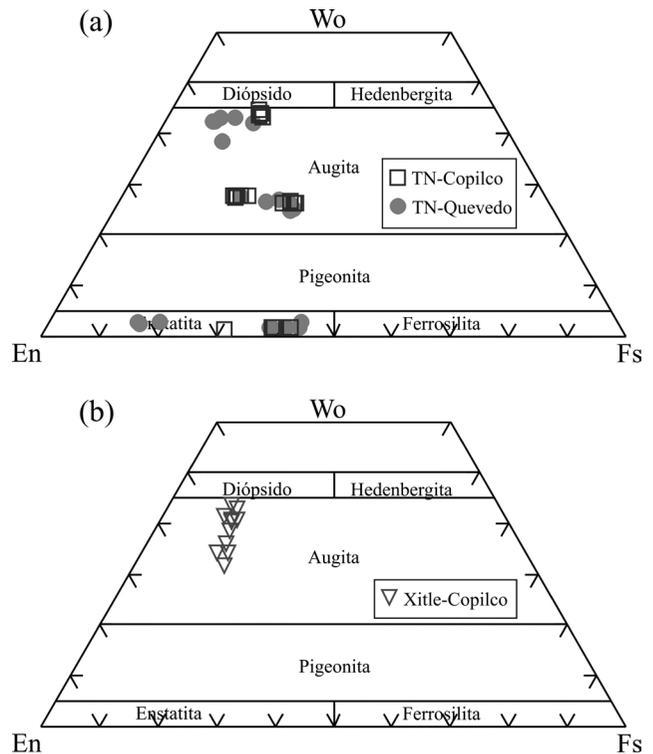


Fig. 9 Diagrama de clasificación química para los piroxenos de acuerdo con Morimoto (1989). (a) Tefra Negra de los sitios Copilco y M.A. Quevedo; los ortopiroxenos presentan una composición rica en magnesio y caen en el campo de la enstatita, mientras que los clinopiroxenos corresponden con la especie mineral de la augita. (b) Ceniza del Xitle del sitio Copilco, la cual contiene sólo clinopiroxenos, cuya composición cae en el campo de la augita. Wo: wollastonita; En: enstatita, y Fs: ferrosilita.

observa maclado polisintético y, en menor abundancia, de tipo Carlsbad; algunos cristales muestran zonamiento. Se le encuentra en forma aislada, asociada a olivino o como glomero-cristales, los cuales constan de microfenocristales de plagioclasa en una matriz de microlitos, posiblemente también de plagioclasa (figura 10c).

La composición química de las plagioclasas varía de anortita An_{50} a An_{60} (figura 5c), correspondiente con la labradorita; es decir, más cálcicas que los cristales de plagioclasa de la Tefra Negra.

El olivino (8% del volumen de cristales) está presente como cristales anhedrales que pueden encontrarse asociados con plagioclasas o aislados, en ambos casos siempre rodeados de vidrio (figura 10a). Es un cristal distintivo de la ceniza del Xitle y su composición química varía de forsterita Fo_{85} a Fo_{70} (figura 11).

El anfíbol (8% del volumen de cristales) se encuentra como feno- y microfenocristales subhedrales a euhedrales con golfos de corrosión. Pueden presentar macla tipo Carlsbad y algunos se encuentran inmersos en una

