



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

Evolución magmática de los eventos
efusivos del volcán La Malinche:
estudio geoquímico y petrográfico

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A

DELIA ISABEL GONZÁLEZ PRECIADO

TUTOR: DR. GIOVANNI SOSA CEBALLOS



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESCUELA
NACIONAL
de ESTUDIOS
SUPERIORES
ENES
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO ESCUELA
NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 08** del **Comité Académico de la Licenciatura en Geociencias** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **21 de septiembre de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Delia Isabel González Preciado** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **418128655**, con el trabajo titulado: **"Evolución magmática de los eventos efusivos del volcán La Malinche: estudio geoquímico y petrográfico"**, bajo la dirección como tutor del **Dr. Giovanni Sosa Ceballos**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

| | |
|--------------------|---------------------------------|
| Presidente: | Dr. Antonio Pola Villaseñor |
| Vocal: | M. en C. Gabriela Reyes Agustín |
| Secretario: | Dr. Giovanni Sosa Ceballos |
| Suplente: | M. en C. Felipe García Tenorio |
| Suplente: | Mtro. Darío Torres Sánchez |

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 29 de enero de 2024.

DRA. YUNUEN TAPIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

Agradecimientos institucionales

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, por darme honor de realizar mis estudios de licenciatura y por brindar los espacios necesarios para ello.

A la licenciatura en Geociencias por todo el aprendizaje y las experiencias brindadas.

A mi tutor, el Dr. Giovanni Sosa Ceballos, por todo el conocimiento compartido, por el tiempo tomado para explicar las cosas, por la paciencia dada en cada una de mis dudas, por su guía, por inspirarme a seguir aprendiendo, y sobre todo por siempre recalcar que todas las preguntas son válidas y que ninguna es absurda.

A Johana Gómez Arango, por la recolección de las muestras de la cima, por sus comentarios, por su guía y por ser una parte importante en la realización de esta tesis. A Mario Boijseauneau, por sus explicaciones y consejos. A Guillermo Cisneros Máximo y Daniel Tapia Flores, por sus valiosos comentarios hacia mi mapa.

A los programas de becas otorgados por la UNAM: Programa de Alta Exigencia Académica y Fortalecimiento Académico de los Estudios de Licenciatura (PAEA-PFEL), Beca de Fortalecimiento Académico para las Mujeres Universitarias (FAMU) y Programa Dra. Silvia Susana Bravo Núñez del Instituto de Geofísica, por el apoyo monetario necesario para poder concluir mis estudios.

Al proyecto de investigación DGAPA-UNAM PAPIIT IG100423 “Estudio geológico del volcán La Malinche; investigación de sus reservorios magmáticos, los procesos que detonan erupciones explosivas y los estilos de descompresión de sus magmas” por la oportunidad de formar parte del proyecto y por brindar los medios necesarios para la realización de esta tesis.

Al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) del Instituto de Geología, UNAM, y a la Quim. Patricia Girón García, por el trabajo realizado en la preparación y análisis de las muestras para obtener la geoquímica.

A los miembros del jurado: el Dr. Antonio Pola Villaseñor, la M. en C. Gabriela Reyes Agustín, el Dr. Giovanni Sosa Ceballos, el M. en C. Felipe García Tenorio y el Dr. Darío Torres Sánchez, por todo su apoyo, por su guía y por los comentarios que hicieron de esta tesis un mejor trabajo.

Agradecimientos personales

Agradezco con toda mi alma y corazón a mi mami, Delia Guadalupe Preciado Aréchiga, y a mi papi, Noé González Curiel, por ser mis pilares en todo, por ser mi refugio seguro, por ver la luz cuando yo solo veía oscuridad, por sostenerme cuando todo tambaleaba, por creer en mí, por su apoyo incondicional, por escucharme en mis mejores y peores momentos, por todo el amor que me han dado, que me dan y que me darán, por ser mi ejemplo a seguir en todos los pasos de mi vida, por enseñarme que siempre hay que esforzarse para ser mejores, por apoyarme en todas mis decisiones, por celebrar mis logros y estar ahí en mis fracasos, por darme a mis hermanas, por darnos una familia tan unida y amorosa. Necesitaría una tesis entera para expresar todo mi agradecimiento y amor. Ma y pa, este logro en mi vida es por y para ustedes, si estoy aquí es por ustedes... los quiero como todas las estrellas del universo y más.

A mis hermanas Daniela y Mariana, por ser mis compañeras de vida, por aguantar todos los datos del volcán cada fin de año que iba a visitarlos, por ser una parte fundamental en quién soy ahora, por su compañía, por todas las risas, enojos y lloraderas, pero sobre todo por darme el honor de ser su hermana.

A Mamá Chole, a mi tía Norma y a Jaki, por ser una parte crucial en mi vida, por impulsarme a ser mejor, por enseñarme a ser buena persona y siempre tener buen corazón.

A todos mis maestros de la licenciatura, especialmente a Sol Hernández, Gabriel Vázquez, Giovanni Sosa y Martín Pacheco, por ayudarme a ser mejor estudiante, por enseñarme a tener ojo crítico y por compartir todos sus conocimientos.

A todos mis compañeros de carrera por su compañía y amistad, por dejarme aprender de ustedes, por todos los buenos momentos dentro y fuera del salón, por ser mi compañía en las prácticas de campo. Agradezco especialmente a Lau, por ayudarme en esos exámenes tan difíciles y por hacerme compañía, y a mis compañeros de área por las experiencias... por lo bueno y lo malo.

A Diana, cuya resiliencia y audacia me inspiran, y a su familia, por abrirme las puertas cuando lo necesitaba, por su compañía y por ser parte importante para acabar esta tesis.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| 1. Introducción | 3 |
| 2. Objetivos | 6 |
| 2.1 <i>Objetivo general</i> | 6 |
| 2.2 <i>Objetivos específicos</i> | 6 |
| 3. Antecedentes | 6 |
| 4. Marco geológico-tectónico..... | 7 |
| 4.1 <i>La Faja Volcánica Transmexicana</i> | 7 |
| 4.2 <i>Geología local</i> | 11 |
| 4.3 <i>Volcán La Malinche</i> | 14 |
| 5. Metodología..... | 16 |
| 5.1 <i>Trabajo de campo y estratigrafía</i> | 16 |
| 5.2 <i>Mapa geológico</i> | 18 |
| 5.3 <i>Petrografía</i> | 19 |
| 5.4 <i>Geoquímica</i> | 21 |
| 5.4.1 <i>Roca total</i> | 21 |
| 5.4.2 <i>Química mineral por microsonda electrónica</i> | 22 |
| 6. Resultados..... | 24 |
| 6.1 <i>Trabajo de campo</i> | 24 |
| 6.1.1 <i>Unidades Piroclásticas</i> | 24 |
| 6.1.2 <i>Unidades efusivas</i> | 26 |
| 6.3 <i>Mapa geológico</i> | 29 |
| 6.3 <i>Petrografía</i> | 30 |
| 6.3.1 <i>Domos de la Cima</i> | 30 |
| 6.3.2 <i>Domos de la Barranca</i> | 32 |
| 6.3.3 <i>Xenolitos</i> | 34 |
| 6.4 <i>Geoquímica</i> | 35 |
| 6.4.1 <i>Roca total</i> | 36 |
| 6.4.2 <i>Química mineral</i> | 38 |
| 6.4.3 <i>Química mineral de xenolitos</i> | 44 |

| | |
|--|----|
| 7. Discusión | 46 |
| 7.1 <i>Comparación entre los diferentes productos del volcán La Malinche</i> | 46 |
| 7.2 <i>Geoquímica de las unidades efusivas del volcán La Malinche</i> | 47 |
| 7.3 <i>Evidencia de procesos magmáticos: Mezcla de magmas y asimilación</i> | 48 |
| 7.4 <i>Evolución magmática</i> | 51 |
| 8. Conclusiones | 52 |
| 9. Bibliografía | 54 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación del volcán La Malinche dentro de la Faja Volcánica Transmexicana..... | 8 |
| Figura 2. Modelo geodinámico del área debajo del volcán La Malinche. | 11 |
| Figura 3. Columna estratigráfica del volcán La Malinche, basada en registros bibliográficos | 13 |
| Figura 4. Ubicación del volcán La Malinche. | 14 |
| Figura 5. Ubicación de los puntos visitados. | 16 |
| Figura 6. Realización de las láminas delgadas. | 20 |
| Figura 7. Afloramiento de las columnas estratigráficas. | 25 |
| Figura 8. Correlación de columnas estratigráficas del volcán La Malinche | 26 |
| Figura 9. Fotografías macroscópicas de los domos de la barranca NE del volcán La Malinche. | 27 |
| Figura 10. Depresión..... | 28 |
| Figura 11. Mapa geológico del volcán La Malinche..... | 29 |
| Figura 12. Ubicación y microfotografías de las muestras de los domos de la cima y de la barranca NE del volcán La Malinche. | 31 |
| Figura 13. Microfotografías de los domos de la zona NE del volcán La Malinche. | 34 |
| Figura 14. Microfotografías de los xenolitos encontrados en los domos de La Malinche..... | 35 |
| Figura 15. Diagramas geoquímicos de los productos efusivos del volcán La Malinche según Le Bas et al., 1986 y según Peccerillo y Taylor, 1976..... | 37 |
| Figura 16. Diagramas multielementos de los domos de la cima y de la barranca NE del volcán La Malinche según Sun y McDonough (1989) y Wood et al. (1979). ... | 37 |
| Figura 17. Diagrama TAS (Le Bas et al., 1986) del vidrio de los domos del volcán La Malinche..... | 38 |
| Figura 18. Sistema ternario de las plagioclasas en los productos efusivos del volcán La Malinche..... | 39 |
| Figura 19. Diagramas de variación de elementos mayores de los bordes y núcleos de las plagioclasas de los domos en la cima y en la barranca NE del volcán La Malinche..... | 41 |
| Figura 20. Variación de contenido composicional de anortita en microcristales y fenocristales de plagioclasa de los domos de la barranca NE y de la cima del volcán La Malinche..... | 42 |
| Figura 21. Clasificación según Leake, et al. (1997) de los anfíboles de los domos de la cima y de la barranca NE del volcán La Malinche. | 43 |
| Figura 22. Diagramas binarios de dispersión de átomos por unidad de fórmula o a.p.f.u. | 44 |
| Figura 23. Microfotografías de los xenolitos de los domos del volcán La Malinche y su respectivo sistema ternario de las plagioclasas..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 24. Clasificación según Leake, et al. (1997) de los anfíboles de los xenolitos encontrados en los domos de la cima y de la barranca NE del volcán La Malinche. | 45 |
| Figura 25. Comparación entre distintos productos del volcán La Malinche. | 46 |
| Figura 26. Comparación de biotita con borde de reacción de los productos efusivos de los domos de La Malinche y de los productos explosivos de la Pómez Malinche II | 49 |
| Figura 27. Comparación de la clasificación según Leake, et al. (1997) de los anfíboles de las rocas de los domos del volcán La Malinche y de los anfíboles de los xenolitos..... | 50 |
| Figura 28. Modelo propuesto de evolución magmática de las rocas que dieron origen a los domos o productos efusivos del volcán La Malinche. | 51 |

Índice de tablas

Tabla 1. Descripción general de los sitios visitados _____ 17

Tabla 2. Concentración de elementos mayores y traza de los domos del volcán La Malinche _____ 35

RESUMEN

El volcán La Malinche es un estratovolcán localizado en la parte centro-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, entre los estados de Puebla y Tlaxcala, y presenta rocas de composición dacítica (58.3 wt.% y 66.4 wt.% de SiO₂). Tiene una actividad eruptiva conformada por extrusión de cuerpos dómicos, depósitos de caída, flujos de bloques y ceniza, lahares y depósitos de derrumbes principalmente en el Pleistoceno tardío-Holoceno. Por relaciones estratigráficas se infiere que su actividad comenzó hace más de 45,000 años y su última actividad fue hace 3,100 años. Se estudiaron los productos eruptivos efusivos de la cima y de la ladera NE del volcán, conformada por una serie de domos de composición dacítica (62-65 wt.% de SiO₂) con una asociación mineral de plagioclasa + anfíbol ± biotita ± óxidos ± clinopiroxenos ± cuarzo, además de contar con xenolitos de granito/granodiorita y xenocristales de biotita. Estas rocas tienen contenidos variables de cristalinidad (40-80% en vol.) y presentan una matriz traquítica conformada por vidrio riolítico (76.61 wt.% promedio de SiO₂) y plagioclasa. Los resultados geoquímicos indican que las rocas analizadas son de afinidad calcoalcalina y la mineralogía consiste en plagioclasas que varían composicionalmente de labradorita a oligoclasa y los anfíboles de magnesiohornblenda a tschermakita, además de tener texturas de desequilibrio y reequilibrio. Los resultados de los análisis geoquímicos y petrográficos sugieren la presencia de un cuerpo granítico o granodiorítico que fue sometido a procesos de asimilación y mezcla de magmas en el sistema magmático del volcán, como resultado de intrusiones magmáticas máficas en el sistema, generando un magma híbrido dacítico que conforma los eventos que dieron origen a los domos del volcán La Malinche.

Palabras clave: geoquímica, petrografía, mezcla de magmas, asimilación.

ABSTRACT

La Malinche volcano is a stratovolcano located in the eastern section of the Transmexican Volcanic Belt, between the states of Puebla and Tlaxcala. It presents andesitic to rhyolitic rocks (58.3 wt.% and 66.4 wt.% of SiO₂). It has a cyclic eruptive activity made up of different deposits (fall, block and ash flows, lahars, landslides). It is inferred, by stratigraphic correlations, that its activity began 45,000 years ago, having the last one 3,100 years ago. The effusive activity of La Malinche volcano is manifested in a series of calc-alkaline dacitic domes (62-65 wt.% of SiO₂) with a mineral association of plagioclase, amphibole, biotite, oxides, clinopyroxenes and quartz, besides having granite/granodiorite xenoliths and biotite xenocrystals. These rocks have variable crystallinity contents (40-80% vol.) and present a trachytic matrix made up of rhyolitic glass (76.61% average wt.% of SiO₂) and plagioclase. The geochemical results show the variability of plagioclase composition from labradorite to oligoclase, and magnesium-hornblende to tschermakite for amphiboles. These rocks also have imbalance and rebalance textures. The geochemical and petrological results suggest the presence of a granitic/granodioritic body that was subjected to assimilation and magma mixing processes as a result of mafic magmatic intrusions, generating a dacitic hybrid magma that constitutes the events that gave rise to La Malinche volcano domes.

Key words: geochemistry, petrography, magma mixing, assimilation.

1. Introducción

La convergencia entre una placa continental y una placa oceánica genera una zona de subducción que favorece la ocurrencia de procesos como fusión parcial, magmatismo y metamorfismo (e. g. Carter, 1970; Wilson, 1989; Rubio-Ordoñez *et al.*, 2007; Yoder, 2015). Después de que se generan los magmas pueden ocurrir procesos magmáticos, como mezcla de magmas, asimilación y cristalización fraccionada, que imprimen un registro en la química de las rocas, en la textura y la composición de los minerales (Bowen, 1928; Carter, 1970; Springer y Seek, 1997; Dobran, 2012; Boijseauneau, 2018). Como resultado de estos procesos las rocas generadas adquieren características mineralógicas y geoquímicas que ayudan a diferenciar el tipo de ambiente tectónico en el que fueron generadas, y son útiles para investigar la evolución del magma original (e. g. Ken-Ichiro *et al.*, 1985; Defant *et al.*, 1991; Pompa, 2005; Sampa *et al.*, 2010; Plechov *et al.*, 2015; García, 2021). Esta información se puede obtener a través de estudios de la distribución química de los elementos (especialmente elementos traza), en diagramas de fase y en datos proporcionados por la química mineral (Bowen, 1928; Carter, 1970).

Desde los primeros estudios realizados por Bowen en 1928 se comprende que la importancia de la química de elementos mayores y menores (traza y tierras raras) radica en representar la composición química del magma, conocer las condiciones de la cámara magmática, entender las condiciones de las fases de cristalización mineral en procesos como asimilación o mezcla de magmas y comprender los procesos termodinámicos que dominan las propiedades físicas de los magmas (Irvine, 1975; Watson, 1976; Avdonin *et al.*, 1980; McBirney, 2015).

Por otra parte, la creación de mapas geológicos son una de las herramientas principales para hacer cualquier prospección geológica, como conocer el territorio y los recursos que se tienen en él; del mismo modo funcionan como una herramienta de apoyo encaminada a la toma de decisiones por lo que son fundamentales para la gestión de riesgos y peligros geológicos y la mitigación de estos (Asato, 1996; Rodríguez *et al.*, 2013; Lario y Azcárate, 2016). El estudio y monitoreo de los volcanes es de suma importancia ya que el monitoreo constante puede ser la

clave para actuar con suficiente tiempo y de una manera apropiada ante una situación que suponga un riesgo para la población (erupciones volcánicas y todos los procesos que éstas conllevan) disminuyendo así la probabilidad de pérdidas humanas, económicas y/o materiales (Stoiber y Williams, 1990; Tiling, 2008; Scarpa y Tiling, 2012; Jolly, 2015). El entender los procesos magmáticos y el origen de los magmas ayuda a conocer los factores desencadenantes de una erupción, facilitando así la modelación de estas y abriendo paso a investigaciones sobre predicciones y escenarios potencialmente riesgosos (Zimbelman *et al.*, 2011; Stavros, 2017; Cioni *et al.*, 2021; Papale, 2021). La ocurrencia de fenómenos volcánicos puede causar pérdida de vidas, dañar infraestructuras y tener impactos a corto y largo plazo, incluso llegando a desplazar comunidades completas (Ortiz, 2019). Estudiar integralmente a los volcanes aporta la información necesaria para actualizar mapas de peligros y riesgos, y que así se puedan generar planes preventivos, planes de acción, planes de emergencia y planes de uso de suelo. Para realizar estos planes es esencial hacer un análisis detallado de la historia eruptiva que permita vislumbrar cómo se ha comportado el volcán a lo largo del tiempo, y cómo podría comportarse en el futuro.

Uno de los puntos fundamentales para hacer un buen análisis geológico es la atención al detalle, y la petrografía es una herramienta esencial en ese aspecto. La petrografía microscópica y la descripción macroscópica de rocas, nos permite entender sus texturas y establecer pautas en las descripciones y clasificaciones (Castro, 2015). La descripción petrográfica se debe enlazar con la química de las rocas. La química de elementos mayores-traza y la petrografía ha sido ampliamente utilizados para rocas volcánicas en México, principalmente en la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), para inferir los procesos magmáticos (Verma *et al.*, 1993; Witter *et al.*, 2005; Savov *et al.*, 2008; Sosa-Ceballos *et al.*, 2012; Gómez-Valencia *et al.*, 2015). La FVTM es una región volcánicamente activa formada por cerca de 8000 estructuras volcánicas; una de las grandes estructuras menos estudiadas es el volcán La Malinche (Castro-Govea, 1999; Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

La Malinche es un estratovolcán localizado en el sector oriental de la FVTM, entre los estados de Puebla y Tlaxcala. Su nombre original es Matlatcuéyetl, “*la de la falda azul*” en náhuatl, y tiene una gran importancia cultural para los tlaxcaltecas ya que este volcán fungía como un sitio para realizar actividades ceremoniales, principalmente para pedir una temporada de lluvias abundantes (Castro y Tucker, 2009). La Malinche tiene registradas 14 erupciones en los últimos 46,000 años; presenta rocas de composición dacítica/andesítica (Castro-Govea, 1999; Gómez-Tuena *et al.*, 2005; Castro-Govea, 2007). La estructura volcánica está formada por una serie de domos, productos de la actividad efusiva del volcán La Malinche, y depósitos piroclásticos de tipo flujo de bloques y ceniza, o FBC (Castro-Govea, 1999; Castro-Govea, 2007).

Existen pocos trabajos petrológicos relacionados a La Malinche, y solamente se tiene un par de estudios sobre las condiciones pre-eruptivas y evolución magmática (Espinosa, 2021); esta falta de conocimiento, aunado al difícil acceso a algunas zonas cruciales del volcán, han sido una de las principales limitantes de este trabajo. Castro-Govea (2007) consideró a este volcán como potencialmente activo, actualmente en estado de reposo, pero teniendo en cuenta su gran tamaño y que su última erupción fue hace 3100 años se estipula que podría ser de gran riesgo, sobre todo para los casi 2 millones de habitantes que viven a su alrededor (Castro-Govea, 2007; Castro-Govea y Siebe 2007). Adicionalmente, entre 2012 y 2014 se reportaron movimientos telúricos de actividad vulcanotectónica con magnitudes entre 1.0 y 2.0 de Md, y a profundidades entre 4 y 7 km (Angulo-Carrillo *et al.*, 2013; Angulo-Carrillo, 2018).

A pesar de los estudios geomorfológicos, volcánicos, estratigráficos y petrográficos que se han hecho sobre el volcán La Malinche e incluso sobre la actividad monogenética, la actividad efusiva no ha sido estudiada ampliamente. En el presente trabajo de investigación se analizan los datos geoquímicos y petrológicos de las muestras de rocas tomadas de la barranca NE y de la cima del volcán La Malinche, además de que se aporta al conocimiento para comprender

los procesos magmáticos asociados a los eventos efusivos de este, con el objetivo de proponer un modelo de evolución magmática y poder explicar su origen.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Determinar a través de trabajo de campo, análisis petrográficos y geoquímicos, la evidencia de los procesos magmáticos que pudieron estar relacionados a los eventos efusivos del de la parte cima y de la ladera noreste del volcán La Malinche.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar los procesos magmáticos que han ocurrido en los eventos efusivos presentes en la ladera noreste y en la cima del volcán La Malinche.
- Caracterizar litológicamente el volcán La Malinche mediante un mapa geológico preliminar y columnas estratigráficas compuesta de las rocas que afloran en la barranca ubicada en el flanco Noreste del volcán La Malinche.
- Reconocer las características geoquímicas de los elementos mayores y traza, y de los minerales de las rocas de los eventos efusivos de la parte cima y de la barranca noreste del volcán.
- Realizar una aproximación a un modelo de evolución magmática de las rocas que conforman los eventos efusivos del volcán.

3. Antecedentes

El volcán La Malinche fue estudiado por primera vez en el año 1965 (Viniegra, 1965). La mayoría de estudios realizados en este volcán se enfocan principalmente en la biología o en el impacto cultural, aunque también hay unos cuantos sobre los depósitos glaciares, la geomorfología y los depósitos lacustres y formaciones calcáreas de la zona (Heine, 1971; Heine y Heide-Weise, 1973; Erffa

et al., 1976; Moya y Zamorano, 1983; Castro-Govea, 1999). Según reconstrucciones estratigráficas hechas con perfiles obtenidos en las laderas occidental, oriental, sur, norte y noreste del volcán, se obtuvo una edad C^{14} de $23,940 \pm 1000$ años para la muestra más antigua: un paleosuelo que se encuentra por debajo de la Pómez Malinche I (Malde, 1969; Heine, 1971; Heine y Heide-Weise, 1972; Heine y Heide-Weise, 1973; Castro-Govea, 2007).