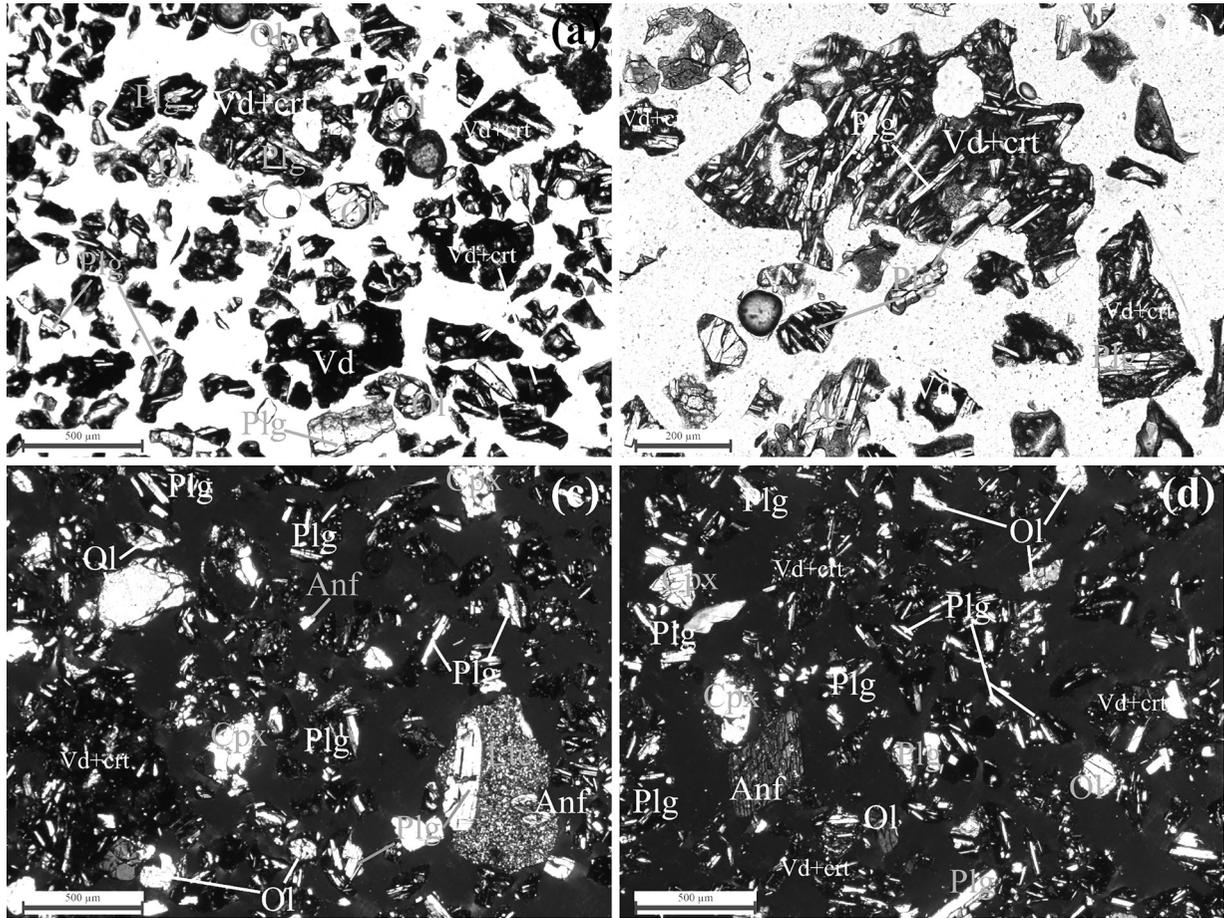


Fig. 10 Fotomicrografías de la ceniza del Xitle en el sitio Copilco en luz paralela (PL) y luz polarizada (PX). (a) Fenocristales de plagioclasa y olivino en una matriz vítrea (PL). (b) A diferencia de la Tefra Negra, las plagioclasas de la ceniza del Xitle tienen formas euédrales y son de menor tamaño (PL). (c) En la esquina inferior derecha se aprecia un fragmento lítico accidental, compuesto de microlitos de plagioclasa, con un fenocristal de plagioclasa y otro de anfíbol, éste con macla tipo Carlsbad; también se observan fenocristales fracturados de clinopiroxeno (PX). (d) Fenocristal de anfíbol (parte media izquierda), euédral y fracturado (PX). Anf: anfíbol; Cpx: clinopiroxeno; Ltc: fragmentos líticos; Plg: plagioclasa; Vd: vidrio, y Vd+crt: vidrio y cristales, generalmente microlitos de plagioclasa.

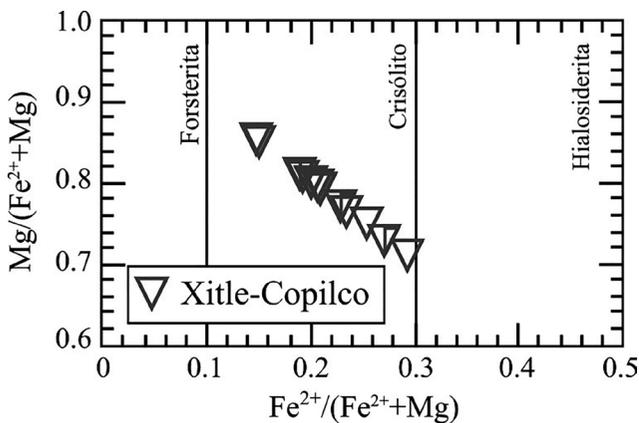


Fig. 11 Diagrama de clasificación química para los olivinos (Deer *et al.*, 1982) de la ceniza del Xitle tomada en el sitio Copilco; los olivinos tienen una composición que varía de forsterita Fo₈₅ a Fo₇₀.

matriz de microlitos de plagioclasa. En general estos cristales se encuentran dentro de la fracción gruesa de la ceniza (figuras 10c y 10d). De acuerdo con los análisis con la microsonda electrónica, el anfíbol está presente como edenita y pargasita (figura 8b; Leake *et al.*, 1997) y su variación composicional entre estas dos especies es mayor que en las muestras de la Tefra Negra.

Por último, el clinopiroxeno (4% del volumen de cristales) se halla como cristales anhédrales, aislados y con golfos de corrosión. Acorde a los análisis de la ME, la composición de los clinopiroxenos oscila entre wollastonita-enstatita-ferrosilita (Wo₃₂-En₅₅-Fs₁₃ y Wo₄₂-En₅₁-Fs₇) (figura 9b).

Geoquímica

Con los resultados de geoquímica de roca total (elementos mayores y trazas) se construyeron diagramas

de clasificación química, discriminación y multielementos (figura 12). Además de los resultados obtenidos en este trabajo, se graficaron los datos reportados en la literatura para muestras de ceniza de los volcanes Xitle y Chichinautzin.

Los datos de elementos mayores fueron utilizados para llevar a cabo la clasificación química de las muestras con base en el diagrama de álcalis total *versus* sílice, diagrama TAS (Le Bas *et al.*, 1986). En la figura 12a se aprecia que la Tefra Negra tiene un contenido mayor de sílice (60% en peso de SiO_2), clasificándose como una andesita. Por otro lado, ambas muestras de ceniza del Xitle corresponden a un magma que cae en el rango de composición de las andesitas basálticas. Esta diferencia composicional entre la Tefra Negra y la ceniza del Xitle sugiere que pertenecen a dos magmas distintos y, por lo tanto, a dos erupciones diferentes.