También, las rocas del volcán fueron clasificadas inicialmente como dacitas y leuco-cuarzolatiandesitas con hornblenda y biotita (Weyl, 1974), y su actividad eruptiva se definió como repetitiva, ocurriendo al menos 14 erupciones, divididas en 4 etapas distintas: 39000 años AP, 21500 años AP, 21500-12000 años AP y 12000-9000 años AP (Castro-Govea, 1999; Castro-Govea y Siebe, 2007). Los productos de cada etapa fueron plasmados un mapa geológico (Castro-Govea y Siebe, 2007). El único estudio hecho sobre condiciones pre-eruptivas hasta la fecha determinó que el magma asociado a la erupción de la Pómez Malinche II era de composición dacítica y estuvo alojado a 8.4 km (210 MPa) por debajo del volcán, teniendo una temperatura de equilibrio de 873°C y condiciones hidratadas de al menos 5% de H_2O (Espinosa, 2021)

Algunos autores consideran que no hay ningún tipo de actividad superficial que pueda asociarse a la presencia del magma dentro del edificio volcánico (Macías y Capra, 2005; Castro-Govea y Siebe, 2007), sin embargo, entre 2012 y 2014 se reportó la presencia de movimientos telúricos de baja frecuencia asociados a la interacción fluido-roca, y también de tipo tornillo, con magnitudes entre 0.7 y 2.6 (Angulo-Carrillo *et al.*, 2013). Este tipo de sismos suelen ser precursores a actividad volcánica explosiva (Dávila, 2018; Espinosa, 2021).

4. Marco geológico-tectónico

4.1 La Faja Volcánica Transmexicana

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es una provincia fisiográfica de casi 160,000 km que pertenece al Cinturón de Fuego del Pacífico (Ferrari *et al.*, 2012).

Se caracteriza por ser un arco volcánico originado por la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana, teniendo un ambiente de margen continental activo (Ferrari *et al*, 1994; Ferrari, 2000; Ferrari *et al.*, 2012). Tiene cerca de 8000 estructuras volcánicas y se extiende desde las costas del Pacífico en Nayarit, hasta las costas del Golfo de México en Veracruz, como se aprecia en la figura 1 (Demant, 1978 citado por Gómez-Tuena *et al.*, 2005).



Figura 1. Ubicación del volcán La Malinche dentro de la Faja Volcánica Transmexicana. Se señala en un círculo rojo la ubicación del volcán La Malinche. En blanco se muestran las partes en la que está dividida esta provincia: occidental (occ.), central y oriental. SMOr= Sierra Madre Oriental, SMOcc= Sierra Madre Occidental, Occ= Occidental.

Las edades de la FVTM varían, pero hay un claro comportamiento en donde las edades se vuelven progresivamente más jóvenes de oeste a este, es decir, el

vulcanismo empezó en la parte occidental y se fue recorriendo hacia la parte oriental (Ferrari *et al.*, 1994; Ferrari *et al.*, 2000; Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

La FVTM se divide en 4 episodios magmáticos principales: primero se instauró un arco en el Mioceno medio y tardío (con edades que van desde los 7.5 a 30 Ma), después hubo un episodio máfico del Mioceno tardío (con edades entre 6.5 y 11 Ma), posteriormente hubo un episodio silícico a finales del Mioceno que cambió a ser bimodal en el Plioceno temprano (con edades entre 3 y 7.5 Ma), donde la principal característica es que el vulcanismo se alejó de la trinchera hasta aproximadamente 450 km para formar estratovolcanes y cuerpos plutónicos, y finalmente se tuvo una reinstauración de un arco con gran variabilidad composicional del Plioceno tardío al Cuaternario (Gómez-Tuena *et al.*, 2005). En este periodo se construyeron los grandes estratovolcanes como Volcán de Colima Popocatepetl, Pico de Orizaba y La Malinche.

La dinámica de subducción de las placas tectónicas que originan la FVTM es un punto crucial para determinar el comportamiento de esta. Esta dinámica se basa en las fuerzas tectónicas y en las fuerzas de acción vertical, que traen como consecuencia las grandes deformaciones de la corteza (De la Torre, 1992). En México las fuerzas tectónicas predominan en dirección noroeste-sureste, sin embargo, hay algunos esfuerzos que cambian el sistema estructural, como las fracturas tensionales o la geometría de las placas que subducen (De la Torre, 1992; Stock, 1993; Ferrari *et al.*, 2012). La mayoría de los arcos volcánicos son paralelos a su trinchera, sin embargo, la FVTM al tener un ángulo de 16° con respecto a la trinchera no cumple con esta característica (Thorpe, 1977; Gómez-Tuena, 2005; Pérez-Campos *et al.*, 2008). Este inusual comportamiento lo ocasiona la propia geometría de las placas: la placa Rivera se subduce a un ángulo de 40° al inicio, pero incrementa a aproximadamente 70° justo debajo de la FVTM, mientras que la placa de Cocos se hunde inicialmente a 15° hasta 80 km después de la costa, y luego cambia abruptamente a 75° debajo del frente volcánico (Ferrari *et al.*, 2012). Otro de los aspectos estructurales que afectan la FVTM son los sistemas de fallas, regidos por los puntos antes ya mencionados. Al

occidente de la FVTM tenemos el sistema de fallas del punto triple, formado por el rift Tepic-Zacoalco (dirección E-O) y el rift de Colima (dirección N-S); al centro de la FVTM está el sistema de fallas Morelia-Acambay y el de Taxco-San Miguel de Allende, con direcciones E-O y NNO-SSE respectivamente; al oriente de la FVTM tenemos el sistema de fallas La Pera-Tenango con dirección E-O y el sistema de fallas Tenochtitlán-Apan con dirección E-O (Ferrari *et al.*, 2012). En general la FVTM se distribuye con una dirección preferencial E-O en su parte central y oriental, y ONO-ESE en su parte occidental (Ferrari, 2000; Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

En cuanto al área del volcán La Malinche, convergen 3 sistemas de fallas con distintas orientaciones: NE-SO (Malinche), NO-SE (Hueyotlipan) y E-O (Tetlatlahuca) (Castro-Govea y Siebe, 2007). Espinosa (2021) menciona que muy probablemente estos sistemas se intersectan debajo de La Malinche. Castro-Govea y Siebe (2007) registran lineamientos estructurales con direcciones N-S, NE-SO, NO-SE y E-O, sin embargo, Espinosa (2021) menciona que son difíciles de observar debido a los depósitos piroclásticos recientes que los recubren. El volcán La Malinche se edificó sobre la depresión del graben formado por fallas normales E-O que buzan hacia el sur en la Secuencia Lacustre Tlaxcala y hacia el norte en la Formación Maltrata (Seele y Mooser, 1972; Angulo-Carrillo, 2018; Espinosa, 2021), concordando con los estudios geofísicos de potencial espontáneo (SP) que indican la existencia de fallas debajo de La Malinche, asociadas a un colapso en la antigua caldera (Angulo-Carrillo, 2018).

La placa oceánica que subduce la región debajo de La Malinche se ubica a profundidades variables, alcanzando profundidades de subducción de más de 250 km y la corteza continental es muy gruesa en esta área (Pérez-Campos *et al.*, 2008; Becerra-Torres, 2014). En la figura 2 se muestra un perfil vertical de la placa de Cocos en la región donde se encuentra La Malinche, ubicada a aproximadamente 310 km de la trinchera. Según los modelos térmicos, la placa de Cocos cruza el solidus húmedo del basalto (~800°C a 3GPa) a ~200 km, lo cual implica que tanto la corteza oceánica como la cubierta sedimentaria pueden estar

sujetas a fusión parcial (Manea y Manea, 2011; Becerra-Torres, 2014). Se aprecia en la figura 2 que la placa de Cocos tiene un segmento de subducción plana y después se inclina abruptamente, justo como se mencionaba anteriormente. La mayor deshidratación de Cocos ocurre en este segmento plano en donde se liberan fluidos por ruptura de zeolitas, a diferencia del segmento inclinado en donde la liberación de fluidos se da debido a la deshidratación de clorita y anfíbol (Manea y Manea, 2011; Becerra-Torres, 2014).

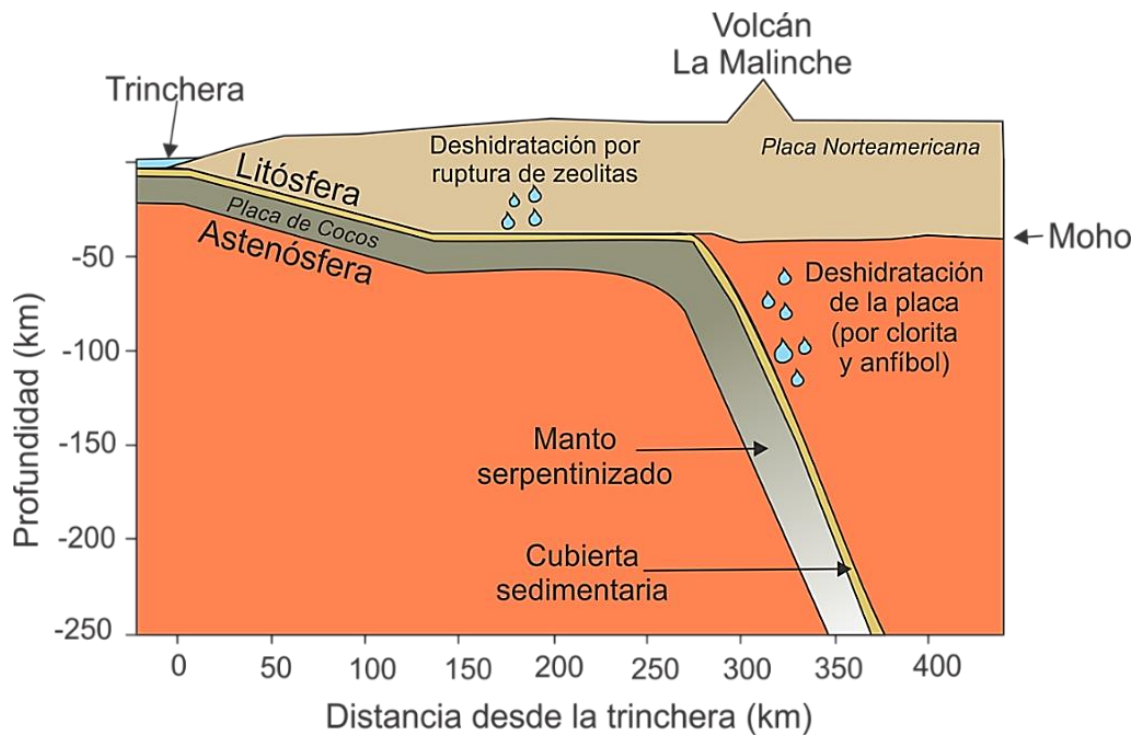


Figura 2. Modelo geodinámico del área debajo del volcán La Malinche. Tomadas y modificadas de Becerra-Torres (2014) y Manea y Manea (2011).

4.2 Geología local

La geología local, descrita de base a cima, es la siguiente:

Debido a los propios depósitos del volcán La Malinche, aún no se ha determinado con certeza cuál es el basamento, sin embargo, se sugiere que las rocas

calcáreas de la zona forman parte del basamento (Castro-Govea, 2007). Dando soporte a esta idea, al sur del volcán afloran calizas arcillosas, pertenecientes a la Formación Maltrata (Erffa *et al.*, 1976) y al sureste de la cima del volcán aflora la Formación Orizaba que son calizas arrecifales con nódulos de pedernal (López-Ramos, 1979), y se han encontrado fragmentos de estas formaciones en los depósitos del cerro Xalapasco, (ubicado a 11km al NE de La Malinche), junto con fragmentos de dacitas con fenocristales, por lo que se infiere que son parte del basamento más somero (Castro-Govea, 2007; Espinosa, 2021). Esta secuencia plegada de calizas pertenece a las rocas más antiguas del área y cuentan con intercalaciones de areniscas y limolitas (Castro-Govea, 2007). Además de las unidades del basamento mencionadas anteriormente, se exponen también depósitos lacustres del Terciario al NE pertenecientes a la Secuencia Lacustre Benito Juárez y consisten en capas de arena y limo que están cubiertas por flujos de lava andesítica del grupo Terrenate y la Andesita El Crestón (Erffa *et al.*, 1976; Gómez-Tuena y Carrasco Núñez, 2000).

Asimismo, alrededor de La Malinche, mayormente al norte, hay varias estructuras monogenéticas como domos y conos de escoria del Cuaternario de distintas composiciones, como andesitas basálticas y algunos traquibasaltos ricos en K (Castro-Govea, 2007; Becerra-Torres, 2014). Al NO del volcán también se encuentran otros depósitos lacustres pertenecientes a la Secuencia Lacustre Tlaxcala y consisten en capas delgadas de material piroclástico de tamaño de arena y limo cubiertos por depósitos piroclásticos (Castro-Govea, 2007; Espinosa, 2021).

Castro-Govea (2007) detalla la estratigrafía de la zona, sin embargo, aquí se presenta una columna estratigráfica general (fig. 3). Esta columna se basa en registros bibliográficos, es decir, es una recopilación de los distintos registros estratigráficos reportados en la bibliografía, y, por ende, las unidades no están a escala. También pueden presentarse grandes hiatos, no obstante, no significa que la depositación terminó ahí, sino que no se encontraron registros entre esas unidades.

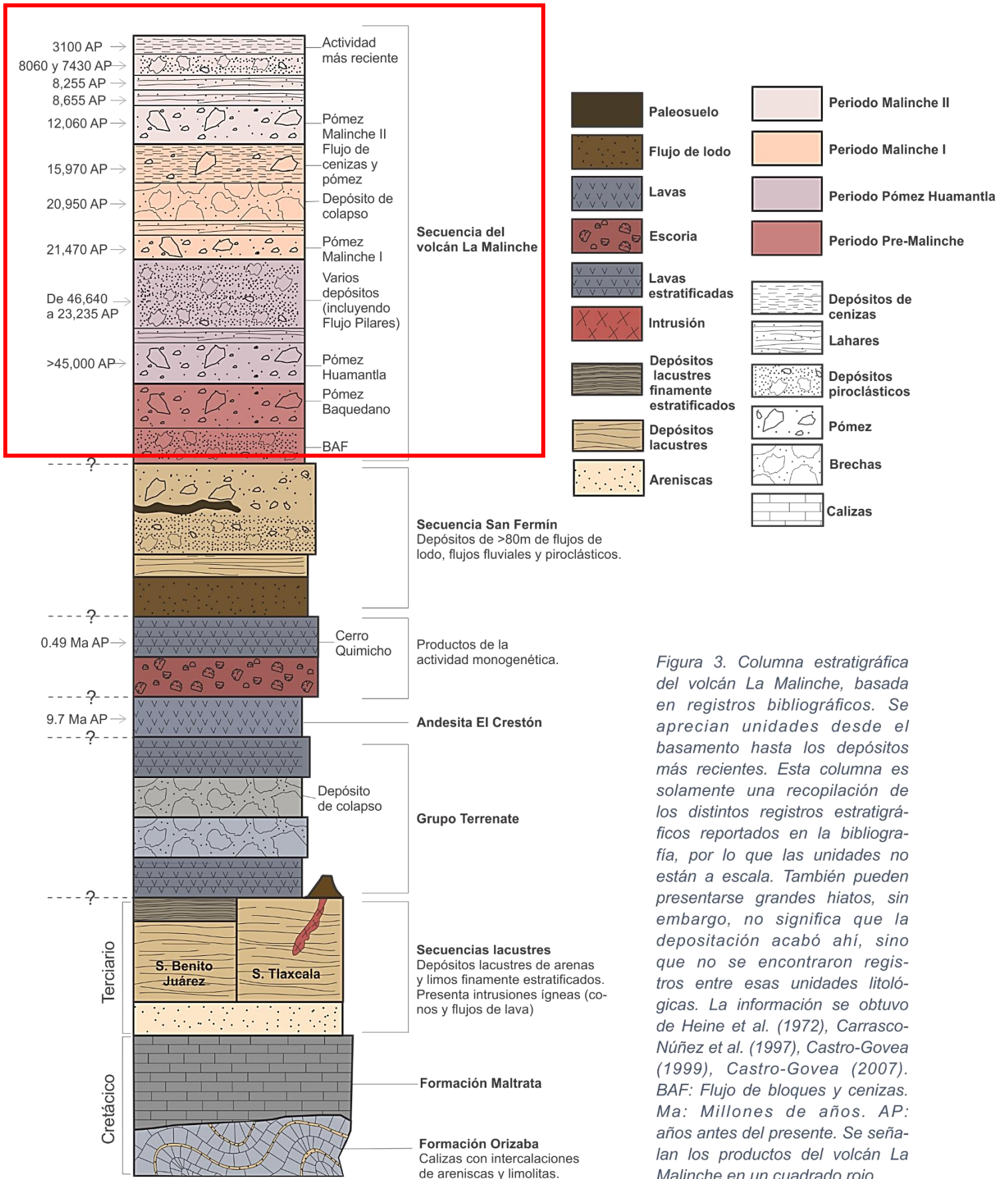


Figura 3. Columna estratigráfica del volcán La Malinche, basada en registros bibliográficos. Se aprecian unidades desde el basamento hasta los depósitos más recientes. Esta columna es solamente una recopilación de los distintos registros estratigráficos reportados en la bibliografía, por lo que las unidades no están a escala. También pueden presentarse grandes hiatos, sin embargo, no significa que la depositación acabó ahí, sino que no se encontraron registros entre esas unidades litológicas. La información se obtuvo de Heine et al. (1972), Carrasco-Núñez et al. (1997), Castro-Govea (1999), Castro-Govea (2007). BAF: Flujo de bloques y cenizas. Ma: Millones de años. AP: años antes del presente. Se señalan los productos del volcán La Malinche en un cuadrado rojo.

4.3 Volcán La Malinche

La Malinche es un estratovolcán que se encuentra entre los estados de Tlaxcala y Puebla, más específicamente a 25 km al noreste de la ciudad de Puebla (fig. 4). Se encuentra a 65 km al este de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Tláloc (Sierra Nevada) y a 82 km al suroeste del volcán Pico de Orizaba. La Malinche está localizado en el sector centro-oriental de la FVTM.

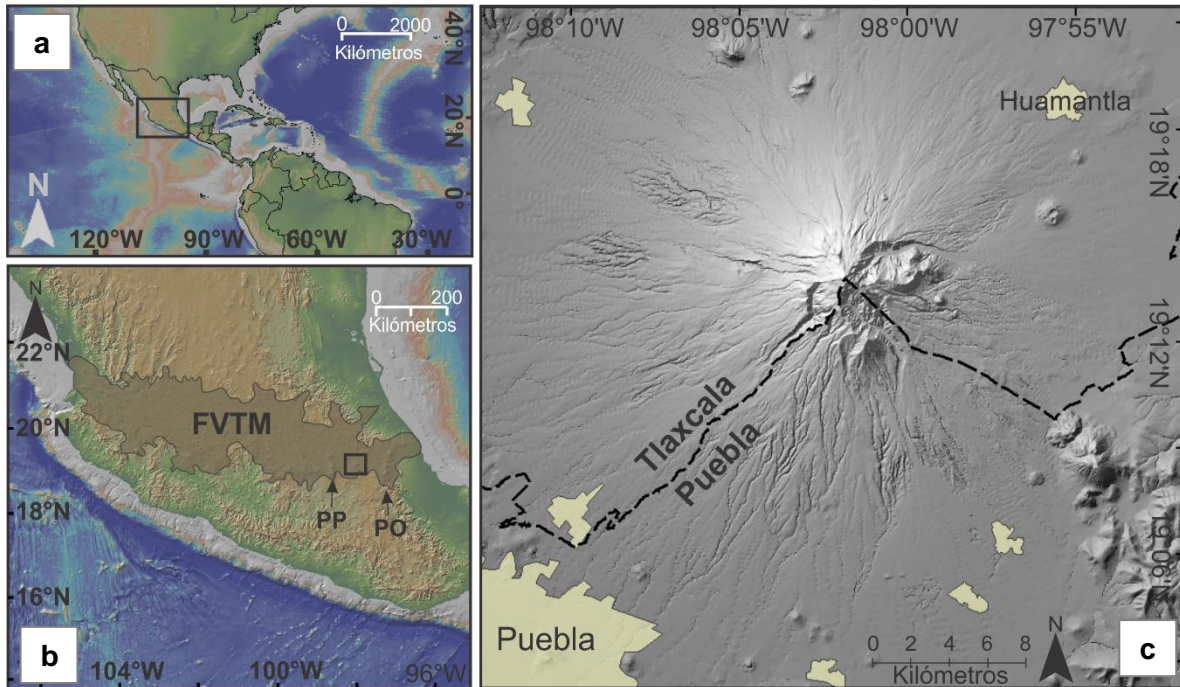


Figura 4. Ubicación del volcán La Malinche. a) Ubicación de la zona de estudio en el continente americano; b) ubicación de la zona de estudio en México; c) ubicación de la zona de estudio. PP= Volcán Popocatepetl, PO= Volcán Pico de Orizaba, FVTM= Faja Volcánica Transmexicana.

La composición de las rocas del volcán La Malinche varían de andesitas ricas en sílice a dacitas, con SiO_2 de 58.26 a 66.35%wt., y presentan una asociación mineralógica de plagioclasa, hornblenda, biotita, óxidos, clinopiroxeno y cuarzo (Castro-Govea, 2007)

La actividad de este volcán se ha dividido en 2 etapas eruptivas: Pre-Malinche y Malinche. La etapa Pre-Malinche tiene una edad pleistocénica y son las rocas más antiguas observadas en el volcán (Castro-Govea, 2007). Esta secuencia incluye

depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza y una capa de pómez de caída (Castro-Govea, 2007). Le sigue la etapa Malinche se divide en tres subperiodos detallados a continuación. Cabe resaltar que en esta etapa se han registrado tres erupciones Plinianas.

- **Periodo Pómez Huamantla.** Por relaciones estratigráficas se infiere que es mayor a 45,000 años AP y consta de flujos piroclásticos, depósitos de cenizas y pómez, depósitos de lahar y depósitos de bloques y ceniza (Castro-Govea, 2007). En el límite inferior se encuentra la Pómez Huamantla, después hay depósitos de otros tipos de eventos volcánicos (lahares, FBC), y en el límite superior está la Pómez Malinche I, la cual marca el inicio del siguiente periodo (Castro-Govea, 2007).
- **Periodo Pómez Malinche I.** Inició con la Pómez Malinche I, producto de una erupción Pliniana y fechada en 21,470 años AP, después hay registros de pómez de caída, depósitos de lahares y depósitos de colapsos del edificio volcánico (Castro-Govea, 2007). Este periodo culminó con la Pómez Malinche II, fechada en 12,060 años AP (Castro-Govea, 2007). Además de la pómez también hay depósitos de pómez de caída, depósitos de lahares y depósitos de colapsos del edificio volcánico (Castro-Govea, 2007). Los depósitos de avalancha de la ladera suroccidental tienen una edad de 20,950 años AP (Castro-Govea, 2007).
- **Periodo Pómez Malinche II.** Inició hace 12,060 años y esta secuencia se conforma de flujos piroclásticos y flujos de ceniza y pómez (Castro-Govea, 2007). Dentro de este periodo ocurrió una erupción Pliniana entre los 12,060 y los 9,000 años AP (Castro-Govea, 2007). La última actividad que ha tenido La Malinche fue hace 3100 años y los depósitos consisten en una unidad de caída de cenizas y otra de flujo de cenizas (Castro-Govea, 2007).

5. Metodología

5.1 Trabajo de campo y estratigrafía

Se realizaron dos campañas de campo en el área de estudio: una en la barranca noreste del volcán La Malinche (también llamada barranca axaltzintle), con una duración de 3 días (del 29 de septiembre al 1° de octubre del 2022, "Columnas" y "Muestras barranca NE" en la fig. 5) y otra en los domos de la zona este, con una duración de 7 días (del 13 al 20 de marzo del 2023, "Puntos control" en la fig. 5). La descripción general se encuentra en la tabla 1.

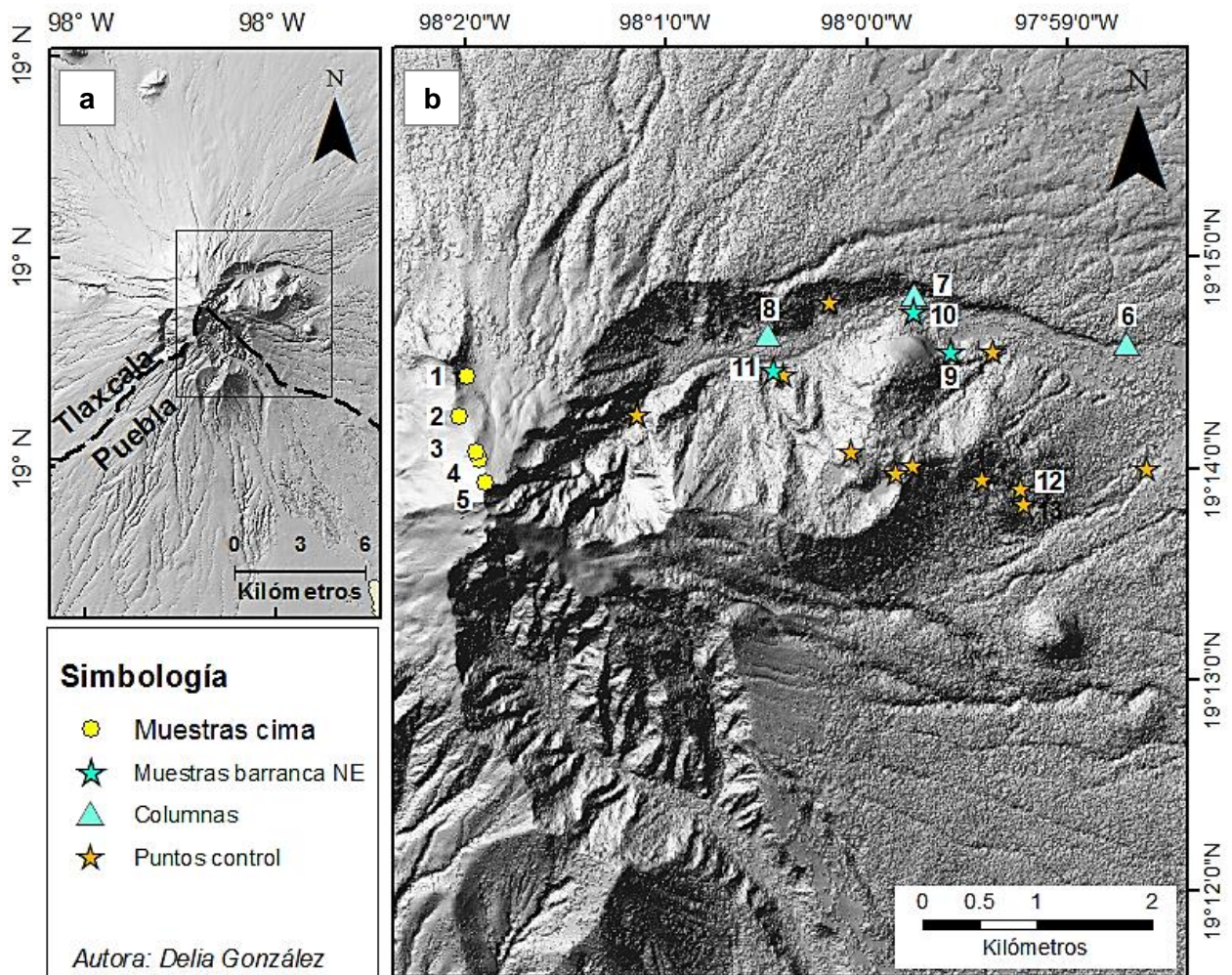


Figura 5. Ubicación de los puntos visitados. FVTM= Faja Volcánica Transmexicana (tomada y modificada de Jaimes-Viera, 2018). a) Ubicación de los puntos visitados en el volcán La Malinche; b) Ubicación de los puntos visitados. 1=LM-2200, 2=LM-2206, 3=LM-2205, 4=LM-2204, 5=LM-2203, 6=LM4-B1, 7=LM4-B2, 8=LM4-B3, 9=LM-1, 10=LM-2, 11=LM-3, 12=LM-2310.

Tabla 1. Descripción general de los sitios visitados

| NÚMERO | CÓDIGO | TIPO | DESCRIPCIÓN GENERAL | UBICACIÓN (ZONA 14Q) |
|---------------|---------------|---------------------------|---|---------------------------------|
| 1 | LM-2200 | Muestra | Base del domo lateral de la cima | 601589.38 E 2127761.94 N |
| 2 | LM-2206 | Muestra | Domo de la cima | 601534.15 E 2127411.93 N |
| 3 | LM-2205 | Muestra | Domo de la cima | 601676.74 E 2127098.43 N |
| 4 | LM-2204 | Muestra | Domo de la cima | 601699.19 E 2127031.04 N |
| 5 | LM-2203 | Muestra | Domo de la cima | 601762.33 E 2126831.09 N |
| 6 | LM4-B1 | Columna estratigráfica | Flujo de bloques y ceniza | 607361.4 E 2128036.9 N |
| 7 | LM4-B2 | Columna estratigráfica | Flujo de bloques y ceniza | 605506 E 2128473 N |
| 8 | LM4-B3 | Columna estratigráfica | Flujo de bloques y ceniza | 604231 E 2128119 N |
| 9 | LM-1 | Muestra | Domo con ladera muy escarpada (aprox. 75°), barranca NE | 605811 E 2127982 N |
| 10 | LM-2 | Muestra | Rodado gigante (aprox. 5m de diámetro), barranca NE | 605497 E 2128328 N |
| 11 | LM-3 | Muestra | Domo con ladera de 45°, barranca NE | 604265 E 2127814 N |
| 12 | LM-2310 | Muestra | Cima del domo | 606428 E 2126786 N |

En cada sitio visitado se realizó una descripción del afloramiento y/o muestra, tomando en cuenta aspectos como clasificación general, color, selección, textura y presencia de matriz. Además, en los afloramientos se tomaron datos útiles para

realizar el mapa geológico y la columna estratigráfica (descripción, tipo de roca, aspecto general, etc.).

5.2 Mapa geológico

Para el mapa geológico se realizó un mapa preliminar utilizando Sistemas de Información Geográfica (ArcGis). Para este mapa preliminar se georreferenció el publicado por Castro-Govea (2007) y se delimitaron algunas de las unidades de éste. Se modificó el límite de algunas unidades utilizando el criterio propio y los siguientes insumos:

- Modelo Digital de Superficie. Generado con un mosaico de 15 modelos obtenidos de la biblioteca nacional del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de la zona E14B (claves 33e4, 33f3, 33f4, 34d3, 34d4, 43b2, 43c1, 43c2, 44a1, 44a2, 43b4, 43c3, 43c4, 44a3, 44a4), escala 1:10,000, resolución de 5m, años del 2016 al 2018. Para la integración de mosaico se utilizó la herramienta *Mosaic to New Raster* de ArcGis y el método utilizado para las áreas superpuestas fue la mezcla (*blend*), en donde el software realiza un cálculo ponderado horizontalmente de los valores de las celdas en el área superpuesta (ArcGis, 2023).
- Modelo Digital del Terreno. Insumos obtenidos del INEGI, zona E14B (mismas claves que el modelo anterior), escala 1:10,000, resolución de 5m, años 2016-2018.

Con los insumos anteriores se crearon otros modelos (pendientes y sombreados) para poder delimitar mejor las unidades. El mapa geológico preliminar se corroboró en campo con los puntos de control de la primera salida (“Muestras, barranca NE” y “Columnas”, fig. 5). Se hicieron las modificaciones pertinentes y se volvió a corroborar en campo (“Puntos control”, fig. 5). Las unidades delimitadas fueron las siguientes:

- Aluvión: Unidad constituida de sedimentos no consolidados depositados en las zonas de baja pendiente.
- Depresión. Parte de la superficie donde el relieve que es ligeramente inferior a las zonas circundantes (definición según Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus)
- Depósitos de caídas: Unidad formada por los depósitos de caídas producto de las erupciones Plinianas del volcán La Malinche.
- Domo: Unidad conformada por los domos y sus productos asociados. Cabe señalar que no se tienen edades de los domos, por lo que los domos de la cima podrían pertenecer a esta categoría o a la categoría de Pre-Malinche.
- Flujo de bloques y ceniza.
- Pre-Malinche: Unidad constituida por depósitos asociados a domos y flujos de bloques y ceniza que, por correlaciones estratigráficas y por geomorfología, se infiere que pertenecen a la actividad antigua del volcán La Malinche. Analizando la geomorfología se sugiere que las paleoestructuras y los paleodepósitos fueron cubiertos por los productos recientes. No se tienen edades, pero por asociaciones estratigráficas se especula que tienen edades mayores a 45,000 años AP (edad propuesta por Castro-Govea, 2007). Es importante señalar que esta unidad propuesta no es la misma que propone Castro-Govea (2007).

5.3 Petrografía

Se elaboraron un total de 8 láminas delgadas en el Laboratorio de Petrografía del Instituto de Geofísica, unidad Michoacán, según las indicaciones dadas en el manual técnico de Buehler (Ahmed y Vander, 2000) y con ayuda del técnico Felipe García Tenorio . Se analizaron un total de 20 láminas: las 8 láminas mencionadas anteriormente y 12 láminas realizadas previamente por Johana Gómez Arango. Se analizaron las láminas delgadas en el microscopio petrográfico (marcas Carl Zeiss Axiophot 2 Imaging MOT y Olympus Bx60) del Instituto de Geofísica, unidad Michoacán.

Para realizar las láminas delgadas se escogieron aquellas zonas menos intemperizadas y más representativas de la textura de la muestra de mano. Después se trazó el área de interés, cuidando que tuviera medidas aproximadas de 3x5 cm, y se procedió a cortar la roca. Antes de manipularla debe estar seca por lo que se recomienda ponerla aprox. 30 minutos en una plancha isotérmica. Una vez seca, se procedió a realizar el método de impregnación por goteo (fig. 6a) con el objetivo de proteger las zonas de interés con resina y evitar el deterioro propio de la manipulación. Después se pulió tanto la muestra como la lámina de vidrio y se pegó la muestra a la lámina con resina epoxi. Una vez seca, se utilizó la cortadora de precisión (marca Struer Accutum 50) del Laboratorio de Petrografía para cortar la lámina a un espesor de aprox. 100 micrómetros (fig. 6b), para posteriormente pulir a mano utilizando abrasivos de distintos tamaños hasta alcanzar un espesor de 30 micrómetros (fig. 6c). Al finalizar la lámina delgada se puso en baño ultrasónico por 20 minutos para eliminar cualquier residuo que pudiera albergarse en ella.

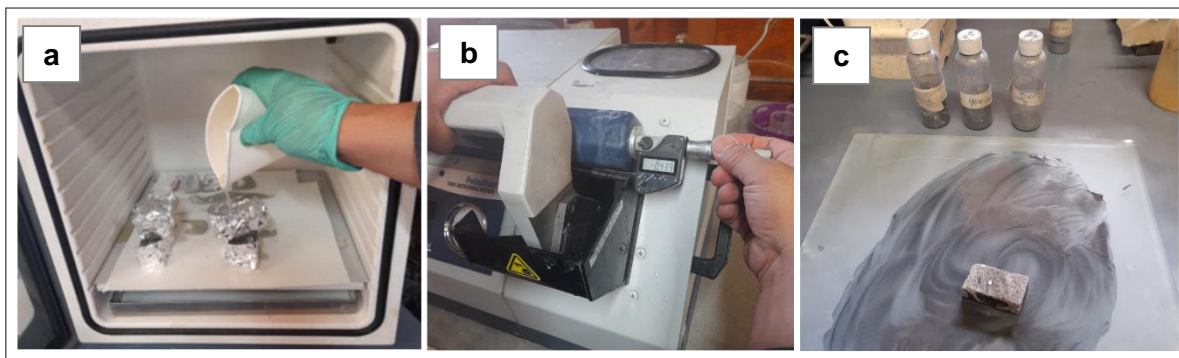


Figura 6. Realización de las láminas delgadas. a) Método de impregnación por goteo; b) Corte de la lámina delgada a un espesor de 100 micrómetros; c) Proceso de pulido.

Para la descripción petrográfica de los tamaños de los minerales se utilizó la siguiente base: microcristales $<300\mu\text{m}$, fenocristales de $300\text{-}1000\mu\text{m}$ y megacristales para $>1000\mu\text{m}$.

5.4 Geoquímica

Se analizó la geoquímica de roca total de cinco muestras (dos de las rocas de la cima: LM-2203 y LM-2205, y tres de las rocas de la barranca NE: LM-1, LM-2 y LM-3), así como también se obtuvo la química mineral del vidrio, plagioclasas, anfíboles, biotitas y de los xenolitos.

5.4.1 Roca total

Se escogieron las muestras LM-1, LM-2, LM-3, LM-2203 y LM-2205 por ser representativas de los productos efusivos, es decir, por compartir características en común con otras muestras. Se trituraron y pulverizaron para posteriormente ser enviadas al Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM). Los datos resultantes se normalizaron al 100% en base anhidra.

La preparación de las muestras (triturado y pulverizado) se realizó en el Laboratorio de Análisis de Partículas y Separación de Minerales del Instituto de Geofísica, unidad Michoacán. Se siguieron las indicaciones del procedimiento interno, con ayuda de la Técnico Fabiola Mendiola López. Se utilizó una trituradora marca Sepor para desarrollar la trituración de fragmentos de roca (aproximadamente 3cm de tamaño) que no presentara señales de intemperización, obteniendo un total de 100 gr de muestra. Estas muestras se limpiaron con agua destilada y se dejaron secar a 60°C por 48 horas. Una vez secas se procedió con el proceso de pulverización. Al ser un procedimiento sumamente delicado por la alta probabilidad de contaminación de la muestra se extremaron cuidados con respecto a la manipulación y la limpieza de la zona, y entre cada muestra distinta se lavaron y secaron todos los componentes utilizados. Para la pulverización se utilizó una pulverizadora Herzog y se inició con el proceso de contaminación en donde se tomaron un par de trozos y se pulverizaron por 30 segundos para posteriormente desechar el producto. Este proceso se repitió un par de veces antes de pulverizar la muestra final, la cual fue pesada y finalmente rotulada.

5.4.2 Química mineral por microsonda electrónica

Se seleccionaron un total de 15 láminas delgadas para el análisis de química mineral. Para su preparación se utilizó la pulidora Buehler MetaServ 250 Grinder de la Unidad de Vulcanología y Granulometría del Instituto de Geofísica, unidad Michoacán, en donde se pulieron las láminas por 15 minutos con un abrasivo a base de óxido de aluminio de $1\mu\text{m}$ de tamaño (marca Buehler). Para obtener la química mineral se utilizó la microsonda electrónica (EPMA por sus siglas en inglés) del Instituto de Geofísica, unidad Michoacán. Las condiciones analíticas bajo las que se tomaron las mediciones fueron voltaje de aceleración 15 kV, corriente de emisión $13.3\text{-}14.1\mu\text{A}$, corriente de absorción de 6.3×10^{-9} a 8.38×10^{-9} A, longitud de onda dispersiva (WD) 11.1 mm y haz con $1\mu\text{m}$ de diámetro.

Para la posición de los puntos se tomaron aquellos que tuvieran presencia de zonaciones o texturas peculiares, y en cada cristal se escogieron uno o más puntos con el objetivo de cuantificar variaciones composicionales desde el centro hacia el borde. Se tomaron 2047 puntos, de los cuales se consideraron solo los que cumplían los siguientes criterios:

- Para la fase mineral de las plagioclasas: si el total se enmarca entre 97 y 100.5% y el Al_2O_3 entre 22 y 31%.
- Para la fase mineral de las biotitas: si el total se enmarca entre 95 y 98.9%.
- Para la fase mineral de los anfíboles: si el total se enmarca entre 92 y 98.9%.

Los puntos que no cumplían las características anteriores no se utilizaron en este trabajo. Al aplicarse los criterios previos se verificó que un total de 1062 puntos eran los aptos para desarrollar los análisis apropiados (LM-1 309 puntos, LM-2 197 puntos, LM-3 124 puntos, LM-2200 97 puntos, LM-2203 104 puntos, LM-2204 34 puntos y LM-2205 197 puntos). Cabe mencionar que se tomaron mediciones de vidrio y se tomaron en cuenta los de composición de SiO_2 de 70% o más y el Al_2O_3 de 11 a 18%, sin embargo, los puntos fueron tomados con la calibración propia de

las plagioclasas, biotitas y anfíbol, por lo que en este trabajo se presentan datos composicionales preliminares.

Para el procesamiento de los datos geoquímicos obtenidos de plagioclasas se calculó el contenido de anortita, albita y feldespato potásico, siguiendo los siguientes pasos:

1. Se calculó la proporción molecular dividiendo el peso en porcentaje (wt. %) de cada óxido entre el peso molecular de la fórmula del óxido.
2. Se obtuvo la proporción de oxígeno, donde se multiplica la proporción molecular de cada óxido por el número de oxígenos en la fórmula de este.
3. Se obtuvo la proporción catiónica, multiplicando la proporción molecular por el número de átomos del elemento en la fórmula de cada óxido.
4. Se procedió a calcular el factor de oxígeno, dividiendo el número 8 entre la suma de las proporciones de oxígeno de la muestra (se toma el número 8 porque las plagioclasas están compuestas de 8 oxígenos).
5. Se calcularon los cationes en base 8, multiplicando el factor de oxígeno por la proporción catiónica de cada óxido.
6. Se calculó el contenido de anortita, albita y feldespato potásico, según las siguientes fórmulas:

$$Ab = \frac{Na_2O^*}{Na_2O^* + CaO^* + K_2O^*} \quad FP = \frac{K_2O^*}{K_2O^* + CaO^* + Na_2O^*} \quad An = \frac{CaO^*}{CaO^* + K_2O^* + Na_2O^*}$$

Donde Ab es albita, FP es feldespato potásico, An es anortita, Na_2O^* es el resultado catiónico en base 8 del Na_2O , CaO^* es el resultado catiónico en base 8 del CaO y K_2O^* es el resultado catiónico en base 8 del K_2O . La suma de albita, anortita y feldespato potásico debe ser 1.

Para el procesamiento de los datos geoquímicos obtenidos de las biotitas se calcularon las fórmulas minerales para obtener el número de átomos de cada elemento por fórmula. Primero se calcula el número de moles dividiendo el peso en porcentaje (wt. %) de cada óxido entre el peso molecular de la fórmula del óxido. Después se multiplica el número de moles de cada óxido por el número de oxígenos en la fórmula del mismo. En el caso de las biotitas es 12, según la

fórmula $(K(Mg,Fe)_3[AlSi_3]O_{10}(OH)_2$. Posteriormente para cada óxido se multiplica el resultado del paso anterior por la constante de normalización que se obtiene dividiendo el número de oxígenos de la fórmula deseada entre la suma de los oxígenos del paso anterior. Finalmente, en cada óxido se multiplica el resultado normalizado del paso anterior por el número de cationes por oxígeno en la fórmula del óxido. Esta metodología ya ha sido utilizada previamente en cálculos minerales y ha tenido resultados satisfactorios con mediciones provenientes de microsonda electrónica (Albee, 1965; Ague, 1989; Wu *et al.*, 2010; Apollaro, *et al.*, 2013; Putirka, 2016; Lypaczewski y Rivard, 2018).

Para procesar los datos geoquímicos obtenidos de los anfíboles se utilizó la metodología propuesta por Putirka (2016) que toma en cuenta la composición de elementos mayores del líquido (roca total) y la composición de elementos mayores del anfíbol. Se trabajó con los datos de los anfíboles presentes en las muestras LM-1, LM-2, LM-3, LM-2203 y LM-2205 debido a que solo se tienen datos composicionales de roca total de las mismas.

6. Resultados

6.1 Trabajo de campo

A partir de los datos recolectados en campo se definieron las unidades piroclásticas y las unidades efusivas.

6.1.1 Unidades Piroclásticas

A partir de los datos de campo recolectados en la barranca Axaltzintle, perteneciente al sector NE del volcán, se seleccionaron tres columnas estratigráficas representativas (las cuales son las mejores expuestas) de los depósitos piroclásticos (fig. 7 y 8) se nombraron A (clave LM4-B3, fig. 7a), B (clave LM4-B2, fig. 7b) y C (clave LM4-B1, fig. 7c). Se observaron depósitos de caída (los reportados por Castro-Govea, 2007), y principalmente FBC en distintas facies de

deposición. Algunas unidades están delimitadas por paleosuelos poco desarrollados.