Con los elementos traza se graficó la concentración de tierras raras (figura 12b) y un diagrama multielemental (figura 12c). En el diagrama de tierras raras se observa, primero, que las cuatro muestras de ceniza (figura 5) siguen un patrón descendente desde las tierras raras ligeras hacia las pesadas, tal como se espera en los magmas generados en ambientes de subducción como lo es la FVT; y segundo, que la Tefra Negra está más empobrecida en tierras raras (figura 12b), lo que

nuevamente sugiere que se trata de dos eventos volcánicos distintos.

En el diagrama multielemental (figura 12c) se aprecia que las tres muestras del Xitle siguen un patrón muy similar y, aunque éstas y la Tefra Negra presentan las anomalías características de ambientes de subducción, los picos de Cs y Pb de la Tefra Negra son ligeramente más positivos, mientras que las anomalías negativas de Nb, Ta, Ce y P están considerablemente más marcadas que en las cenizas del Xitle (figura 12c), hechos que sugieren de nuevo que se trata de dos tipos de magma distintos, y por ende, de dos eventos volcánicos diferentes.

Edades de radiocarbono

La figura 13 presenta los resultados de las cuatro muestras de carbón estudiadas. Tres de ellas fueron analizadas utilizando el método de espectrometría de masa con aceleradores y una por medio de espectrometría de centelleo líquido. Los datos reportados hacen referencia a la edad *convencional de radiocarbono*, que representa la “edad medida de radiocarbono” corregida por fraccionamiento isotópico y calculada usando el $\delta^{13}\text{C}$ (Stuiver y Reimer, 1993).

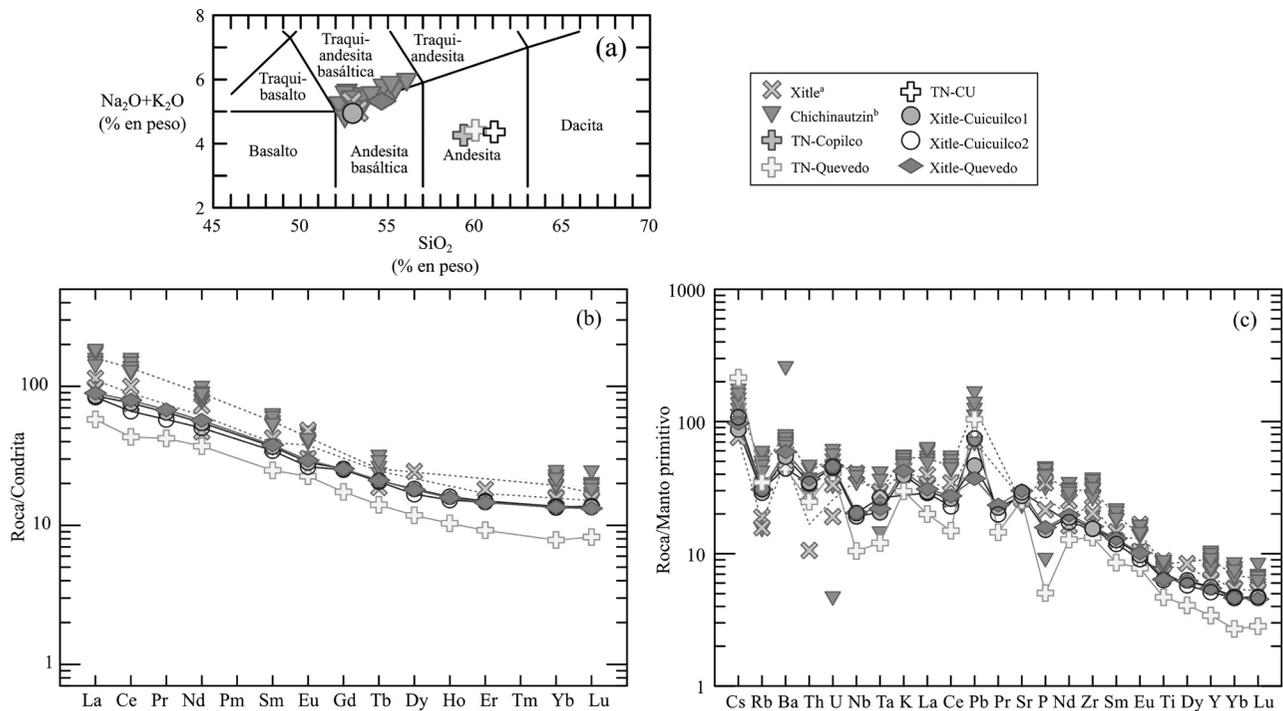


Fig. 12 Diagramas de clasificación química y multielementos para las cenizas Tefra Negra y del Xitle. (a) Diagrama TAS para la clasificación de rocas volcánicas de acuerdo con Le Bas *et al.* (1986); las muestras del Xitle reportadas en trabajos previos coinciden con la muestra Xitle-Cuicuilco1 de este trabajo. (b) Diagrama de tierras raras normalizadas respecto de la condrita (Sun y McDonough, 1989). (c) Diagrama de elementos traza normalizados respecto del manto primitivo (Sun y McDonough, 1989). Los valores para cada elemento en (b) y (c) están dados en ppm. Los datos fueron tomados de a: Cervantes y Wallace (2003), y Siebe *et al.* (2004a), y b: Siebe *et al.* (2004b), Swinamer (1989) y Wallace y Carmichael (1999).