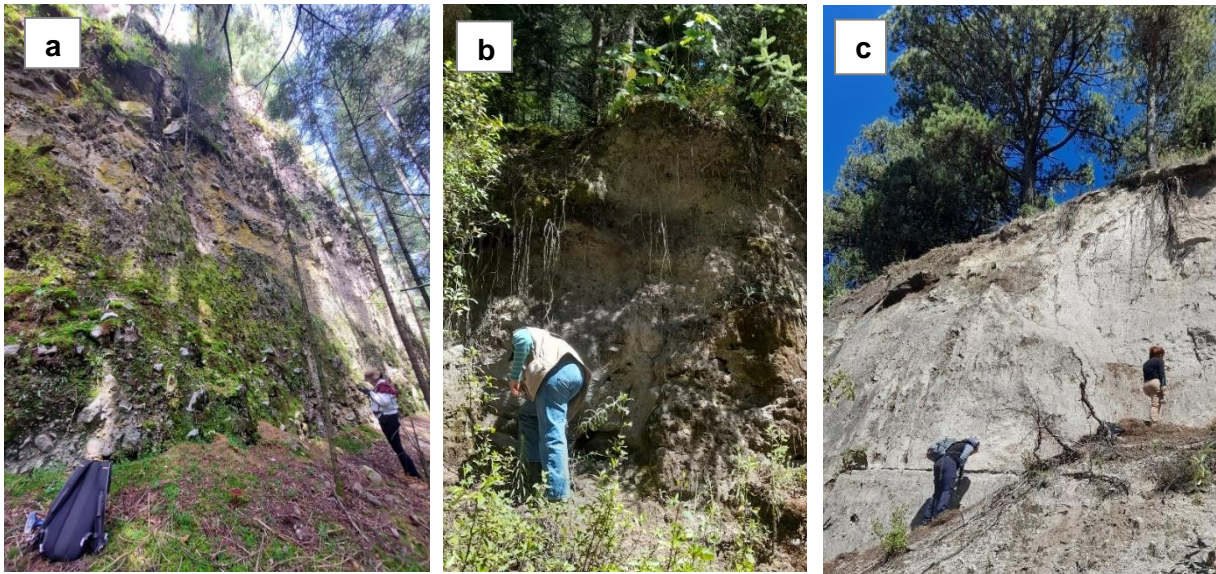


Figura 7. Afloramiento de las columnas estratigráficas. **a)** Columna LM4-B3; **b)** Columna LM4-B2; **c)** Columna LM4-B1.

Unidad 1: La primera unidad consiste en un depósito de flujo de bloques y ceniza (FBC-1, fig. 8) que varía de concentrado (columna A) a medianamente diluido (columna B), a diluido (columna C), y tiene espesores que varían de 20 a 5 metros aproximadamente. En la columna A es masivo con soporte de matriz de ceniza, y con concentración de clastos gruesos en la base; está compuesto de clastos angulosos de líticos andesíticos-dacíticos porfídicos de color gris claro, con tamaños que varían de 30-50cm en la base y de 5-10cm en la cima. Estos clastos son similares a las rocas presentes en la cima del volcán. Por su parte, en la columna B el depósito es masivo con mala selección y con concentración de clastos gruesos en la base. Presenta ocasionalmente clastos, de hasta 1m de diámetro, y fragmentos de pómez. La matriz es de tamaño de lapilli y de color gris. Por otro lado, en la columna C, el depósito de FBC se encontró muy diluido y con un espesor de aprox. 4m. Presenta una mejor selección y tiene un color beige-grisáceo, con matriz de cenizas finas. Los componentes líticos son de bloques de menor tamaño que en las columnas A y B.

Unidad 2: Esta unidad consiste en un depósito formado por intercalación de depósitos de flujos de bloques y ceniza (FBC-2, fig. 8) densos y depósitos masivos con clastos angulosos con tamaños variables de 5-10cm. Esta unidad solamente es visible en la zona de la columna A (más cercana a la cima del volcán).

Unidad 3: Esta unidad (C-1, fig. 8) está conformada por depósitos de caída de pómez que presentan gradación normal. Presenta una variación en el tamaño del grano que va de lapilli (columna A y B) a ceniza (columna C). En la columna C se nota la presencia de clastos angulosos de 0.5-1cm.

Unidad 4: Esta unidad se conforma de un depósito de flujo de bloques y ceniza (FBC-3, fig. 8) de color beige claro. En la columna A se presenta en el límite superior; en la columna B no se encontró esta unidad, a diferencia de la columna C en donde se presentó en un depósito de aprox. 6m de espesor.

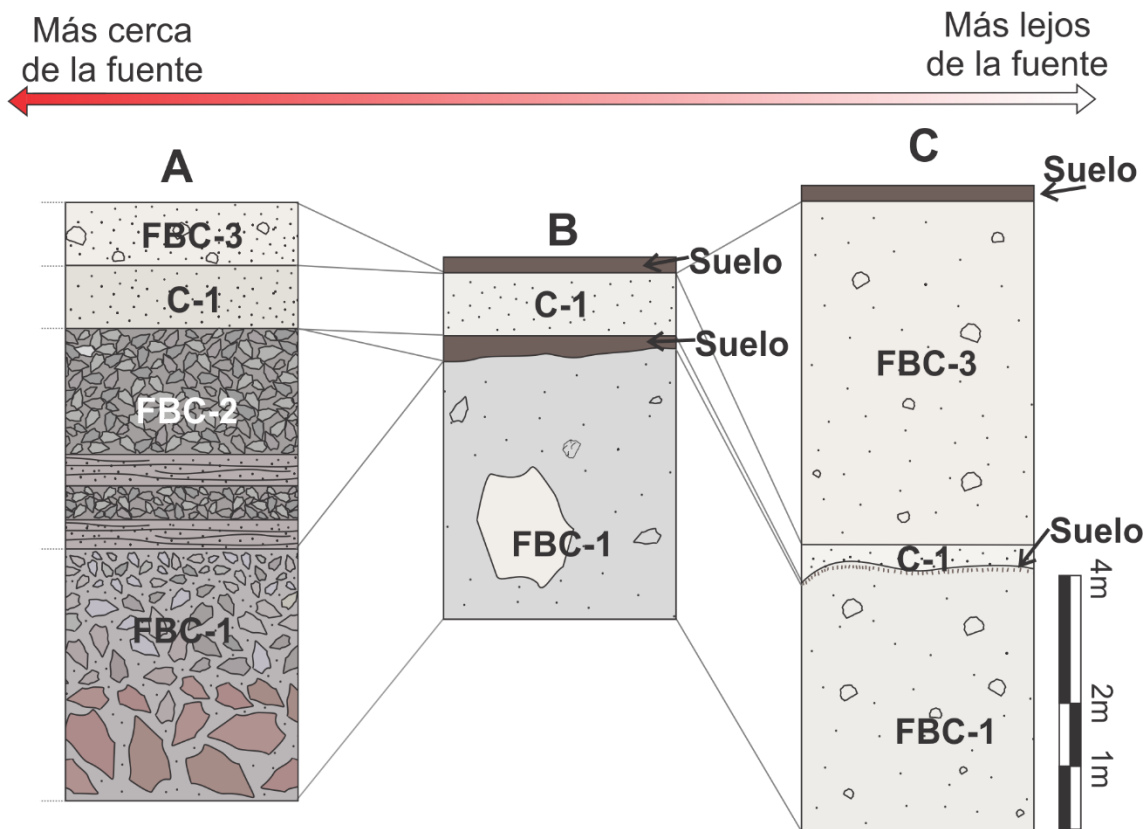


Figura 8. Correlación de columnas estratigráficas del volcán La Malinche que afloran a lo largo de la barranca Axaltzintle, en la vertiente NE del volcán. Los elementos de cada unidad no están a escala. FBC= Flujo de bloques y ceniza. C= Caídas.

6.1.2 Unidades efusivas

De acuerdo al levantamiento de más de 5 afloramientos de rocas en la cima, y más de 12 en la vertiente NE del volcán La Malinche, a continuación, se describen de manera informal las unidades efusivas denominadas como domos de la cima y domos de la vertiente NE.

Domos de la cima: Consisten en cuerpos con rocas con una gran cantidad de cristales que conforman los domos de la cima del volcán. Las rocas presentan un color grisáceo en roca sana, y un color rojizo en roca intemperizada. Tienen textura porfídica seriada, con cristales de grano medio (1-5mm) a fino (<1mm) y con una matriz de grano fino donde se observa vidrio intersticial. Los fenocristales observables son de plagioclasa y biotita. Se detalla más la petrografía en la sección 6.3.

Barranca NE: Esta unidad se conforma de domos parcialmente colapsados, formados por rocas volcánicas con textura porfídica y cristales de grano medio inmersos en una matriz de grano ultrafino. Por otro lado, se observó que hay depósitos que han sido ocasionados por derrumbes de las paredes de los domos. Los depósitos de derrumbes están mal seleccionados, tienen clastos heterolitológicos angulosos de tamaños variables (0.05-3m) y están inmersos en una matriz de líticos triturados. Algunas zonas de estos domos presentan características peculiares como distintos grados de cristalinidad en donde la proporción matriz-cristales varía a pesar de pertenecer a un mismo depósito (fig. 9a, 9b y 9c).

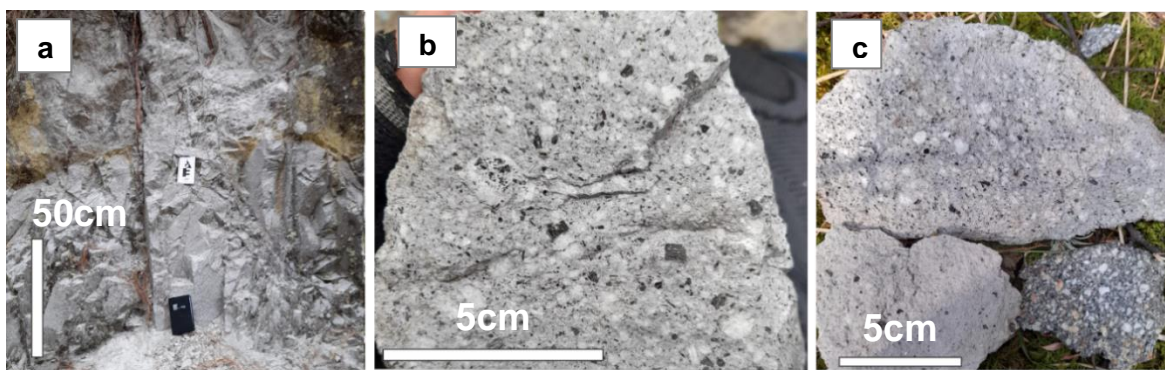


Figura 9. Fotografías macroscópicas de los domos de la barranca NE del volcán La Malinche. **a)** Afloramiento de muestra LM-2310; **b)** Muestra LM-2310; **c)** Distintos líticos de un mismo depósito, se observan distintos grados de cristalinidad.

Entre los domos de la barranca NE hay una depresión de aprox. 1.5 km de longitud, que contiene dos planicies desprovistas de vegetación arbórea de aprox. 170 m de largo (fig. 10c). Solamente se observó un afloramiento de lavas en las paredes que definen la depresión: se trata de un depósito conformado por fragmentos angulosos de una unidad de roca intemperizada, de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y ensamble mineral compuesto de plagioclasa, anfíbol y biotita inmersos en una matriz rojiza (fig. 10a, 10b)

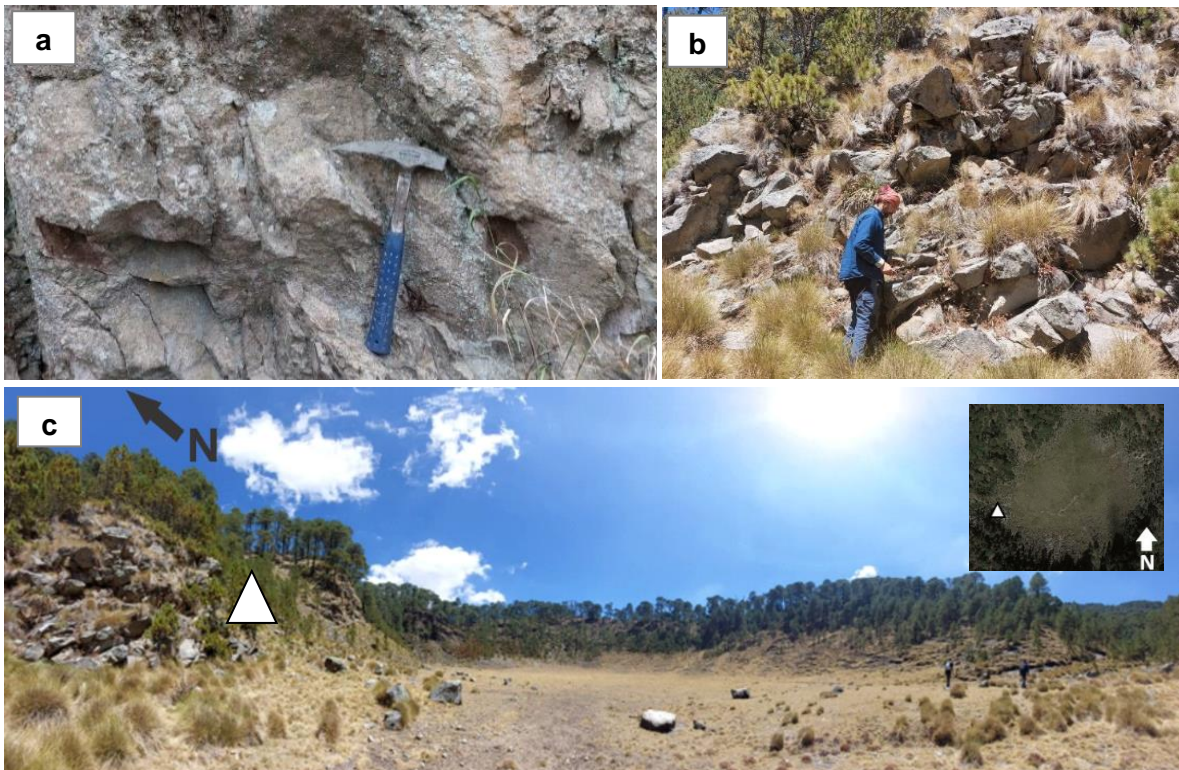


Figura 10. Depresión. **a)** y **b)** Afloramientos de roca de la pared de la depresión; **c)** Imagen panorámica de la depresión, y el triángulo blanco indica la ubicación del afloramiento de la muestra 2318-2.

6.3 Mapa geológico

Con los sitios visitados en campo (fig. 5c) se obtuvo el mapa geológico (fig. 11) en donde se identificaron al menos 6 unidades: aluvión, depresión, depósitos de caída, domo, flujo de bloques y ceniza, y Pre-Malinche. En el mapa se encuentra la descripción de cada unidad.

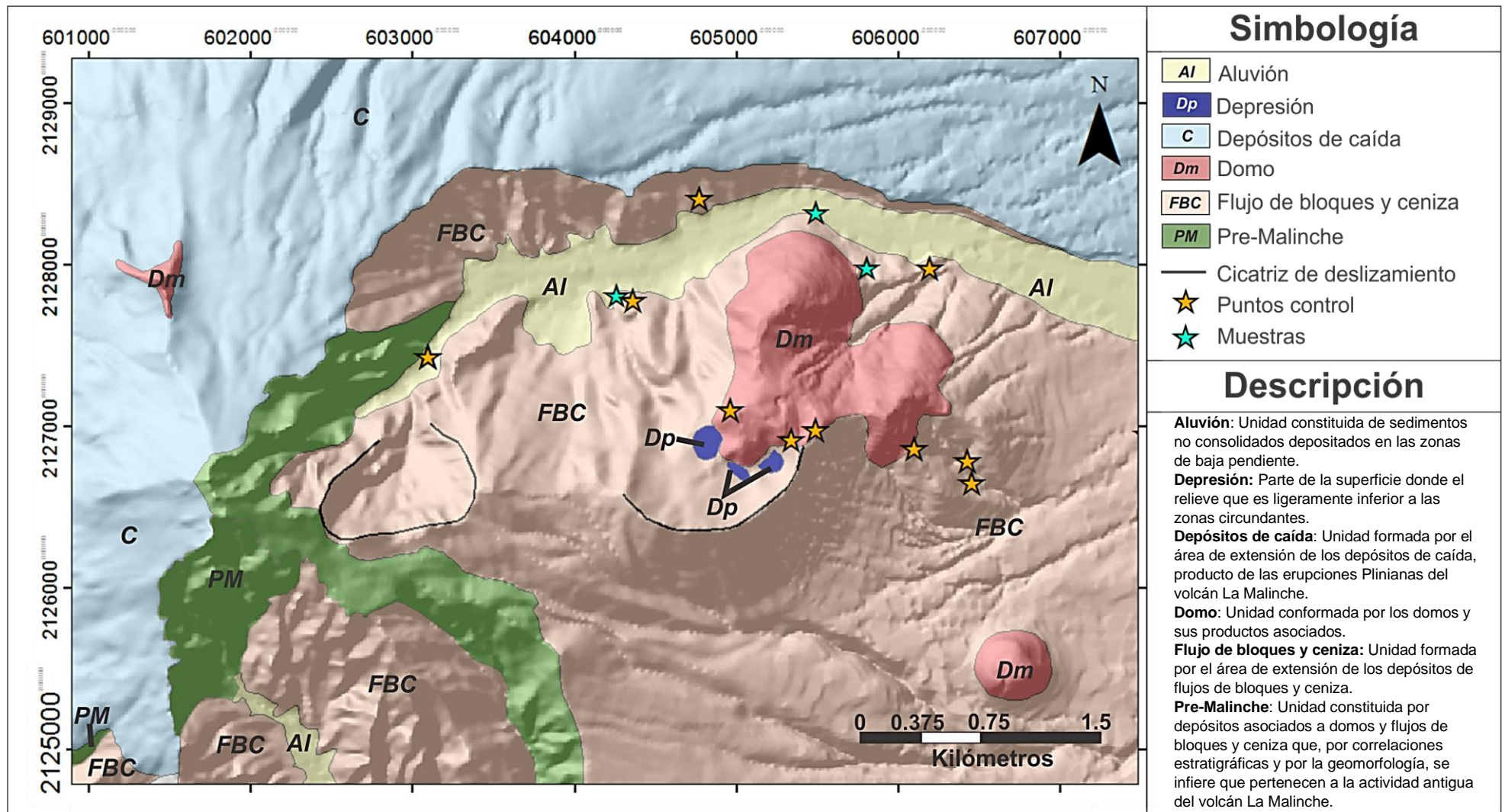


Figura 11. Mapa geológico del volcán La Malinche. Se aprecian distintas unidades. AI= aluvión, Dp= Depresión, C= depósitos de caída, Dm= Domo, FBC= Flujo de bloques y cenizas, PM= Pre-Malinche.

6.3 Petrografía

Se realizó la petrografía de cinco muestras de rocas de los domos de la cima, y de tres muestras de rocas de la barranca Noreste.

6.3.1 Domos de la Cima

Según las cinco muestras que se analizaron, las rocas de los domos consisten en rocas hipocristalinas, porfídicas, con una mesostasis seriada, con un contenido de cristales de 60-80% en vol. La matriz tiene textura traquítica y está formada por vidrio y plagioclasa. El ensamble mineral de todas las rocas se compone de plagioclasa > anfíbol > biotita > óxidos ± cuarzo. Las plagioclasas, anfíboles y biotitas se presentan en poblaciones de megacristales, fenocristales y microcristales, mientras que el cuarzo se presenta solo en microcristales.

Los megacristales de plagioclasa son hipidiomorfos, tienen una textura de desequilibrio muy particular: la mayor parte de los cristales tiene textura tamiz, sobre todo en el centro, pero cuentan con un borde bien definido de plagioclasa sin textura de desequilibrio (fig. 12.a).

Hay dos poblaciones de fenocristales de plagioclasas, la diferencia principal entre ellas son las texturas de desequilibrio: una forma glomerocristales, tiene zoneamiento oscilatorio y presenta intercalación de zonas con textura tamiz y zonas estables, mientras que la otra población está fracturada pero no tiene ninguna textura de desequilibrio (fig. 12.e). Los domos cercanos al cráter principal (LM-2203 y LM-2204) tienen 2 poblaciones de fenocristales de anfíbol: una tiene textura poiquilítica con óxidos de Fe-Ti (fig. 12b y fig. 13a), en la otra población se presenta borde de descompresión y cristales reemplazados completamente por opacita (fig. 12.d). Los fenocristales de biotita del domo del centro tienen un borde oscuro (fig. 12.c).

La mayoría de los microcristales de plagioclasa tienen borde con textura tamiz. Hay dos poblaciones de microcristales de anfíboles, en donde una presenta bordes oscuros y la otra se da en forma de cúmulos sin textura de desequilibrio.