Clave	Descripción y recolección	Laboratorio [método de fechamiento]	Edad convencional (años A.P.)*
Carb-Copilco 1	Fragmentos de carbón tomados de un horizonte cultural, entre el contacto de la Tefra Negra y el tepetate, en el túnel 3-4, perfil 8 del sitio Copilco	Beta Analytic Inc.** [espectrometría de masa con aceleradores]	2640±30
Carb-Copilco 2			2630±30
Carb-Quevedo			1710±30
Carb-Copilco 3	Rama carbonizada de alrededor de 10 cm de largo y 1 cm de diámetro. Se encontró en la Tefra Negra del túnel 3-4, perfil 8 del sitio Copilco (el fragmento original medía cerca de 40 cm de largo).	Laboratorio Universitario de Radiocarbono*** [espectrometría de centelleo líquido]	1820±90

Fig. 13 Detalle de las muestras usadas para fechamiento por radiocarbono y su edad calculada.

* A.p.: años antes del presente, considerando a éste como 1950 a.C.

** Los métodos de calibración usados pueden consultarse en: Heaton *et al.*, 2009; Reimer *et al.*, 2009; Stuiver y Reimer, 1993; Oeschger *et al.*, 1975; Talma y Vogel, 1993.

*** Los métodos de calibración usados pueden consultarse en: Stuiver y Reimer, 1993.

Discusión

De acuerdo con Siebe (2000), la erupción del Xitle hace 1 670 años AP, (245-315 d. C.) produjo un depósito de caída de ceniza seguido por varios flujos de lava. En el presente trabajo se pudo comprobar que la Tefra Negra no corresponde al material expulsado por el Xitle, ya que sus características mineralógicas y químicas difieren completamente de la ceniza de éste, así como de la edad.

En primera instancia, la descripción petrográfica de ambas cenizas revela una textura y composición distinta, donde el principal factor discriminante es la presencia de olivino en la ceniza del Xitle (figura 10). Además, las plagioclasas que constituyen la ceniza del Xitle presentan, en su mayoría, formas euhedrales y un tamaño de entre 0.1 y 0.2 mm de largo y menos de 0.025 mm de ancho, además de una composición más anortítica (es decir, más rica en CaO), mientras que las plagioclasas en la Tefra Negra presentan formas subhedrales a anhedrales, mayor tamaño (hasta más de 0.3 mm) y composiciones intermedias de Na₂O y CaO (fig. 7). En cuanto a los piroxenos, la Tefra Negra contiene ortopiroxenos (enstatita) y clinopiroxenos (augita), mientras que la ceniza del Xitle sólo presenta clinopiroxenos (augita; figura 9).

De acuerdo con la figura 12a, la Tefra Negra presenta una concentración mayor de sílice (magma de composición andesítica) y un empobrecimiento de álcalis respecto a la ceniza del Xitle (magma de composición andesítico-basáltica). También se grafican los diagramas de tierras raras (figura 12b) y multielemental (figura 12c), que representan la huella digital de una roca, donde se aprecia que la Tefra Negra se aleja de la composición de la ceniza del Xitle. Estas características químicas y mineralógicas demuestran que la Tefra Negra y el Xitle representan dos eventos volcánicos distintos.

Los resultados de radiocarbono pueden clasificarse en dos grupos. El primero corresponde a la muestra

Carb-Copilco1 y Carb-Copilco2, cuyas edades resultaron ser de 2 640 años a. p. (893-786 a. C.) y 2 630 años a. p. (838-777 a. C.) respectivamente; y el segundo comprende a las muestras Carb-Copilco3 y Carb-Quevedo, cuyas edades son de 1 820 años a. p. (5-400 a. C.) y 1 710 años a. p. (251-397 d. C.). Si las cuatro muestras fueron tomadas en el mismo horizonte estratigráfico (Tefra Negra), cabe preguntarse por qué existe una diferencia de casi 1 000 años entre ambos grupos.

Una planta que ha sido carbonizada por ceniza caída de un evento eruptivo implica que ese vegetal fue cubierto gradualmente mientras el material volcánico incandescente lo contactaba, sin causar otro tipo de alteración como transporte o intemperismo físico (roturas) y, por lo tanto, debería conservarse íntegra. Siguiendo esta premisa, las edades obtenidas para los fragmentos de carbón Carb-Copilco3 (1 820 años a. p.) y Carb-Quevedo (1 710 años a. p.) representarían el momento en que la Tefra Negra fue emitida, pues en la muestra de mano era posible reconocer la corteza e incluso algunos nodos de la rama (figura 14).

En cambio, las muestras de carbón Carb-Copilco 1 y Carb-Copilco 2 se trataban de fragmentos amorfos semejante a una astilla, por lo que podrían corresponder al duramen de un árbol y no necesariamente a la corteza o a la albura, partes más jóvenes. De este modo, las edades obtenidas para estas muestras se interpretan como una etapa longeva en el crecimiento de un árbol que luego fue carbonizado. Otra posibilidad es que la astilla, de edad antigua, haya sido un fragmento carbonizado y dejado por la cultura de Copilco (sitio probablemente habitado mucho antes de la erupción de la Tefra Negra) y que, por ende, estas edades promedio de 2 665 años a. p. (838-786 a. C.) correspondan al tiempo de ocupación del sitio.