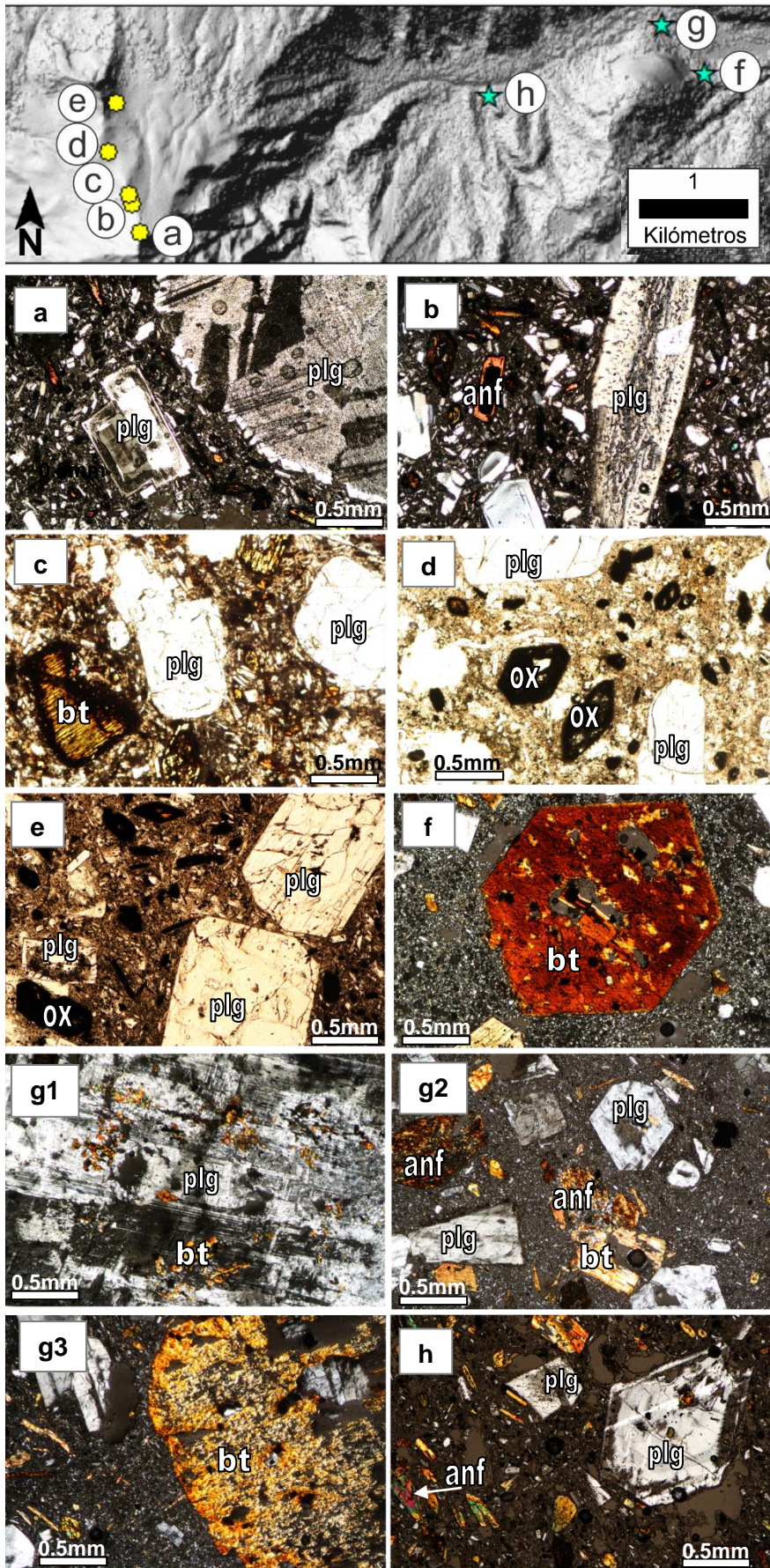


Figura 12. Ubicación y microfotografías de las muestras de los domos de la cima (a-e) y de la barranca NE (f-h) del volcán La Malinche. **a)** Muestra LM-2203 a nícoles cruzados, se observan fenocristales y megacristales de plagioclasa en desequilibrio; **b)** Muestra LM-2204 a nícoles cruzados, se observa plagioclasa con textura tamiz y anfíbol con óxidos reemplazando el centro; **c)** Muestra LM-2205 a luz natural, se observa biotita con borde de desequilibrio; **d)** Muestra LM-2206 a luz natural, se ven anfíboles reemplazados por óxidos; **e)** Muestra LM-2200 a luz natural; **f)** Muestra LM-1 a nícoles cruzados, se ve biotita poiquilítica; **g1)** Muestra LM-2 a nícoles cruzados, se ve plagioclasa con textura poiquilítica rellena de biotita; **g2)** Muestra LM-2 a nícoles cruzados, se aprecian fenocristales de plagioclasa y anfíbol; **g3)** Muestra LM-2 a nícoles cruzados, se ve megacristal de biotita con bordes anhedrales y textura poiquilítica y cristales de plagioclasa dentro; **h)** Muestra LM-3 a nícoles cruzados, se aprecian fenocristales de plagioclasa con textura tamiz cerca al borde. Plg= plagioclasa, bt= biotita, anf= anfíbol, ox= óxido.

6.3.2 Domos de la Barranca

Los domos de la parte NE de la Malinche son rocas con textura hipohialina, con un contenido promedio de cristales de 40% en vol. (fig. 12. f-h). El ensamble mineral de todas las rocas se compone de plagioclasa > biotita > anfíbol > óxidos ± cuarzo, y algunas muestras presentan contenido traza de piroxeno y circón (LM-1 y LM-2). Las muestras se caracterizan por tener un elevado contenido de biotita en comparación del anfíbol, donde el contenido de biotita ronda 20% en vol. y el anfíbol 5% en vol. Tienen una matriz con textura traquítica formada por vidrio y microcristales de plagioclasa.

Las plagioclasas de los domos de la zona NE se pueden dividir en tres grupos: megacristales, fenocristales y microcristales; las biotitas en megacristales y microcristales; los anfíboles y cuarzo en microcristales, teniendo este último menos del 1% en vol.

Todos los megacristales de plagioclasa y biotita tienen formas subhedrales y anhedrales, y solo algunos de plagioclasa euhedrales (fig. 12.g2). La mayoría de fenocristales de plagioclasa presentan zoneamiento, fracturamiento y maclado tipo Carlsbad, y algunos tienen textura poiquilítica (fig. 12.g1). Se observan algunos megacristales de biotita que destacan por su tamaño de 3000µm y se presentan solo en LM-2, estos se encuentran fracturados y tienen textura poiquilítica (con óxidos y/o plagioclasa en zonas internas), con bordes euhedrales y subhedrales (fig. 12.g3); los demás fenocristales de biotita son hipidiomorfos, algunos presentan bordes inestables (fig. 12.f). Los fenocristales de plagioclasa y biotita tienen formas euhedrales y subhedrales; las plagioclasas presentan zoneamiento oscilatorio. Las formas de los microcristales de anfíboles son euhedrales, subhedrales y anhedrales. Los microcristales de plagioclasa, anfíbol y biotita tienen formas subhedrales y anhedrales (fig. 12.h).

Las rocas de los domos de la zona NE de La Malinche presentan varios megacristales de plagioclasa donde se presenta una intercalación de zonas con textura tamiz y zonas estables (fig. 12.g1, 12.h y 13f). Cabe destacar que hay dos poblaciones de fenocristales de plagioclasa en donde unos presentan borde de

reabsorción y otros no (fig. 12.g2). Otra característica peculiar de estas rocas es el intercrecimiento de minerales (fig. 13b, 13c, 13d y 13e). También se encontró evidencia de textura mirmekítica en un domo cercano a la cima (fig. 13g y 13h).

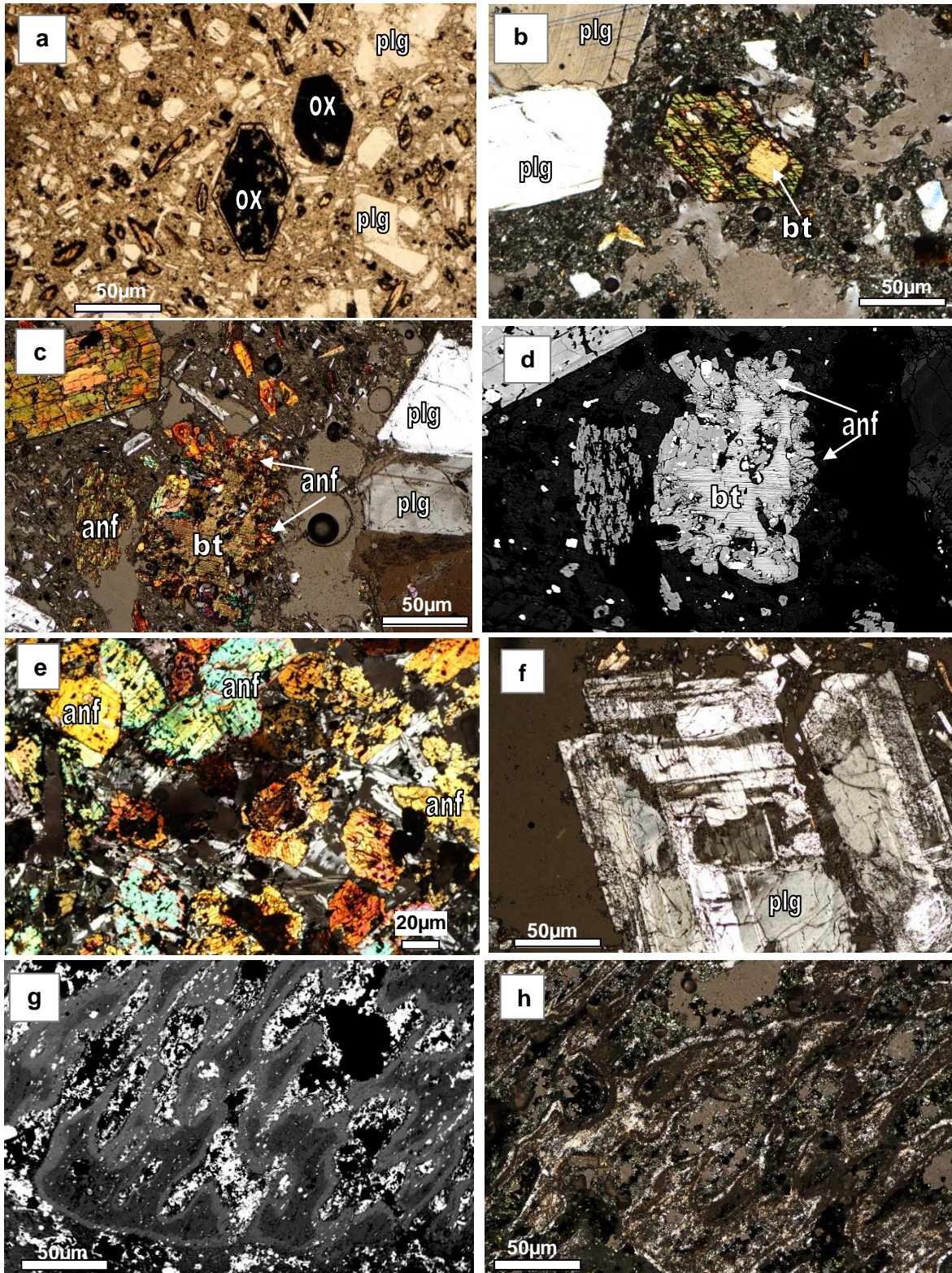


Figura 13. Microfotografías de los domos de la zona NE del volcán La Malinche. **a)** Muestra LM-2204 a luz natural, se observan anfíboles reemplazados por óxidos; **b)** Muestra LM-1 a nícoles cruzados, se aprecia anfíbol que cristalizó a partir de una biotita; **c)** Muestra LM-3 a nícoles cruzados, se ven cristales de anfíbol cristalizando alrededor de una biotita; **d)** Microfotografía obtenida de la microsonda electrónica, se ven anfíboles alrededor de biotita de muestra LM-3; **e)** Muestra LM-2204 a nícoles cruzados, se trata de un cúmulo de anfíboles; **f)** Muestra LM-3 a nícoles cruzados, se ve plagioclasa con textura tamiz; **g)** Muestra LM-2203 a nícoles cruzados, se ve textura característica de una mirmekita; **h)** Microfotografía obtenida de la microsonda electrónica, se ve mirmekita de muestra LM-2203. Plg= plagioclasa, bt= biotita, anf= anfíbol, ox= óxido.

6.3.3 Xenolitos

Se encontraron un total de cinco xenolitos: tres en la cima (LM-2200, LM-2205 y LM-2206) y dos en la barranca NE (LM-1 y LM-3). Todos los xenolitos presentan texturas holocristalinas (>90% en vol. de cristales). Los xenolitos de la cima comparten algunas características: ensamble mineral de plagioclasa > óxidos, sus plagioclasas son fenocristales (300-900µm) tabulares, algunos fracturados, bordes subhedrales y formando glomerocristales. A pesar de que los xenolitos de las muestras LM-2200 y LM-2206 se parecen visual y mineralógicamente, sus diferencias yacen en las plagioclasas que los conforman: mientras que las de la muestra LM-2200 tienen maclado, pero no zoneamiento, todas las de la muestra LM-2206 sí están zoneadas, además de tener textura poiquilítica con óxidos de Fe-Ti (fig. 14a vs. fig. 14c). El xenolito de la muestra LM-2205 presenta además fenocristales (300-400µm) de biotita (fig. 14b) y sus plagioclasas tienen zoneamiento.

Los xenolitos de la barranca NE son diferentes entre sí. El xenolito de la muestra LM-1 es un agregado de megacristales (3000µm) y fenocristales de biotita (con hábito acicular) y de plagioclasa y menos de 2% de microcristales de anfíbol con formas subhedrales (fig. 14d y fig. 14e). Por último, el xenolito de la muestra LM-3 es un agregado de fenocristales de anfíbol y biotita, además de óxidos (fig. 14f).

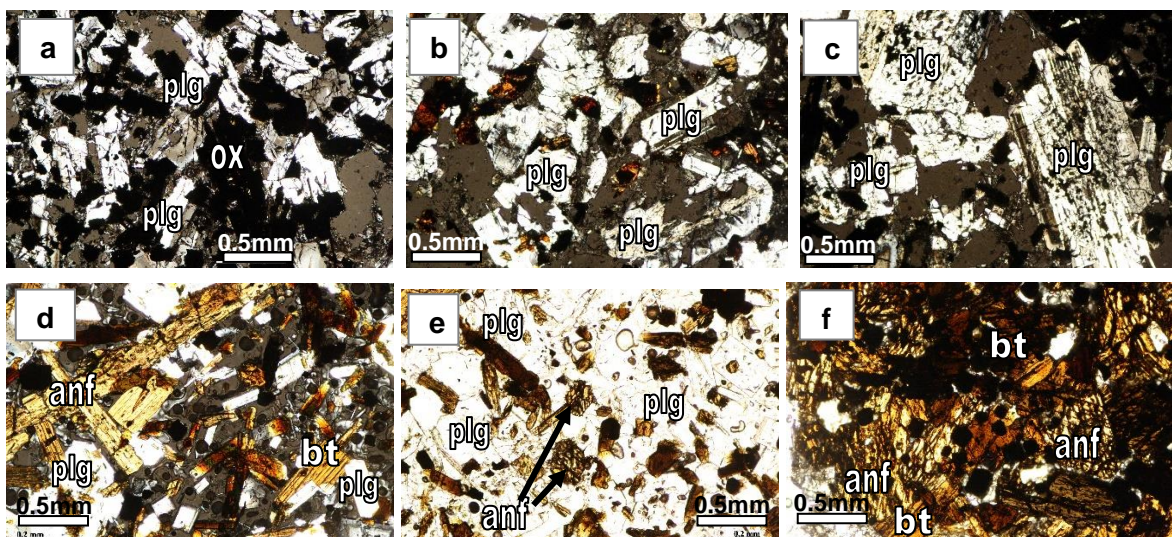


Figura 14. Microfotografías de los xenolitos encontrados en los domos de La Malinche. **a)** Muestra LM-2200 a nícoles cruzados; **b)** Muestra LM-2205 a nícoles cruzados; **c)** Muestra LM-2206 a nícoles cruzados; **d)** Muestra LM-1 a nícoles cruzados; **e)** Muestra LM-1 a luz natural; **f)** Muestra LM-3 a luz natural. Plg= plagioclasa, bt= biotita, anf= anfíbol, ox= óxido.

6.4 Geoquímica

En la tabla 2 se encuentran los análisis geoquímicos con los cuales se realizaron las gráficas.

Tabla 2. Concentración de elementos mayores y traza de los domos del volcán La Malinche

| | LM-2203 | LM-2205 | LM-1 | LM-2 | LM-3 |
|----------------------------------|---------|---------|-------|-------|-------|
| <i>Elementos mayores (wt. %)</i> | | | | | |
| SiO ₂ | 62.97 | 62.54 | 63.79 | 65.21 | 62.67 |
| TiO ₂ | 0.49 | 0.6 | 0.51 | 0.41 | 0.61 |
| Al ₂ O ₃ | 16.4 | 16.39 | 15.62 | 15.68 | 15.74 |
| Fe ₂ O ₃ | 5.04 | 5.21 | 4.29 | 4.03 | 5.06 |
| MnO | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.1 |
| MgO | 2.74 | 2.75 | 2.45 | 2.19 | 2.93 |
| CaO | 5.05 | 5.16 | 4.42 | 4.27 | 4.8 |
| Na ₂ O | 4.7 | 4.55 | 4.57 | 4.63 | 4.35 |
| K ₂ O | 2.03 | 1.96 | 2.68 | 2.52 | 2.13 |

| | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|------|------|
| P ₂ O ₅ | 0.26 | 0.25 | 0.23 | 0.21 | 0.19 |
| LOI | 0.25 | 0.51 | 1.37 | 0.78 | 1.42 |
| Total | 100.01 | 100.01 | 100.01 | 100 | 100 |
| <i>Elementos traza (ppm)</i> | | | | | |
| Rb | 44 | 43 | 63 | 59 | 48 |
| Sr | 587 | 561 | 595 | 566 | 516 |
| Ba | 536 | 483 | 613 | 604 | 477 |
| Y | 22 | 21 | 27 | 24 | 23 |
| Zr | 194 | 305 | 232 | 206 | 190 |
| Nb | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 |
| V | 110 | 91 | 85 | 71 | 100 |
| Cr | 113 | 119 | 121 | 126 | 105 |
| Co | 10 | 10 | 11 | 10 | 14 |
| Ni | 17 | 21 | 34 | 23 | 29 |
| Cu | 9 | 11 | 11 | 7 | 5 |
| Zn | 65 | 66 | 61 | 55 | 65 |
| Th | 3 | 5 | 7 | 4 | 6 |
| Pb | 5 | 10 | 10 | 9 | 7 |

6.4.1 Roca total

Los domos del volcán La Malinche son rocas dacíticas principalmente (fig. 15a), según el diagrama de TAS (Total Alkali vs. Silica; Le Bas *et al.*, 1986), y pertenecen a la serie calcoalcalina, según el diagrama de clasificación de rocas volcánicas de Peccerillo y Taylor (1976), teniendo solo una muestra rica en K (muestra LM-1, fig. 15b). Tienen una composición de SiO₂ promedio de 64% en peso (rangos de 62 a 65% en peso).

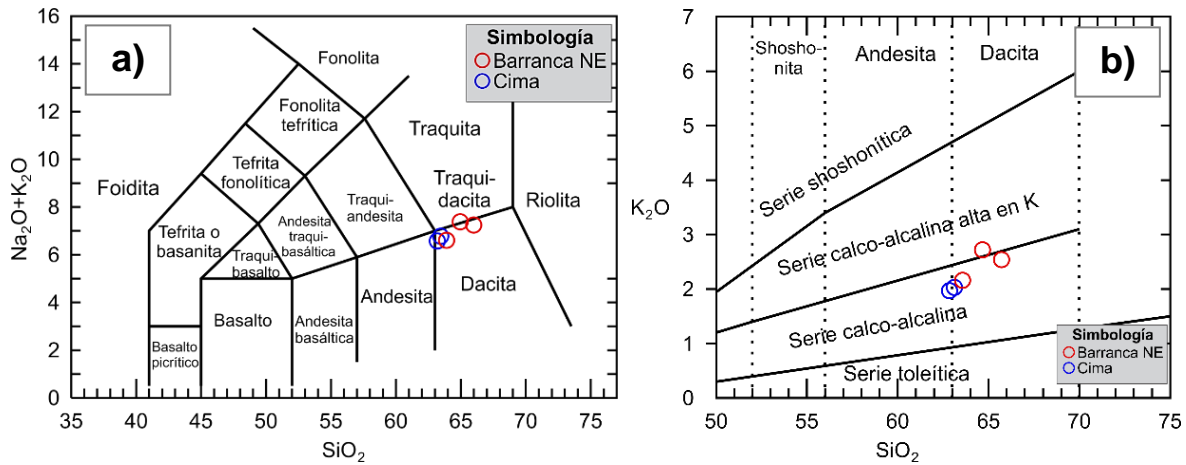


Figura 15. Diagramas geoquímicos de los productos efusivos del volcán La Malinche. **a)** Diagrama TAS (Le Bas et al., 1986) de los productos efusivos de la cima (muestras LM-2203 y LM-2205) y de la barranca NE (muestras LM-1, LM-2 y LM-3). **b)** Diagrama de clasificación de rocas volcánicas (Peccerillo y Taylor, 1976).

En el diagrama multielementos (fig. 16) se observa que tanto las rocas de la cima como de la barranca NE tienen un comportamiento similar. Se aprecia un enriquecimiento en elementos litófilos de ion grande (LILE) móviles como Cs, Rb, Ba y K, elementos incompatibles que están enriquecidos en la corteza y que son solubles en medios acuosos. Se reflejan anomalías positivas en Pb, Sr, Zr e Y, y anomalías negativas en Nb, P y Ti.

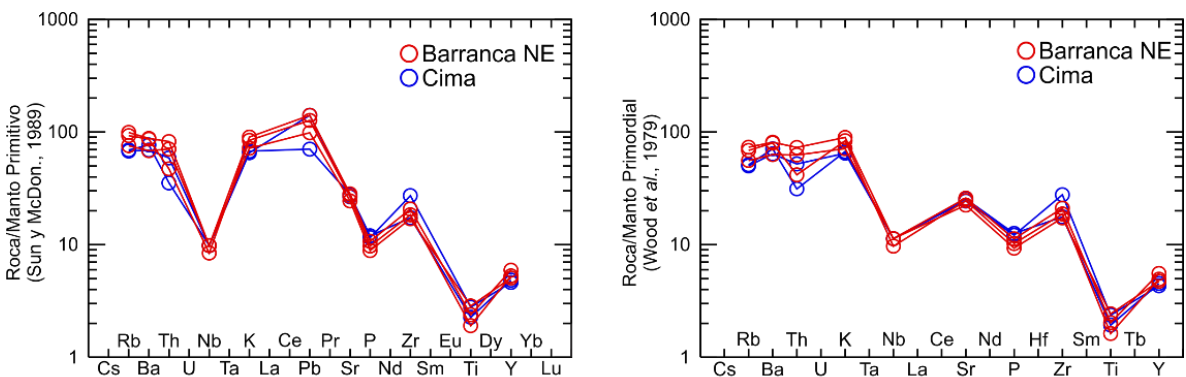


Figura 16. Diagramas multielementos de los domos de la cima y de la barranca NE del volcán La Malinche. Los diagramas están normalizados con los valores del manto primitivo (izquierda) según Sun y McDonough (1989) y del manto primordial (derecha) según Wood et al. (1979).

6.4.2 Química mineral

Vidrio

El vidrio de los domos (muestras LM-1, LM-2, LM-3, LM-2200, LM-2204 y LM-2205) de La Malinche tiene una composición promedio de SiO_2 de 76.61% en peso, y según el diagrama de clasificación TAS se trata de vidrio riolítico (fig. 17).

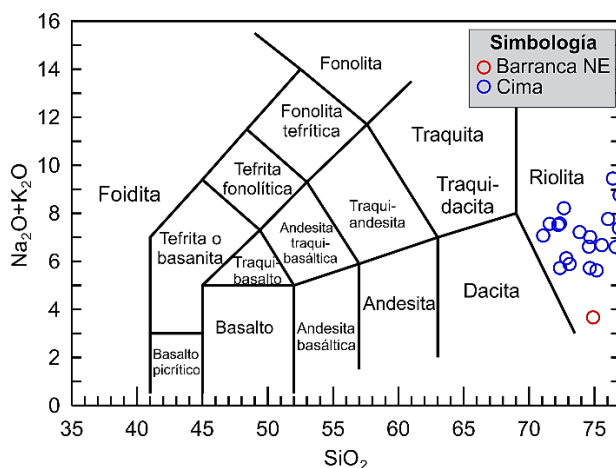


Figura 17. Diagrama TAS (Le Bas et al., 1986) del vidrio de los domos del volcán La Malinche.