Otra de las interrogantes que pudo esclarecer la excavación del perfil 8 fue la identificación de la Tefra Negra, depósito en el que aparece la mayor densidad

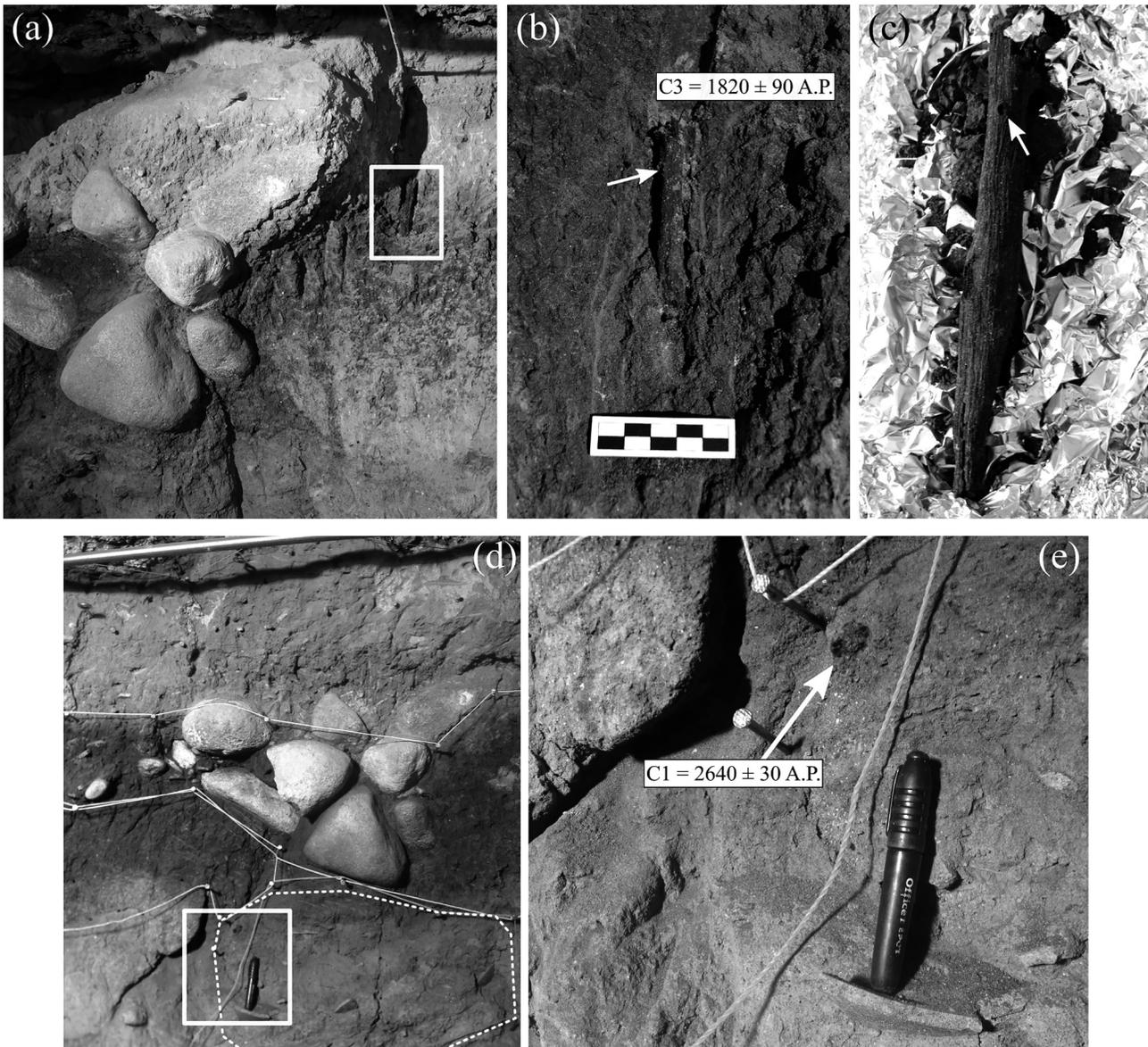


Fig. 14 Detalle de dos muestras de carbón tomadas en el sitio Copilco para fechamiento por ^{14}C . (a) Sección del perfil 8, túnel 3-4 con cantos rodados en la Tefra negra; el recuadro indica la posición en la que se encontró una rama de carbón. (b) Acercamiento del recuadro: la muestra Carb-Copilco3 es una vara posiblemente enterrada por los pobladores de Copilco; la flecha señala un nodo. (c) Estrías en la corteza de la rama y un nodo, señalado por la flecha. (d) Sección del perfil 8, túnel 3-4: la muestra para fechamiento por radiocarbono se tomó de la capa V, en el límite entre la Tefra Negra y el depósito superior de flujo de escombros, demarcado con una línea punteada. (e) Acercamiento del recuadro: nótese la forma irregular y no elongada del carbón Carb-Copilco1, lo que sugiere que se trata de una astilla. Fotografías (a), (b) y (c) cortesía de M. del C. Solanes Carraro y E. Flores; (d) y (e) cortesía de E. Rangel (tomada de Alvarez García, 2018).

de material cultural y definida como la de mayor ocupación. Ya que esa capa cultural se ve alterada por un evento eruptivo anterior al Xitle, es posible reinterpretar los eventos que pudieron ocasionar el abandono del asentamiento.