Plagioclasas

De acuerdo con los análisis composicionales tomados en la microsonda electrónica, la composición de SiO_2 de las poblaciones de plagioclasas de la barranca NE (muestras LM-1, LM-2, LM-3) son ligeramente más altas que las de la cima (muestras LM-2200, LM-2203, LM-2204, LM-2205). En la cima hay megacristales, fenocristales y microcristales de plagioclasa con composiciones entre 58-57% en peso, mientras que en la barranca NE hay fenocristales y microcristales con composiciones de 59-60% en peso.

Las plagioclasas de las muestras de los domos de la cima presentan bordes y núcleos con composiciones que van desde labradorita hasta oligoclasa, siendo más abundante la andesina (fig. 18a y 18b). Los microcristales son mayormente de composición de labradorita y andesina, habiendo algunos de tamaños $<5 \mu\text{m}$ de oligoclasa y anortoclasa (fig. 18c).

Los bordes y núcleos de las plagioclasas de la barranca NE varían composicionalmente de labradorita a oligoclasa, concentrándose en andesina (fig. 18a), sin embargo, la composición de los fenocristales más grandes de LM-2 es de labradorita-bytownita (fig. 18b). Los microcristales tienen composición de labradorita a andesina (fig. 18c).

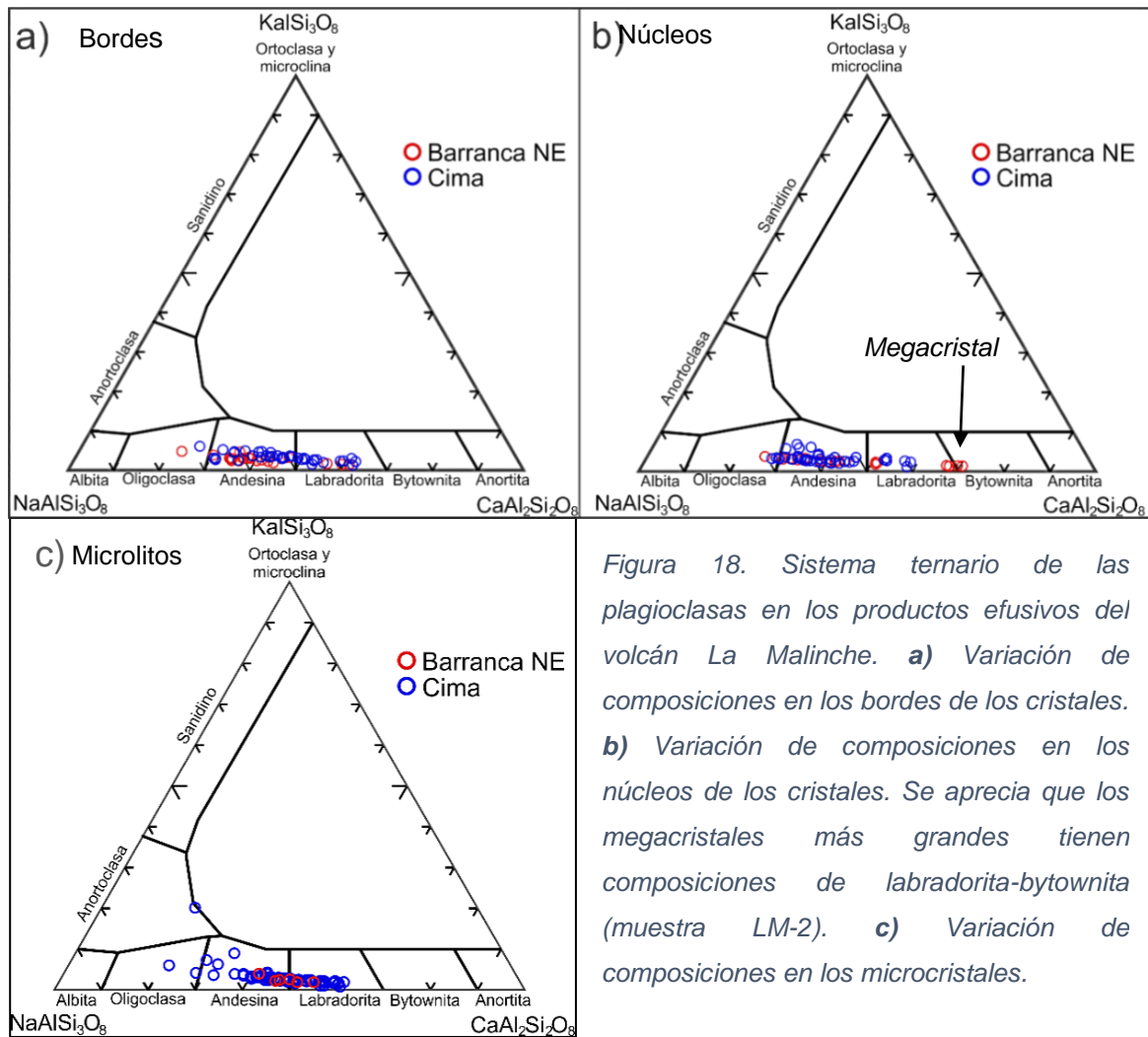
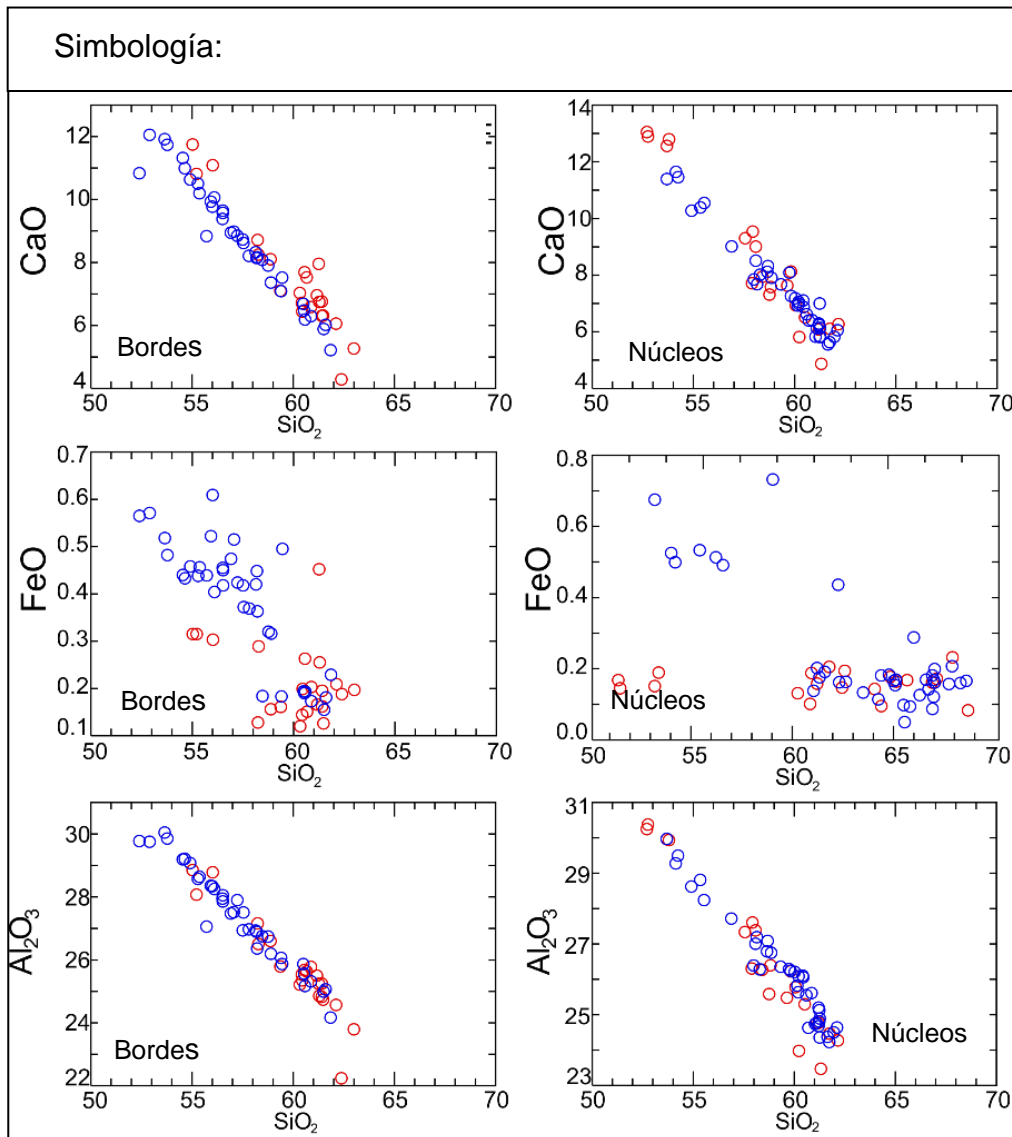


Figura 18. Sistema ternario de las plagioclasas en los productos efusivos del volcán La Malinche. **a)** Variación de composiciones en los bordes de los cristales. **b)** Variación de composiciones en los núcleos de los cristales. Se aprecia que los megacristales más grandes tienen composiciones de labradorita-bytownita (muestra LM-2). **c)** Variación de composiciones en los microcristales.

En los diagramas binarios (fig. 19) se observa la variación química de los elementos mayores presentes en los bordes y núcleos de las plagioclasas de los productos efusivos. Tanto los bordes como los núcleos presentan tendencias similares. El CaO y Al₂O₃ exhiben una correlación negativa con respecto al SiO₂, es decir, conforme aumenta el contenido de SiO₂ disminuye el de CaO y Al₂O₃. En el caso del K₂O y del Na₂O se observa una correlación positiva con relación al

SiO₂. En los bordes se aprecian dos tendencias: una perteneciente a las plagioclasas de la cima (que empieza en 52% de SiO₂ y termina en 62%) y otra a las de la barranca NE (que empieza en 55% de SiO₂ y termina en 63%). En los núcleos los datos se encuentran más dispersos, pero se sigue la misma tendencia creciente. Algo muy peculiar sucede al graficar SiO₂ vs. FeO porque los bordes y los núcleos no siguen la misma tendencia, como sí sucede con todos los demás: en los bordes se observa una tendencia ligeramente negativa, mientras que los núcleos, presentan una tendencia horizontal y se concentran de 0 a 0.2% de FeO, es decir, conforme aumentaba el SiO₂ el contenido de FeO se mantuvo constante en 0.2%.



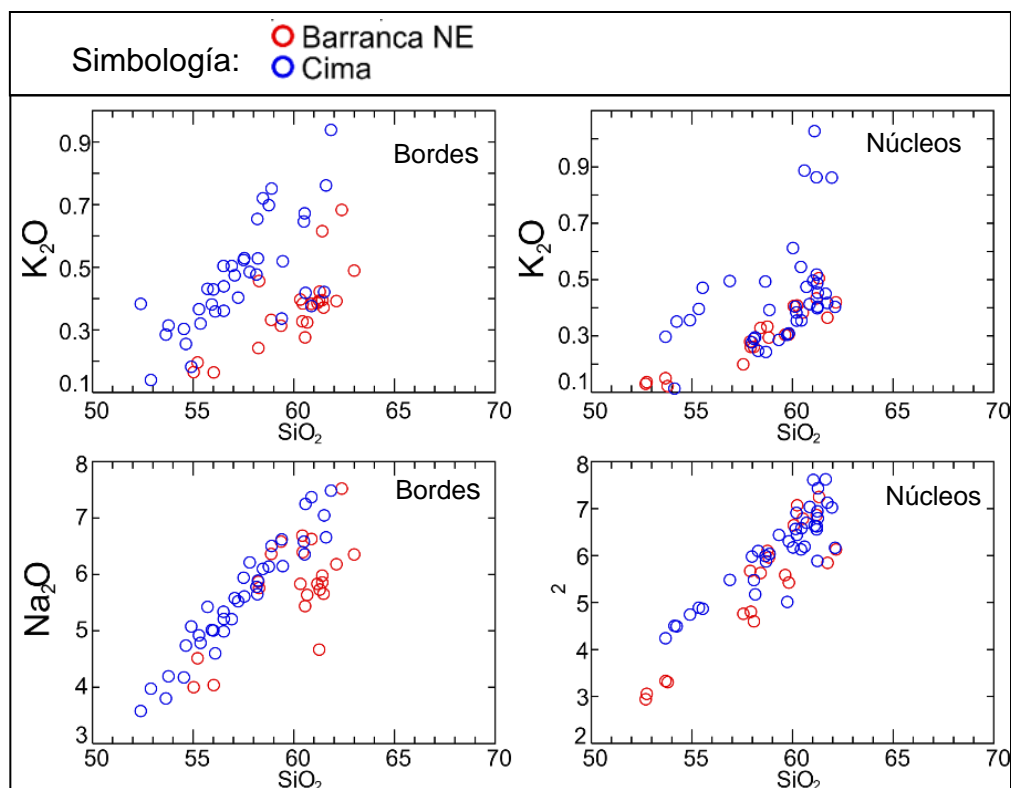


Figura 19. Diagramas de variación de elementos mayores de los bordes (izquierda) y núcleos (derecha) de las plagioclasas de los domos en la cima y en la barranca NE del volcán La Malinche.

Al graficar la variación del contenido de anortita en los cristales de plagioclasa de los domos podemos observar que los microcristales que presentan una zonación oscilatoria tienden a tener un bajo porcentaje de anortita en el centro ($An_{20}-An_{30}$), luego incrementa y vuelve a bajar conforme se acerca al borde (fig. 20a, 20d). A diferencia de los microcristales con zonación en sectores, en donde el borde tiene altos porcentajes de anortita ($An_{50}-An_{60}$), y en el centro disminuye ($An_{35}-An_{45}$; fig. 20c, 20e). En los fenocristales se ve una zonación claramente más variada y con incrementos conforme se acerca al centro, y la diferencia principal entre los de la cima y los de la barranca NE es que estos últimos tienen un mayor rango de variación (entre $An_{30}-An_{55}$) (fig. 20b), mientras que los de la cima se mantienen entre An_{30} y An_{40} (fig. 20f).

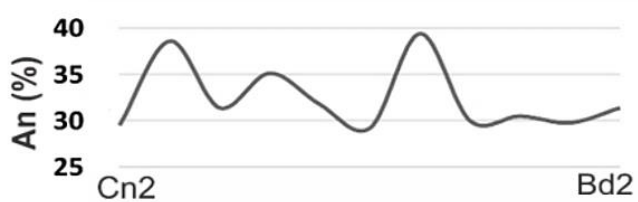
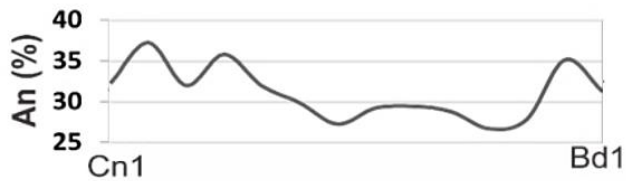
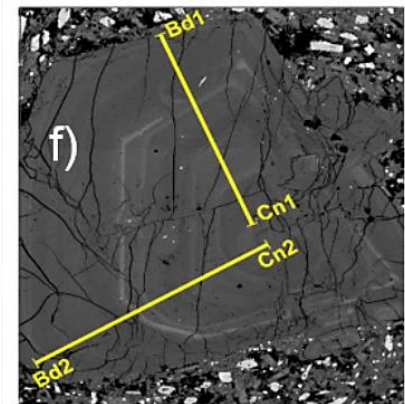
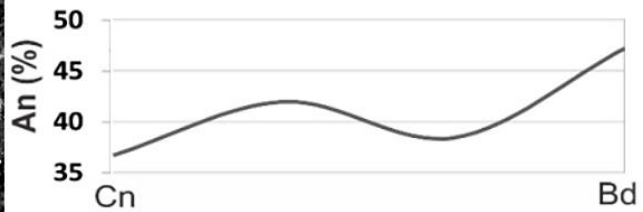
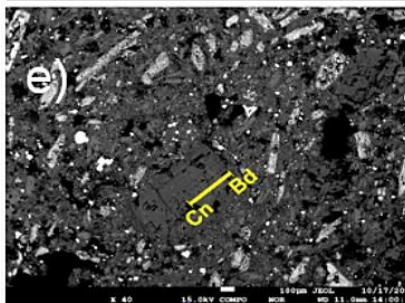
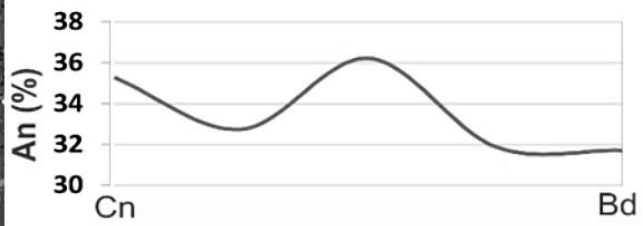
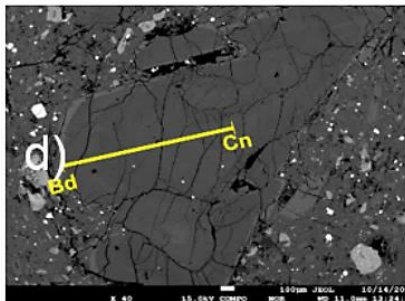
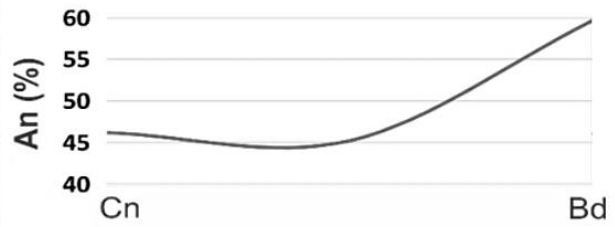
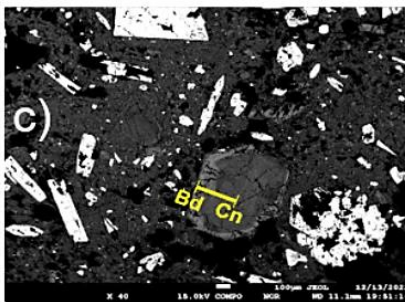
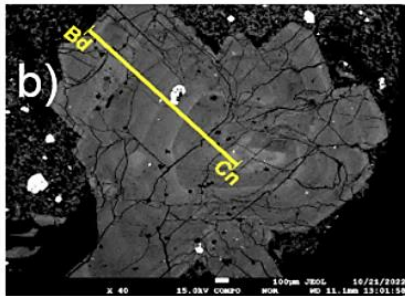
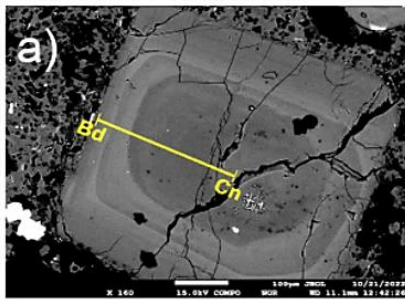


Figura 20. Variación de contenido composicional de anortita en microcristales y fenocristales de plagioclasa de los domos de la barranca NE (a-c) y de la cima (d-f) del volcán La Malinche. Microfotografías obtenidas de la microsonda electrónica. A la derecha de cada fotografía se observa la gráfica de variación composicional según el transecto del borde al núcleo. **a)** Microcristal de muestra LM-1; **b)** Fenocristal de muestra LM-1; **c)** Microcristal de muestra LM-3, se aprecia textura Rapakivi; **d)** Fenocristal de muestra LM-2204; **e)** Microcristal de muestra LM-2205; **f)** Fenocristal de muestra LM-2205, se observa la variación del borde al centro en varias direcciones. An= anortita. Bd= borde. Cn= centro.

Anfíboles

Los anfíboles tienen composiciones de SiO₂ variables: fenocristales (46.6%), microcristales (45.5%) y microfenocristales (48.1%) en la cima; microcristales (47.4%) y microfenocristales (45%) en la barranca NE. Todos los anfíboles varían de magnesiohornblenda a tschermakita, a diferencia de un par; los anfíboles de la cima tienen una mayor concentración en tschermakita y los de la barranca NE en magnesiohornblenda (fig. 21).

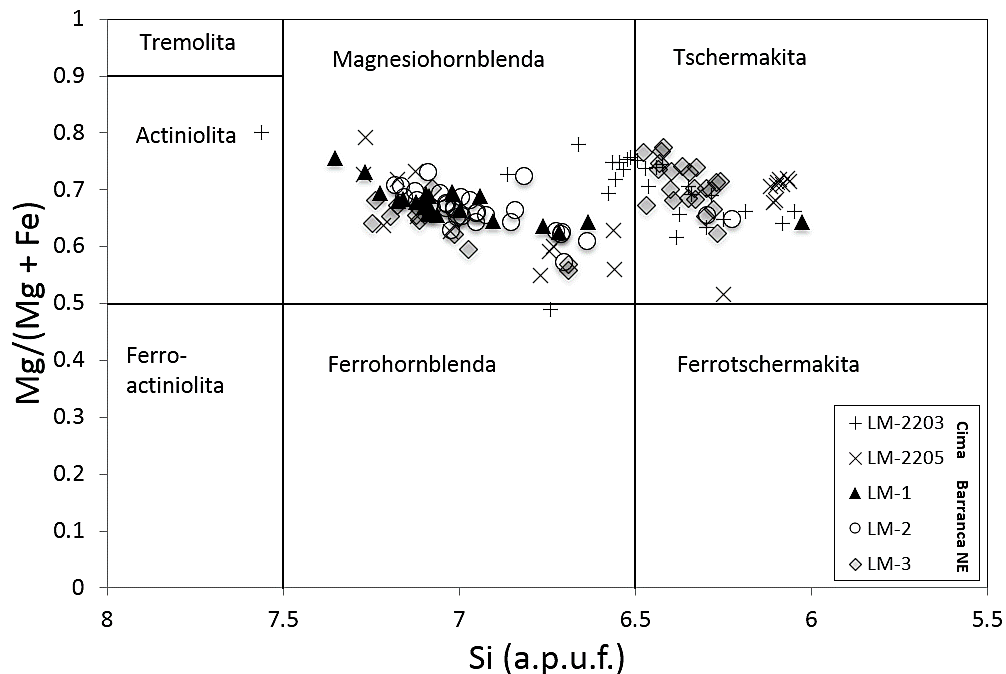


Figura 21. Clasificación según Leake, et al. (1997) de los anfíboles de los domos de la cima y de la barranca NE del volcán La Malinche. a.p.u.f.= átomos por unidad de fórmula.

Biotitas

Las biotitas tienen composiciones de SiO_2 muy similares entre sí: los fenocristales y microcristales con 38.1 y 39.9% en peso en la cima; en la barranca NE los fenocristales, microcristales y microfenocristales con 38.4, 38.6 y 38.8% respectivamente.