Los análisis estratigráficos, tipológicos y de concentraciones de materiales culturales nos hablan de que incluso después de la etapa de mayor ocupación del asentamiento, correspondientes a las capas IV y

V (Tefra Negra y cultural; figura 3) con una presencia cerámica de 1 125 tepalcates, el sitio continuó habitado, como lo demuestra la presencia de material cultural en las capas posteriores a la Tefra Negra (capa III: ceniza gris; figura 3) con una densidad de material de 473 tepalcates y capa II (ceniza del Xitle, figura 3) con cuatro.²

² Este análisis corresponde a un área de 3.5 m y una profundidad de 2 m, asociado a una plataforma prehispánica.

Conforme a una interpretación preliminar, se propone que la mayor densidad de ocupación y desarrollo del asentamiento correspondió a la época de la capa de Tefra Negra, aparentemente afectada por este evento vulcanológico, lo que posiblemente ocasionó una migración paulatina y la disminución de la población dado que el incidente podría estar afectando sus tierras y ríos, hecho que pudo contribuir, en gran medida, en la decadencia de otros sitios ligados a Cuicuilco antes de la erupción del Xitle.

Por otra parte, la fuente de emisión de Tefra Negra se desconoce. Considerando una edad de 1 700 a 1 800 años a. p., es posible pensar en una correlación con el volcán Chichinautzin, cuya edad es similar (1 800 años a. p., Siebe *et al.*, 2004b); sin embargo, ya que la composición química de la Tefra Negra y la del volcán difieren notablemente (figura 12), se descarta tal posibilidad. Según las características del depósito de Tefra Negra, ésta debió haber sido producida por una erupción de tipo estromboliano (baja explosividad), posiblemente por un volcán monogenético similar a los que se encuentran en el campo volcánico sierra de Chichinautzin, por lo que la fuente de emisión debería buscarse hacia esa parte de la Cuenca de México.

Si se toma en cuenta que de los 220 volcanes del campo volcánico sierra de Chichinautzin sólo se cuenta con edades radiométricas de menos del 50%, no se excluye que en un futuro se localice la fuente de emisión de Tefra Negra. De igual forma, en trabajos posteriores debería considerársele en cuestiones de riesgo geológico, volcánico y tiempos de recurrencia de actividad en el campo de volcanes monogenéticos.

Conclusiones

Se concluye que la Tefra Negra representa un evento volcánico distinto a la erupción del Xitle, como lo demuestran los datos petrográficos, de clasificación mineral y de geoquímica de roca total. Además, los fechamientos radiométricos indican que existe una diferencia de entre 40 y 150 años entre la erupción del Xitle y la que produjo la Tefra Negra.

La relación de la cultura del sitio Copilco con la emisión de Tefra Negra pudo haber ocurrido a través de dos vías: en la primera, la cultura, ubicada temporalmente en el Preclásico medio (800-200 a. C.), resistió la erupción que produjo la Tefra Negra. La segunda vía implica que la cultura abandonó el sitio de manera paulatina después de la erupción de la Tefra Negra, y migró en su totalidad durante la erupción del Xitle. Sin embargo, para refutar o confirmar esta hipótesis, es necesario hacer un análisis a fondo de las características de las cerámicas encontradas en cada una de las capas.

Agradecimientos

El presente trabajo fue posible gracias al financiamiento de los Proyectos PAPIIT IN102317 e IN101620, otorgado al Dr. J. L. Arce. Extendemos un agradecimiento especial al arqueólogo Miguel Medina por la toma de muestras en el Proyecto de Salvamento Arqueológico de M. A. Quevedo; a los arqueólogos Margarita Treviño y Acuña, Emma Marmolejo, José Ignacio Sánchez Alaniz y Efraín Flores López; al Taller de Laminación de Suelos y Sedimentos; al M. en C. Jaime Díaz Ortega y en especial al Sr. Eligio Jiménez (R.I.P.); al Laboratorio Universitario de Petrología y al Ing. Carlos Linares López, así como al Laboratorio de Microanálisis, a la Dra. Noemí J. Salazar Hermenegildo y al M. en C. Juan Daniel Pérez Orozco; al Laboratorio de Microscopía Electrónica y al Ing. Iván Puente Lee; a la química Patricia Girón García y a la M. en C. Ofelia Pérez Arvizu, por los análisis químicos de roca total por los métodos FRX e ICP-MS.

Bibliografía

Alvarez García, J. L.

2018 *Edad, fuente de emisión e influencia de la Tefra Negra en el sitio arqueológico Copilco, suroeste de la Cuenca de México*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias-UNAM, México.

Arce, J. L., Cruz Fuentes, D., Ramírez Luna, A., Herrera Huerta, I. A., y Girón García, P.

2017 Pómez Bosque de Tlalpan, producto de una erupción de gran magnitud en el margen suroeste de la cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34 (3): 274-288.

Arce, J. L., Layer, P. W., Morales Casique, E., Benowitz, J. A., Rangel, E., y Escolero, O.