Al graficar los átomos por unidad de fórmula de SiO_2 contra el número de magnesio ($\#Mg=Mg/Mg+Fe$) podemos observar que conforme aumenta el SiO_2 también lo hace el $\#Mg$, sin embargo, hay 3 grupos claramente diferenciables concentrándose en 0.5, 0.6 y 0.7 de $\#Mg$ (fig. 22a). Al graficar el SiO_2 vs. Al_2O_3 se ve una ligera tendencia lineal positiva, con los datos agrupándose de 1.3 a 1.4 para Al_2O_3 y de 3.0 a 3.1 para SiO_2 (fig. 22b).

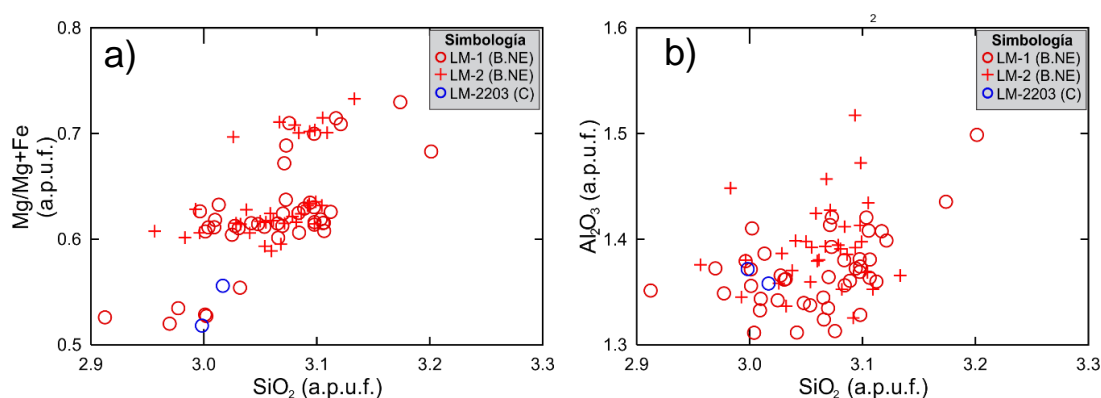


Figura 22. Diagramas binarios de dispersión de átomos por unidad de fórmula o a.p.f.u. **a)** SiO_2 vs. el número de Magnesio; **b)** SiO_2 vs. Al_2O_3 . B.NE= barranca NE; C=cima.

6.4.3 Química mineral de xenolitos

Se midió la composición de plagioclasas de dos xenolitos, pertenecientes a la barranca NE. Las composiciones de las plagioclasas del xenolito de LM-1 varían de labradorita a andesina (fig. 23a), mientras que el de LM-3 va de labradorita a oligoclasa (fig. 23b).

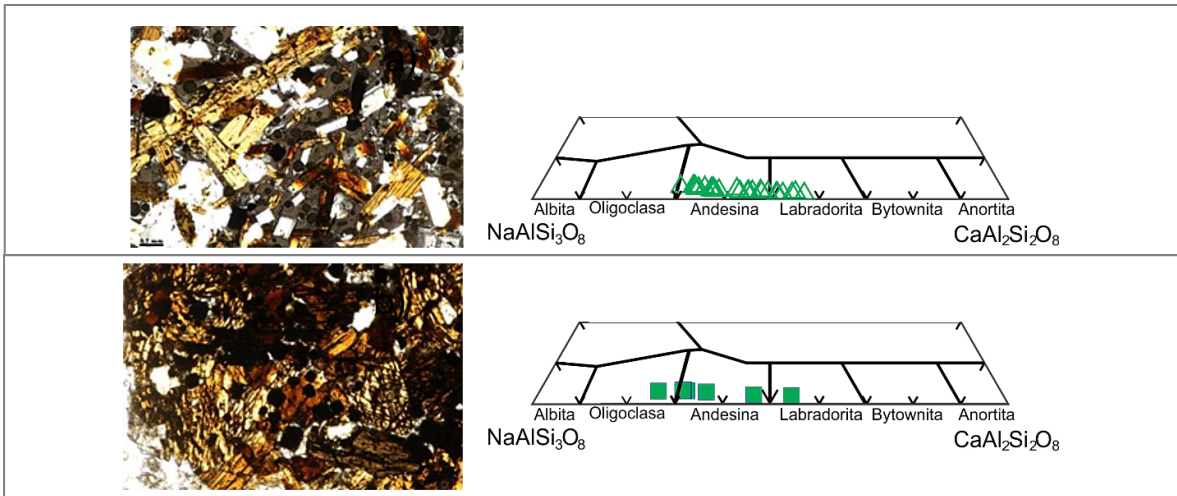


Figura 23. Microfotografías de los xenolitos de los domos del volcán La Malinche y su respectivo sistema ternario de las plagioclasas. a) Xenolito de muestra LM-1; b) Xenolito de muestra LM-3.

Todos los anfíboles presentan valores de #Mg muy homogéneos, es decir, los valores de #Mg permanecen casi constantes al variar el contenido de SiO₂ (fig. 24). Los anfíboles de los xenolitos de la barranca NE muestran concentración de magnesiohornblendas, pero también variación hacia tschermakitas, mientras que los de la cima son tschermakitas (fig. 23).

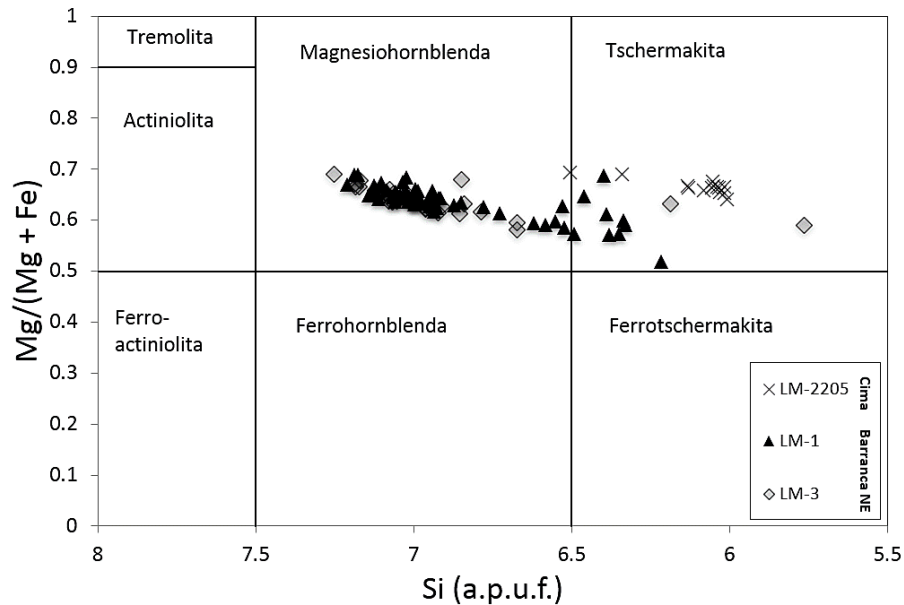


Figura 24. Clasificación según Leake, et al. (1997) de los anfíboles de los xenolitos encontrados en los domos de la cima y de la barranca NE del volcán La Malinche. a.p.u.f.= átomos por unidad de fórmula.

7. Discusión

7.1 Comparación entre los diferentes productos del volcán La Malinche

Las unidades geológicas del volcán La Malinche comparten similitudes con relación a los líticos de las distintas unidades. Por ejemplo, los sedimentos depositados en la unidad de aluvión (fig. 25a) son muy similares a los clastos provenientes de los flujos de bloques y ceniza (fig. 25b), que a su vez son similares a las rocas que conforman los domos de La Malinche (fig. 25c).

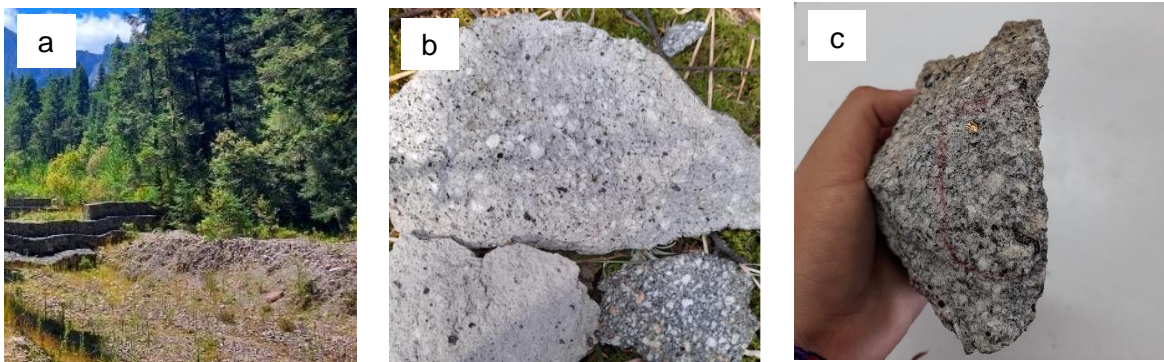


Figura 25. Comparación entre distintos productos del volcán La Malinche. **a)** Depósito de aluvión; **b)** Clastos provenientes de flujo de bloques y ceniza; **c)** Muestra proveniente de un domo de La Malinche (muestra LM-2).

Las rocas de los domos de la cima y de la barranca NE son muy similares entre sí: ensamble mineral de plagioclasa, biotita, anfíbol y cuarzo, presencia de megacristales, fenocristales y microcristales, distintas poblaciones minerales con y sin textura de equilibrio, presencia de xenolitos, presencia de matriz vítrea. Esto indica que, si bien presentan algunas diferencias, su composición final pudo haber sido integrada por procesos de formación similares, es decir, que pudieron haber tenido características similares al formase (composición, presión, temperatura, contenido de agua).

7.2 Geoquímica de las unidades efusivas del volcán La Malinche

Las rocas dacíticas de los domos de La Malinche están enriquecidas en elementos inmóviles, cuya causa podría asociarse al metasomatismo de la fuente mantélica por fluidos liberados de la placa de Cocos, igualmente el enriquecimiento en los elementos LILE señala la contribución de fluidos acuosos a la cuña del manto para después incorporarse al proceso de subducción (Manea y Manea, 2011; Becerra-Torres, 2014), es decir, la deshidratación de clorita y anfíbol en la placa de Cocos provoca una importante contribución de fluidos acuosos a la cuña del manto que después se incorporan al proceso de subducción (Pearce, 1982; Wilson y Davidson, 1984). También presentan anomalías negativas en Nb y Ti, y positivas en Pb (fig. 16). Estas características son propias de magmas calcoalcalinos provenientes de la subducción, como comprueba el diagrama de clasificación de rocas volcánicas (fig. 15; Le Bas et al., 1986). El empobrecimiento de Nb se debe a que este elemento es compatible con el rutilo, el cual es estable en las condiciones donde la placa subducida se deshidrata y en donde se generan los magmas, es decir, son evidencias de contaminación cortical (Hornig y Hess, 2000; Schmidt *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2018).

El incremento del Na₂O y K₂O conforme se incrementa el SiO₂ se atribuye a que éstos no son incorporados a los minerales que cristalizan mientras el líquido se enfría, por ende, se conservan o se concentran en el líquido residual (Harker, 1909; Pearce, 1982; Wilson, 1989). La disminución progresiva del contenido de CaO conforme incrementa la concentración de SiO₂ implica la cristalización temprana de la plagioclasa y minerales máficos (Poldevaart y Parker, 1964; Wilson, 1989). Así como el CaO se incorpora a las plagioclasas, el MgO y FeO son incorporados a los minerales máficos de formación temprana (anfíboles, piroxenos y olivinos), dando una correlación negativa. Sin embargo, esto solo sucede en los bordes de las plagioclasas de la cima; en los núcleos y bordes de las plagioclasas de la barranca NE y núcleos de las plagioclasas de la cima la concentración de FeO se mantuvo constante conforme se cristalizaba el SiO₂, indicio de que el evento que ocurrió no fue lo suficientemente lento como para afectar a los núcleos también. El FeO es un parámetro en las plagioclasas que

denota mezcla con magmas más máficos (Koyaguchi, 1986; Ryabchikov y Kogarko, 2013; Weber *et al.*, 2019; Korkmaz y Kurt, 2021), dando más argumento a la idea que hubo un evento de intrusión máfica que fue lo suficientemente rápido como para afectar solamente los bordes de las plagioclasas.

7.3 Evidencia de procesos magmáticos: Mezcla de magmas y asimilación

El graficar la variación del contenido de anortita del borde al núcleo en los cristales de plagioclasa ayuda a observar los cambios que ocurrieron mientras los minerales estaban cristalizando, además de describir la influencia de la presión, temperatura y composición del líquido (Ustunisik *et al.*, 2016). Según la petrografía analizada en este trabajo, algunos cristales de los domos crecieron en condiciones de equilibrio y otros sufrieron procesos de desequilibrio. Incluso hay zonas en donde conviven cristales con desequilibrio (como bordes de reabsorción y texturas de tamiz) y sin desequilibrio, sugiriendo que los primeros fueron afectados por algún proceso (probablemente recalentamiento por inyección de material máfico), y que los segundos cristalizaron a partir del magma híbrido resultado de la interacción de un magma nuevo y uno más antiguo. Otra evidencia de la mezcla de magmas son los picos de anortita presentes en las plagioclasas que imprimen eventos de calentamiento (fig. 20). Además, hay indicios de choques térmicos, expresados en la acumulación de microcristales de anfíboles alrededor de las biotitas. La presencia de microcristales sin textura de desequilibrio y de fenocristales con textura de desequilibrio rodeada de una textura estable podría indicar que hubo un reequilibrio en donde crecieron minerales a partir del magma híbrido.

Diversos procesos químicos, físicos y termodinámicos provocan cambios en la composición del magma, y uno de estos es la asimilación. Durante la asimilación, el magma incorpora la roca encajonante por fundición de las paredes de la cámara magmática (Bowen, 1928). En La Malinche hay posibles evidencias de este proceso: la presencia de xenolitos corticales y de *mirmekitas* (fig. 13g). Igualmente, la presencia de megacristales puede ser otra evidencia de

asimilación; los megacristales pueden estar representando restos de una roca intrusiva que está siendo disgregada o porciones de un reservorio fósil que logró cristalizar en su totalidad. Espinosa (2021) realizó un diagrama según Nachit *et al.* (2005) y se encontró que los megacristales de biotitas de La Malinche son reequilibradas, muy probablemente xenocristales (Espinosa, 2021). Las biotitas analizadas por Espinosa (2021) provenían de la Pómez Malinche II, sin embargo, las características petrográficas son muy similares a las reportadas en las rocas de los domos del presente estudio, por lo que se infiere que pueden tener un origen similar (fig. 26). Las biotitas de los domos de La Malinche son ricas en Mg. Esto podría significar que a medida que fueron cristalizando se fueron enriqueciendo en este elemento, y podría indicar que el líquido que las originó estaba saturado en H₂O y la fugacidad de Oxígeno (fO₂) estuvo incrementándose, lo que incrementó también cantidad de magnetita presente (Wones *et al.*,1965). Espinosa (2021) también sugiere que los anfíboles de La Malinche son xenocristales o antecristales incorporados al sistema magmático antes de la erupción.

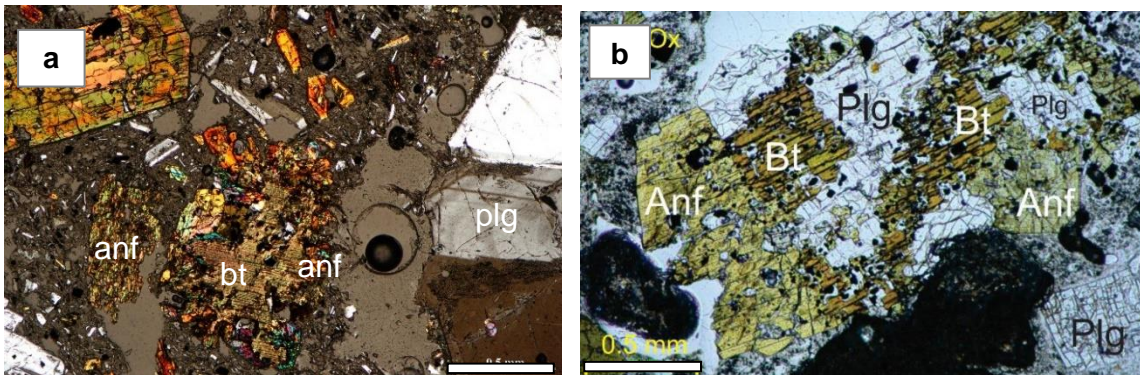


Figura 26. Comparación de biotita con borde de reacción de los productos efusivos de los domos de La Malinche (a) y de los productos explosivos de la Pómez Malinche II (b). a) Muestra LM-3 a nícoles cruzados. b) Muestra a luz natural, reportada por Espinosa (2021). Anf=anfíbol, bt=biotita, plg=plagioclasa.

En este trabajo no se midieron presiones ni temperaturas, sin embargo, Espinosa (2021) realizó mediciones con geotermobarómetros de anfíboles de las erupciones explosivas de La Malinche, obteniendo que el magma está alojado a 8.4 ± 4.4 km debajo del volcán, es decir, estos procesos pudieron tener lugar en la corteza

superior. Al analizar la presencia y distribución de fases minerales observamos que la abundancia de anfíbol y biotita refleja una presión equivalente de al menos 2.5% de agua, lo cual, haciendo una comparación con el volcán Popocatépetl, equivale a al menos 130 MPa de presión (Sosa-Ceballos *et al.*, 2012).

Dando aún más soporte a las evidencias de asimilación se puede ver en la fig. 27 la comparación de la clasificación de anfíboles de las rocas de los domos y la clasificación de anfíboles de los xenolitos (línea azul), y se observa que son muy similares, indicando que, composicionalmente hablando, podrían tener un origen similar.

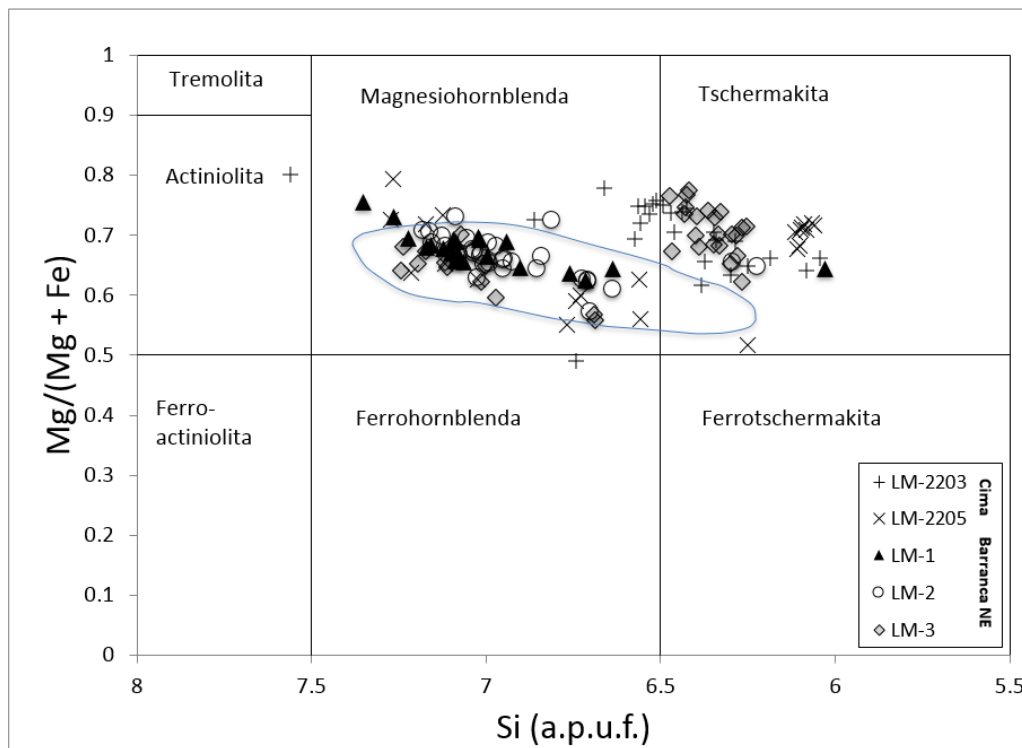


Figura 27. Comparación de la clasificación según Leake, *et al.* (1997) de los anfíboles de las rocas de los domos del volcán La Malinche y de los anfíboles de los xenolitos (línea azul).

La presencia de textura *Rapakivi* en las plagioclasas de algunos xenolitos de La Malinche (fig. 20c) apoya esta idea, ya que este tipo de textura ocurre en rocas graníticas (Raymond, 1995). También el hecho de tener una mirmekita podría significar que un fragmento de granito fue asimilado, ya que las mirmekitas

ocurren exclusivamente en rocas intrusivas (Raymond, 1995). Así mismo, ya se ha reportado la presencia de xenolitos de granodioritas y de rocas granodioríticas en los alrededores, sobre todo en el volcán Popocatepetl (Sosa-Ceballos *et al.*, 2012; Sosa-Ceballos *et al.*, 2015; Straub *et al.*, 2015; Ramírez-Urbe *et al.*, 2022), y se ha visto mediante isótopos de Sr-Nb-Pb que en la zona subyacente al volcán Popocatepetl hay granodioritas y gneiss de biotita que emergen como posibles miembros finales de la corteza terrestre (Straub *et al.*, 2015).

7.4 Evolución magmática

Después de analizar geoquímica y petrográficamente los productos efusivos del volcán La Malinche, se propone el siguiente modelo de evolución magmática (fig. 28). Primero se encontraba la cámara magmática estable dentro de la roca encajonante, en este caso un cuerpo granítico o granodiorítico. Después ocurrió una inyección de un cuerpo magmático más caliente que provocó recalentamiento e inestabilidad de la cámara, generando texturas de desequilibrio, y al mismo tiempo se dio la asimilación del granito, generando la incorporación de xenolitos y mirmekitas. Posteriormente, hubo una etapa de reequilibrio en donde crecieron nuevos minerales a partir del magma híbrido, algunos crecieron completamente estables y otros crecieron a partir de los que ya habían sufrido desequilibrio.

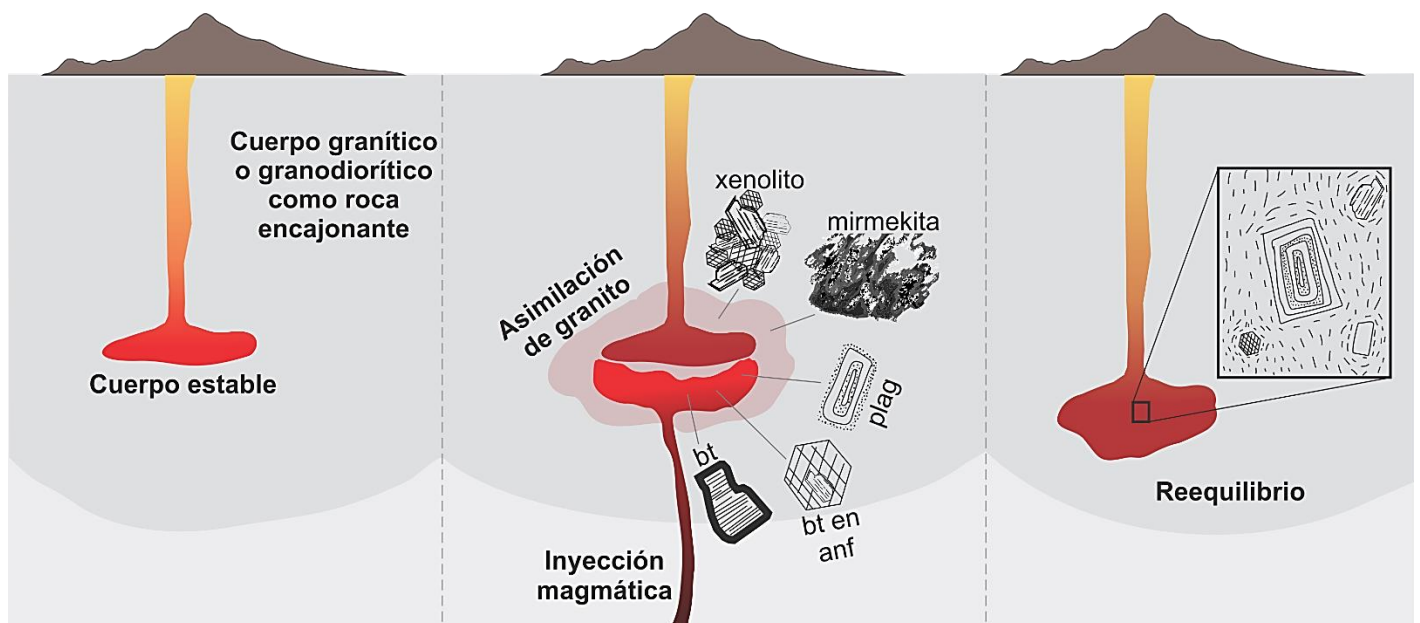


Figura 28. Modelo propuesto de evolución magmática de las rocas que dieron origen a los domos o productos efusivos del volcán La Malinche.

8. Conclusiones

Las rocas de los domos estudiados son de composición dacítica (con contenido de SiO₂ de 62-65% en peso), con asociación mineral de plagioclasa ± anfíbol ± biotita > óxidos ± cuarzo. Tienen un origen de subducción, coherente con lo reportado para los productos explosivos, y permiten identificar marcadores característicos de los procesos que sufrieron durante su evolución.

El análisis petrográfico permitió reconocer evidencias de distintos procesos que se llevaron a cabo durante la evolución de los magmas que dieron origen a los domos, como mezcla de magmas y asimilación. La existencia de distintas poblaciones minerales y de megacristales ayudó a discernir de algunas hipótesis, llegando a la conclusión de que se trataba del proceso de asimilación. Así mismo, el tener convivencia de minerales con textura de desequilibrio y minerales sin textura de desequilibrio, además de surgimiento de bordes de anfíboles indicando choque térmico, llevó a la conclusión que además de asimilación también se produjo un proceso de recalentamiento por inyección de un cuerpo intrusivo magmático.

El ensamble mineral se compone de plagioclasa, biotita, anfíbol y cuarzo y, a pesar de no saberse la composición del fundido inicial, se llega a la conclusión de que la roca encajonante se trata de un granito o granodiorita y que después de la inyección magmática hubo tiempo suficiente para que pudiera darse el desarrollo de un reequilibrio. Las afirmaciones anteriores fueron posibles y fueron sustentados con los análisis petrográficos.

Es de suma importancia seguir generando estudios y proyectos para conocer más sobre la dinámica eruptiva para así poder generar una evaluación integral de peligros volcánicos en la zona, sobre todo por su potencial peligro. Este trabajo constituye una parte fundamental para este propósito, especialmente el mapa geológico y el diagrama de evolución magmática propuesto.

Los resultados de la composición química y los datos petrográficos aquí mostrados reducen la brecha de conocimiento sobre los domos del volcán La

Malinche ya que constituye el primer estudio completamente enfocado a los mismos, y contribuyen a llenar uno de los espacios faltantes en la petrogénesis de este volcán activo, facilitando su comprensión y su utilización para generar planes preventivos.

A pesar de lo ya realizado, se resalta la necesidad de generar más estudios estratigráficos, petrológicos y geomorfológicos para realizar una completa caracterización de estas estructuras y evaluar el potencial riesgo que pueden llegar a constituir.

9. Bibliografía

- Ague, J. (1989). La distribución de Fe y Mg entre biotita y anfíbol en rocas graníticas: Efectos de la temperatura, presión y composición del anfíbol. *Revista Geoquímica*, 23(6), 279-293.
- Ahmed, W., Vander Voort, G. (2000). *Petrographic Examination Methods* [Archivo PDF]. www.buehler.com
- Albee, A. (1965). Distribution of Fe, Mg, and Mn between Garnet and Biotite in Natural Mineral Assemblages. *The Journal of Geology*, 73(1), 155-164. DOI: 10.1086/627051.
- Angulo-Carrillo, J. (2018). *Análisis de la actividad sísmica e hidrotermal del volcán La Malinche, México*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Angulo-Carrillo, J., Lermo-Samaniego, J. F., Martínez-González, J., Valseca, R. (2013, 6-9 de noviembre). *La Malinche, un volcán potencialmente activo*. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Veracruz, México.
- Apollaro, C., Marini, L., Critelli, T., De Rosa, R., Bloise, A., Miriello, D., Catalano, M., Armano, V. (2013). Modeling of the impact of dolomite and biotite dissolution on vermiculite composition in a gneissic shallow aquifer of the Sila Massif (Calabria, Italy). *Applied Geochemistry*, 35, 297-311. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2013.05.004.
- ArcGis. (2023). *Mosaic to New Raster*. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/data-management/mosaic-to-new-raster.htm>
- Asato, G. (13-18 de octubre de 1996). *La importancia del Manejo Integrado de Datos Geológicos en Formato Digital* [Conferencia]. XIII Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires, Argentina.
- Avdonin, V.V., Gaidukova, V.S., Dubinchuk, V.T. (1980). The submicroscopic inhomogeneity of volcanic glasses and its relation to liquation processes. *Moscow University Geology Bulletin*, 28(329), 43-50.

- Becerra-Torres, E. (2014). *Variabilidad petrográfica y geoquímica del magmatismo monogenético periférico al volcán La Malinche*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Boijseauneau, M.E. (2018). *Evolución del magmatismo félsico en el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. Estudio de Petrología Experimental y Geoquímica*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bowen, N. L. (1928). *The evolution of the Igneous Rocks*. Nueva York, Estados Unidos. Princeton University Press.
- Carter, J. (1970). Mineralogy and Chemistry of the Earth's Upper Mantle based on the partial fusion-partial crystallization model. *Bulletin of the Geological Society of America*, 81(7), 2021-2034. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[2021:MACOTE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[2021:MACOTE]2.0.CO;2).
- Castro, A. (2015). *Petrografía de rocas Ígneas y Metamórficas*. Madrid, España: Paraninfo.
- Castro, F., Tucker, T. (2009). *Matlatcuéyetl: visiones plurales sobre cultura, ambiente y desarrollo*. Tlaxcala, México: El Colegio de Tlaxcala, A. C. CONACYT. ISSN: 0188-6126.
- Castro-Govea, R. (1999). *Historia eruptiva reciente del volcán La Malinche*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castro-Govea, R. (2007). *Historia eruptiva del volcán La Malinche y estudio del emplazamiento del flujo piroclástico Pilares Superior*. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castro-Govea, R., Siebe, C. (2007). Late Pleistocene-Holocene stratigraphy and radiocarbon dating of La Malinche volcano, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 162(1-2), 20-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.01.002>.
- Chen, W., Xiong, X., Wang, J., Xue, S., Li, L., Liu, X., Ding, X., Song, M. (2018). TiO₂ Solubility and Nb and Ta Partitioning in Rutile-Silica-Rich Supercritical

Fluid Systems: Implications for Subduction Zone Processes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(6), 4765-4782. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JB015808>.

Cioni, R., Pistolesi, M., Pompilio, M., Scaillet, B. (2021). Understanding volcanic systems and their dynamic combining field and physical volcanology with petrology studies. En Shroder, J. y Papale P. (Eds.), *Forecasting and Planning for Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (pp. 285-329). Elsevier Publications.

Dávila, E. (2018). *Análisis de peligro por lahares en el volcán La Malinche y delimitación de los depósitos secundarios en el sector sur*. Tesis de ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

De la Torre, E. (1992). *Volcanes de México*. Ciudad de México, México: Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Dobran, F. (2012). *Volcanic Processes: Mechanisms in Material Transport*. Reino Unido: Springer.

Erffa, A., Hilger, W., Knoblich, K, Weyl, R. (1976). Geología de la Cuenca Alta de Puebla-Tlaxcala y sus contornos. *Proyecto Puebla-Tlaxcala: Comunicaciones* 13, 99-106.

Espinosa, V. (2021). *Estudio de las condiciones pre-eruptivas del magma que dio origen a la Pómez Malinche II, volcán La Malinche*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 84-92. DOI: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2000v53n1a5>.

Ferrari, L., Garduño, V., Pasquarè G., Tibaldi, A. (1994). Volcanic and tectonic evolution of central Mexico: Oligocene to present. *Geofísica Internacional*, 33(1), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1994.33.1.542>.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M. (2012). The Dynamic

history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523, 122-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>.

Ferrari, L., Vaggelli, G., Petrone, C., Manetti, P., Conticelli, S. (2000). Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Tectonophysics*, 318, 161-185. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00310-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00310-8).

García, S. (2021). *Geocronología, petrología y rasgos tectónicos de los batolitos en la región de Puerto Escondido, Oaxaca*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M., Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 227-283. DOI: <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a2>.

Gómez-Valencia, A., Vidal-Solano, J., López-Martínez M., Vega-Granillo, R., Pallares, C. (2015). Petrografía, geoquímica y geocronología del magmatismo orogénico en Rayón: Características petrológicas de los últimos magmas asociados a la subducción en Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(2), 219-238.

Harker, A. (1909). *The Natural History of Igneous Rocks*. Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press.

Heine, K. (1971). Fechas ^{14}C de los sedimentos del volcán La Malinche. *Anuario de Geografía*, 11, 177-184.

Heine, K., Heide-Weise, H. (1972). Estratigrafía del Pleistoceno Reciente y del Holoceno en el volcán de la Malinche y Región Circunvecina. *Proyecto Puebla-Tlaxcala: Comunicaciones*, 5, 3-8.

Heine, K., Heide-Weise, H. (1973). Secuencias de erupciones en el volcán de la Malinche y la Sierra Nevada durante los últimos 40 000 años. *Proyecto Puebla-Tlaxcala: Comunicaciones* 7, 7-8.

- Hornig, W., Hess, P. (2000). Partition coefficients of Nb and Ta between rutile and anhydrous haplogranite melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 138(2), 176-185.
- Irvine, T. N. (1975). The silica immiscibility effect in magmas, *Carnegie Institution of Washington Yearbook* 74, para 1974-1975, 484-492.
- Jolly, G. (2015). The role of volcano observatories in risk reduction. En Loughlin, S., Sparks, S., Brown, S., Jenkins, S., Vye-Brown, C. (Eds.), *Global Volcanic Hazards and Risk* (pp. 299-304). Cambridge University.
- Ken-Ichiro, A., Yoshida, T., Yusa, K., Nakamura, Y. (1985). Petrology and geochemistry of the Nyamuragira volcano, Zaire. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25(1-2), 1-28. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(85\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0377-0273(85)90002-2).
- Korkmaz, G., Kurt, H. (2021). Interpretation of the Magma Chamber Processes with the Help of Textural Stratigraphy of the Plagioclases (Konya-Central Anatolia). *European Journal of Science and Technology*, 25, 222-237. DOI: 10.31590/ejosat.898587.
- Koyaguchi, T. (1986). Textural and compositional evidence for magma mixing and its mechanism, Abu volcano group, southwestern Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 93, 33-45.
- Lario, J., Azcárate, T. (2016). *Introducción a los Riesgos Geológicos*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B. (1986). A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>.
- Leake, B., Wooley, A., Arps, C., Birch, W., Gilbert, M., Grice, J., Hawthorne, F., Kato, A., Kisch, H., Krivovichev, V., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J., Maresch, W., Nickel, E., Rock, N., Schumacher, J., Smith, D., Stephenson, C.,

- Ungaretti, E., Whittaker, E., Youzhi, G. (1997). Nomenclature of amphiboles; Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *American Mineralogist*, 82(2), 1019-1037. DOI: <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.405.13>.
- López-Ramos, E. (1979). Carta geológica de los estados de Puebla y Tlaxcala, escala 1:500,000. Instituto de Geología de la UNAM.
- Lypaczewski, P., Rivard, B. (2018). Estimating the Mg# and Al^{VI} content of biotite and chlorite from shortwave infrared reflectance spectroscopy: Predictive equations and recommendations for their use. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68, 116-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.02.003>.
- Macías, J. L., Capra, L. (2005). *Los volcanes y sus Amenazas (1ª ed.)*. México: Fondo Cultural de Economía.
- Malde, H. (1969). Volcanic ash stratigraphy at Valsequillo archaeological sites and La Malinche volcano, Puebla, Mexico. Annual Meetings, 11-13 de noviembre de 1968, Ciudad de México. *Program with Abstracts. Geological Society of America. Special Paper 121*, 186-187.
- Manea, V.C., Manea, M. (2011) Flat-slab thermal structure and evolution beneath central Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 168, 1475–1478. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0207-9>.
- Defant, J., Clark, L., Stewart, R., Drummond, M., De Boer, J., Maury, R., Bellon, H., Jackson, T., Restrepo, J. (1991). Andesite and dacite genesis via contrasting processes: the geology and geochemistry of El Valle Volcano, Panama. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106, 309-324.
- McBirney, A. R. (2015). *Effects of Assimilation en Evolution of the igneous rocks: Fiftieth anniversary perspectives*. Nueva Jersey, Estados Unidos: Princeton University Press

- Moya, J., Zamorano, J. (1983). *Estudio Geomorfológico del Volcán La Malinche y sus zonas adyacentes*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Nachit, H., Ibhi, A., Abia E.H. y Ohoud, M.B. (2015). Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites. *Comptes Rendus Geosciences*, 337,1415-1420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.09.002>.
- Ortiz, N. (2019). *Diseño de bases de datos para el análisis del volcanismo (ocurrencia y magnitud), los parámetros de subducción y evaluación del riesgo en las zonas de subducción México-Chile*. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Papale, P. (2021). Some relevant issues in volcanic hazard forecasts and management of volcanic crisis. En Shroder, J. y Papale P. (Eds.), *Forecasting and Planning for Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (pp. 1-24). Elsevier Publications.
- Pearce, J.A. (1982) Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. *En*: Thorpe, R.S., Ed., *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*, John Wiley and Sons, 252-548.
- Peccerillo, A., Taylor, S.R. (1976). Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81. DOI: 10.1007/BF00384745.
- Pérez-Campos, X., Kim, Y., Husker, A., Davis, P.M., Clayton, R.W., Iglesias, A., Pacheco, J.F., Singh, S.K., Manea, V., Gurnis, M. (2008). Horizontal subduction and truncation of the Cocos plate beneath central Mexico. *Geophysical Research Letters*, 35. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GL035127>.
- Plechov, P., Blundy, J., Nekrylov, N., Melekhova, E., Shcherbakov, V., Tikhonova, M. (2015). Petrology and volatile content of magmas erupted from Tolbachik Volcano, Kamchatka, 2012–13. *Journal of Volcanology and Geothermal*

Research, 307, 182-199. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.08.011>.

Poldevaart, A., Parker, A.B. (1964). The crystallization index as a parameter of igneous differentiation in binary variation diagrams. *American Journal of Science* 262, 281-289.

Pompa, V. (2005). *Petrografía y geoquímica del complejo volcánico Tacaná, Chiapas, México*. Tesis de ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Putirka, K. (2016). Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes. *American Mineralogist*, 104(4), 841-858. DOI:
<https://doi.org/10.2138/am-2016-5506>.

Ramírez-Uribe, I., Siebe, C., Oryaëlle, M., Ferres, D., Salinas, S. (2022). The late Holocene Nealtican lava-flow field, Popocatepetl volcano, central Mexico: Emplacement dynamics and future hazards. *The Geological Society of America*, 134(11-12), 2745-2766. DOI: <https://doi.org/10.1130/B36173.1>.

Raymond, L. (1995). *Petrology: The Study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic Rocks*. Estados Unidos: Waveland Press.

Rodríguez, L., Piñero, C., De Llano Monelos, P. (2013). Mapa de riesgos: Identificación y gestión de riesgos. *Atlantic Review of Economics*. ISSN 2174-3835.

Rubio-Ordoñez, A., Corretgé, L. G., Cuesta, A. (2007). Morfología de los circones como indicadores petrogenéticos de la asociación tonalita-leucogranito: El caso del Plutón de Zarza la Mayor (Cáceres-España). *Geogaceta*, 41, 187-190.

Ryabchikov, I., Kogarko, L. (2013). FeO activity and oxygen potential in magnesian magmas. *Geochemistry International*, 51, 949-958. DOI:
<https://doi.org/10.1134/S0016702913120070>.

- Sampa, H., Saha, P., Ray, J., Podder, A. (2010). Simple statistical and mineralogical studies as petrogenetic indicator for neoproterozoic mylliem porphyritic granites of east Khasi Hills, Meghalaya, Northeastern India. *Journal of Geological Society of India*, 75, 760-768. DOI: <https://doi.org/10.1007>.
- Savov, I., Luhr, J., Navarro-Ochoa, C. (2008). Petrology and geochemistry of lava and ash erupted from Volcán Colima, Mexico, during 1998–2005. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 174(4), 241-256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.02.007>.
- Scarpa, R., Tiling, R. (2012). *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer Berlin, Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-80087-0>.
- Schmidt, M., Dardon, A., Chazot, G., Vannucci, R. (2004). The dependence of Nb and Ta rutile-melt partitioning on melt composition and Nb/Ta fractionation during subduction processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 226, 415-432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.08.010>.
- Seele, E., Mooser, F. (1972). La Malinche y la tectónica del valle de Puebla. *Memorias de la II Convención Nacional de la Sociedad Geológica Mexicana*, 234-235.
- Sosa-Ceballos, G., Gardner, E., Siebe, C., Macías, J. L. (2012). A caldera-forming eruption ~ 14,100 ¹⁴C yr BP at Popocatepetl volcano, México: Insights from eruption dynamics and magma mixing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 213-214, 27-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.11.001>.
- Sosa-Ceballos, G., Macías, J.L., García-Tenorio, F., Layer, P., Schaaf, P., Solís-Pichardo, G., Arce, J.L. (2015). El Ventorrillo, a paleostructure of Popocatepetl volcano: insights from geochronology and geochemistry. *Bulletin of Volcanology*, 77:91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0975-2>.
- Springer, W., Seek, H. (1997). Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar: Implications for the origin of TTG magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127(1-2), 30-45. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004100050263>.

- Stavros, M. (2017). *Eruptive dynamics and petrological evolution of recent volcanism on the El Hierro Island: Implications for volcanic hazard assessment*. Tesis de doctorado. Universidad de Barcelona.
- Stock, J. (1993). Tectónica de placas y la evolución del Bloque Jalisco, México. *Boletín de la Unión Geofísica Mexicana*, 13(3), 3-9.
- Stoiber, R., Williams, S. (1990). Monitoring active volcanoes and mitigating volcanic hazards: the case for including simple approaches. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42(1-2), 129-149.
- Straub, S., Gómez-Tuena, A., Bindeman, I., Bolge, L., Brandl, P., Espinasa-Perena, R., Solari, L., Stuart, F., Vannucchi, P., Zellmer, G. (2015). Crustal recycling by subduction erosion in the central Mexican Volcanic Belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 166, 29-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.06.001>.
- Thorpe, R. (1977). Tectonic significance of alkaline volcanism in Eastern Mexico. *Tectonophysics*, 40, T19-T26. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90064-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90064-6).
- Tiling, R. (2008). The critical role of volcano monitoring in risk reduction. *European Geosciences Union*, 14, 3-11. DOI: <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-3-2008>.
- Ustunisik, G., Kilinc, A., Nielsen, R. (2016). New insights into the processes controlling compositional zoning in plagioclase. *Lithos*, 200-201, 80-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.03.021>.
- Verma, S. P., Salazar-V., A., Negendack, J. F. W., Milán, M., Navarro L., I., Besch, T. (1993). Características petrográficas y geoquímicas de elementos mayores del Campo Volcánico de Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Geofísica Internacional*, 32(2), 237-248. DOI: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1993.32.2.558>.
- Viniegra, D. (1965). Geología del Macizo de Teziutlán y la Cuenca Cenozoica de Veracruz. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 17, 101-

- Watson, E. B. (1976). Two-liquid partition coefficients: experimental data and geochemical implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 56, 119-134. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00375424>
- Weber, G., Arce, J.L., Ulianov, A., Caricchi, L. (2019). A Recurrent Magmatic Pattern on Observable Timescales Prior to Plinian Eruptions From Nevado de Toluca (Mexico). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(11). DOI:10.1029/2019JB017640
- Weyl, R. (1974). Determinación y clasificación de las rocas volcánicas en la región Puebla-Tlaxcala. *Proyecto Puebla-Tlaxcala: Comunicaciones* 10, 69-71.
- Wilson, M. (1989). *Igneous petrogenesis. A global tectonic approach*. Londres, Reino Unido: Springer, 466 pp.
- Wilson, M., Davidson, J.P. (1984). The relative roles of crust and upper mantle in the generation of oceanic island arc magmas. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 310(1514), 661-674. <http://www.jstor.org/stable/37313>
- Witter, J. B., Kress, V. C., Newhall, C. G. (2005). Volcán Popocatepetl, Mexico. Petrology, Magma Mixing, and Immediate Sources of Volatiles for the 1994–Present Eruption. *Journal of Petrology*, 46(11), 2337-2366. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egi058>.
- Wones, R., Eugster, H. (1965). Stability of biotite: experiment, theory, and application. *American Mineralogist*, 50(9), 1228-1272.
- Wu, C., Pan, Y., Wang, K., Zhang, J. (2010). A Report on a Biotite-Calcic Hornblende Geothermometer. *Acta Geologica Sinica*, 76(1), 126-131. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2002.tb00078.x>
- Yoder, H. (2015). *Evolution of the igneous rocks: Fiftieth anniversary perspectives*. Nueva Jersey, Estados Unidos: Princeton University Press.

Zimbelman, D., Watters, R., Bowman, S., Firth I. (2011). Quantifying hazard and risk assessments at active volcanoes. *Transactions American Geophysical Union*, 84(23), 213-217. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003EO230001>