2013 New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and whole-rock chemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 266: 34-49.

Arce, J. L., Macías, R., García Palomo, A., Capra, L., Macías, J. L., Layer, P. W., y Rueda, H.

2008 Late Pleistocene flank collapse of Zempoala volcano (Central Mexico) and the role of fault reactivation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177 (4): 944-958.

Beta Analytic

2014 Datación por radiocarbono: una introducción. *Beta Analytic*. Recuperado de: <<http://www.>

radiocarbon.com/espanol/sobre-carbono-datacion.htm>.

Beyer, H.

1917 Sobre antigüedades del Pedregal de San Ángel. *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate*, 37 (1): 1-16.

Bloomfield, K.

1975 A late-Quaternary monogenetic volcano field in central Mexico. *Geologische Rundschau*, 64 (1): 476-497.

Boas, F.

1911-1912 *Álbum de colecciones arqueológicas* (láminas 1-69). Publicaciones de la Escuela Internacional de Arqueología y Etnología Americanas, 138.

Bradbury, J. P.

1971 Paleolimnology of Lake Texcoco, Mexico. Evidence from diatoms. *Limnology and Oceanography*, 16 (2): 180-200.
1989 Late Quaternary lacustrine paleoenvironments in the Cuenca de México. *Quaternary Science Reviews*, 8 (1): 75-100.

Cervantes, P., y Wallace, P. J.

2003 Role of H₂O in subduction-zone magmatism: New insights from melt inclusions in high-Mg basalts from Central Mexico. *Geology*, 31 (3): 235-238.

Deer, W. A., Howie, R. A., y Zussman, J.

1982 *Rock-Forming Minerals. Volume 1A: Orthosilicates*. Longman, Nueva York.

Deer, W.A., y Zussman, J.

1992 *An Introduction to the Rock-Forming Minerals* (2ª ed.). Londres, Pearson Prentice Hall.

Delgado, H., Molinero, R., Cervantes, P., Nieto Obregón, J., Lozano Santacruz, R., Macías González, H. L., Mendoza Rosales, C., y 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.

Flores López, E., y Solanes Carraro, M. del C.

2014 Copilco a la luz de nuevas investigaciones. *Revista Arqueología Mexicana*, 129: 38-42.

Gamio, M.

1920 Las excavaciones del Pedregal de San Ángel y la cultura arcaica del valle de México. *American Anthropologist*, 22 (2): 127-143.

García Palomo, A.

2002 *Vulcanismo y geología estructural de la región de Apan, estados de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México*. Tesis doctoral. Instituto de Geofísica-UNAM, México.

García Palomo, A., Zamorano, J. J., López Miguel, C., Galván García, A., Carlos Valerio, V., Ortega, R., y Macías, J. L.

2008 El arreglo morfoestructural de la sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25 (1): 158-178.

Gunn, B. M., y Mooser, F.

1970 Geochemistry of the volcanics of central Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 34 (2): 577-616.

Heaton, T. J., Blackwell, P. G., y Buck, C. E.

2009 A bayesian approach to the estimation of radiocarbon calibration curves: The IntCal09 methodology. *Radiocarbon*, 51 (4), pp. 1151-1164.

Herrero, E. y Pal, S.

1978 Paleomagnetic study of Sierra de Chichinautzin, Mexico. *Geofísica Internacional*, 17 (2): 167-180.

Houghton, B., y Carey, R. J.

2015 Pyroclastic fall deposit. En H. Sigurdsson, B. Houghton, H. Rymer, J. Stix y S. McNutt (eds.), *Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 599-616). Cambridge, Academic Press.

Ibarra Arzave, G.

2015 *Reconstrucción de la cubierta edáfica en el Cuaternario tardío en la porción sur de la Cuenca de México y su afectación por la actividad volcánica del Xitle*. Tesis de maestría. Instituto de Geología-UNAM, México.

Leake, B. E.

1978 Nomenclature of Amphiboles. *American Mineralogist*, 63: 1023-1052.

Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S, Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J. A., Maresch, W. V., Nickel, E. H., Rock, N. M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whitaker, E. J. W., y Youzhi, G.

1997 Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine*, 61 (2): 295-321.

Le Bas, M., Le Maitre, R., Streckeisen, A., y Zanettin, B.
1986 A Chemical Classification of Volcanic Rocks on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27 (3): 745-750.

Libby, W. R.
1946 Atmospheric Helium Three and Radiocarbon from Cosmic Radiation. *Physical Review*, 69: 671-672.

Lozano Santacruz, R., Verma, S. P., Girón, P., Velasco, F., Morán, D., Viera, F., y Chávez, G.
1995 Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas. *Actas INAGEQ*, 1: 203-208.

Macías, J. L.
2005 Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57 (3), pp. 379-424.

Macías, J. L., García Palomo, A., Arce, J. L., Siebe, C., Espindola, J. M., Komorowski, J. C., y Scott, K.
1997 Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlan volcanoes, central Mexico. En K. P. Link y B. J. Kowallis (eds.), Proterozoic to Recent Stratigraphy, Tectonics, and Volcanology, Utah, Nevada, Southern Idaho, and Central Mexico. *Geology Studies*, 42 (1): 493-528, Brigham Young University.

Márquez, A., Verma, S. P., Anguita, F., Oyarzun, R., y 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): 125-150.

Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., y Llovet, X.
2010 Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62 (1): 1-23.

Mooser, F., Nair, A. E. M., y Negendank, J. F. W.
1974 Paleomagnetic investigations of Tertiary and Quaternary igneous rocks; VIII, A paleomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico. *Geologische Rundschau*, 63: 451-485.

Mora Álvarez, G., Caballero, C., Urrutia Fucugauchi, J., y Uchiumi, S.
1991 Southward migration of volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, basin of Mexico? A preliminary K-Ar dating and paleomagnetic study. *Geofísica Internacional*, 30 (2): 61-70.

Mori, L., Gómez Tuena, A., Cai, Y., y Goldstein, S. L.
2007 Effects of prolonged flat subduction on the Miocene magmatic record of the central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Chemical Geology*, 244 (3-4): 452-473.

Morimoto, N.
1989 Nomenclature of Pyroxenes. *The Canadian Mineralogist*, 27: 143-156.

Niederberger Betton, C.
1976 *Zohapilco: cinco milenios de ocupación humana en un sitio lacustre de la Cuenca de México*. México, INAH (Científica, 30).

Oeschger, H., Siegenthaler, U., Schotterer, U., y Gugelmann, A.
1975 A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature. *Tellus*, 27: 168-192.

Osete, M. L., Ruiz Martínez, V. C., Caballero, C., Galindo, M. del C., Urrutia Fucugauchi, J., y Tarling, D. H.
2000 Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, Mexico: palaeomagnetic and radiometric evidence. *Tectonophysics*, 318: 201-215.

Piña-Chan, R.
1967 *Oficial Guide of Copilco-Cuicuilco*. México, INAH.

Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., Buck, C. E., Burr, G. S., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hajdas, I., Heaton, T. J., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kaiser, K. F., Kromer, B., McCormac, F. G., Manning, S. W., Reimer, R. W., Richards, D. A., Southon, J. R., Talamo, S., Turney, C. S. M., Van der Plicht, J., y Weyhenmeyer, C. E.
2009 IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 51 (4): 1111-1150.

Romero Terán, E.
2001 *Geología del Complejo Volcánico San Miguel al sur-poniente de la Cuenca de México*. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra-UNAM, México.

- Sánchez Alaniz, J. I., Marmolejo Morales, E., Escartín Adam, R., Solanes Carraro, M. del C., y Treviño Acuña, M.**
2014 Copilco: un sitio arqueológico del Pedregal de San Ángel. Informe de la primera temporada, fase I, reporte técnico. Dirección de Registro Público de Monumentos y Zonas Arqueológicas- INAH, México.
- Siebe, C.**
2000 Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 104 (1-4): 45-64.
- Siebe, C., Abrams, M., Macías, J. L., y Obenholzner, J.**
1996 Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, central Mexico: Past key to the future? *Geology*, 24 (5): 399-402.
- Siebe, C., Arana Salinas, L., y Abrams, M.**
2005 Geology and radiocarbon ages of Tlálóc, Tlacotenco, Cuauhtzin, Hijo del Cuauhtzin, Teuhtli, and Ocusacayo monogenetic volcanoes in the central part of the Sierra Chichinautzin, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141 (3-4): 225-243.
- Siebe, C., Rodríguez Lara, V., Schaaf, P., y Abrams, M.**
2004a Geochemistry, Sr–Nd isotope composition, and tectonic setting of Holocene Pelado, Guespalapa and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130 (3-4): 197-226.
2004b Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: implications for archaeology and future hazards. *Bulletin of Volcanology*, 66 (3): 203-225.
- Stuiver, M., y Reimer, P. J.**
1993 Extended ¹⁴C data base and revised CALIB 3.0 ¹⁴C age calibration program. *Radiocarbon*, 35 (1): 215-230.
- Sun, W., y McDonough, W. F.**
1989 Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. En A. D. Saunders y M. J. Norry (eds.), *Magmatism in the Ocean Basins. The Geological Society London Special Publication*, 42(1): 313-345.
- Swinamer, R. T.**
1989 *The geomorphology, petrography, geochemistry and petrogenesis of the volcanic rocks in the Sierra del Chichinautzin, Mexico*. Tesis de maestría. Queen's University, Ontario.
- Talma, A. S., y Vogel, J. C.**
1993 A simplified approach to calibrating ¹⁴C dates. *Radiocarbon*, 35 (2), pp. 317-322.
- Toro, A.**
1918 *El hombre del Pedregal de San Ángel*. Informe del 6 de mayo de 1918, Archivo Técnico de la CNA, Zona Arqueológica Copilco, v.o. Obregón, D.F. Exploración y conservación, exp. B/311.32 (Z51-3)/1., leg. 1, INAH, México.
- Vallance, J. W., e Iverson, R. M.**
2015 Lahars and their deposits. En H. Sigurdsson, B. Houghton, H. Rymer, J. Stix y S. McNutt. (eds.), *Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 649–664). Cambridge, Academic Press.
- Wagner, G. A.**
1998 *Age Determination of Young Rocks and Artifacts: Physical and Chemical Clocks in Quaternary Geology and Archaeology*. Berlín, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Wallace, P. J., y Carmichael, I. S. E.**
1999 Quaternary volcanism near the Valley of Mexico: implications for subduction zone magmatism and the effects of crustal thickness variations on primitive magma compositions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135 (4): 291-314.